

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний технологічний університет

Кафедра Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем



**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**  
на тему **Підвищення ефективності керування процесом каталітичної очистки**

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

**інертних газів**

Здобувача (ки) Філярського В.І.

(прізвище, ініціали)

2 курсу Ам-21 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 робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>Магістр</u>
Спеціальність	<u>151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u>
Освітньо-професійна програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в автоматизації</u>

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедри АТПіРС  
І.М. Світий

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Філярського Володимира Івановича

1. Тема роботи Підвищення ефективності керування процесом каталітичної очистки інертних газів

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

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи \_\_\_\_\_

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

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

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

Розділ 1. Технологічний процес 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 (Кріоін Інжиніринг).

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

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

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

7. Дата видачі завдання

Керівник

Завдання прийняв до виконання

Мазур О.В.

Філярський В.І.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

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

Здобувач-дипломник Філярський В.І. 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 Філярський В.І.

ПІБ

Підпис

## Анотація

Кваліфікаційна робота магістра на тему “Підвищення ефективності керування процесом каталітичної очистки інертних газів” присвячена підвищенню продуктивності, енергоефективності та економічної доцільності проведення технологічного процесу. Тема є актуальною, оскільки сучасний етап розвитку світового виробництва характеризується наявністю окремих галузей, в яких використовують високо очищені продукти, зокрема гази високої чистоти. Досліджено технологічний процес каталітичної очистки інертних газів, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування. Розроблено та реалізовано комплекс аналітичних математичних моделей процесу каталітичної очистки газових сумішей 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 каталітичної очистки інертних газів. 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 продуктивності та енергоефективності при гарантуванні дотримання обмежень по температурі. Розроблено та налагоджено прикладне програмне забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування (СГК) процесом каталітичної очистки інертних газів, 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

Перелік умовних позначень.....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС КАТАЛІТИЧНОЇ ОЧИСТКИ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ, ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	14
1.1.1 Загальний аналіз технологічного процесу, реалізованого агрегатом, цілей і умов його ведення .....	14
1.1.1.1 Складання схеми та опис суті технологічного процесу, реалізованого технологічним агрегатом, як цілеспрямованого перетворення матеріальних і енергетичних потоків.....	14
1.1.1.2 Опис конструкції технологічного агрегату та особливостей його експлуатації.....	15
1.1.1.3 Формулювання умов, при яких можливо й доцільно реалізувати розглянутий технологічний процес.....	16
1.1.1.4 Параметризація схеми технологічного процесу й загальна (на якісному рівні) характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.....	16
1.1.2 Конкретизація регламентів і умов ведення процесу, його формалізоване подання .....	18
1.1.2.1 Виявлення нормативів ведення технологічного процесу і роботи технологічного агрегату .....	18
1.1.2.2 Аналіз наслідків виходу технологічних і експлуатаційних параметрів за регламентні допуски .....	19
1.1.2.3 Виявлення параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та експлуатації технологічного агрегату.....	20
1.1.2.4 Формалізація параметризованої схеми технологічного процесу і одержання його параметричної схеми .....	21
1.1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкта керування.....	22
1.1.3.1 Конкретизація мети і завдань керування об'єктом, виявлення регульованих координат .....	22
1.1.3.2 Вибір керуючих дій об'єкту керування.....	23

1.1.3.3 Виділення та класифікація збурень об'єкта керування.....	23
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 .....	24
1.2.1 Розробка та реалізація математичної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування.....	24
1.2.1.1 Розробка структурної схеми математичної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей 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.....	26
1.2.1.3 Розробка математичної моделі рекуператора та її реалізація в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink .....	27
1.2.1.4 Розробка математичної моделі нагрівача та її реалізація в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink.....	30
1.2.1.5 Розробка математичної моделі каталітичного реактора та її реалізація в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink .....	32
1.2.2 Отримання перехідних та квазістатичних характеристик моделі та обґрунтування її адекватності.....	35
1.2.2.1 Отримання квазістатичних характеристик моделі та обґрунтування її адекватності.....	35
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 .....	43
1.3.1 Формулювання задач керування технологічним агрегатом.....	43
1.3.1.1 Декомпозиція загальної задачі керування технологічним агрегатом і формулювання окремих задач .....	43
1.3.1.2 Обґрунтування необхідності та автоматизації кожної із окремих задач керування .....	43

1.3.2 Формалізація вимог до розв'язання задачі регулювання та вибір принципу побудови системи автоматичного регулювання.....	44
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 .....	44
1.3.2.2 Формалізація інтегральних вимог до перехідних та динамічно сталих процесів регулювання у формі інтегральних критеріїв оптимальності САР...45	45
1.4 Синтез і аналіз системи автоматичного регулювання базової структури.	46
1.4.1 Конкретизація структури САР і алгоритмів регулювання.....	46
1.4.1.1 Розробка на основі обраного загального принципу побудови САР, її базової конкретної структури... ..	46
1.4.1.2 Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання, запис їх рівнянь і передатних функцій.....	47
1.4.1.3 Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання САР при детермінованих та стохастичних вхідних діях .....	48
1.4.2 Параметричний синтез САР з різними варіантами типових алгоритмів регулювання і їх порівняльний аналіз для детермінованих вхідних дій... ..	48
1.4.2.1 Вибір початкових наближень настоюваних параметрів алгоритмів регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР .....	48
1.4.2.2 Параметричний оптимальний синтез САР з альтернативними алгоритмами регулювання для детермінованих (ступінчастих) вхідних діях... ..	49
1.5 Висновки за розділом .....	53
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП КАТАЛІТИЧНОЇ ОЧИСТКИ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ.....	55
2.1 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.....	55

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.....	55
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.....	55
2.1.3	Виведення передаточних функцій коригуючих зв'язків, аналіз їх структури з умов фізичної реалізованості, приведення до фізично реалізуємого виду, представлення у формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідних характеристик.....	57
2.2	Спрощення коригуючих зв'язків з урахуванням особливостей їх технічної реалізації і параметричний синтез САР при детермінованих вхідних діях... ..	59
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.....	59
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 вхідних дій.....	61
2.3	Висновки за розділом.....	65
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....		66

3.1	Обґрунтування актуальності застосування систем управління, побудованих на базі апарата нечіткої логіки для розглянутого об'єкта керування.....	66
3.2.	Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування що характеризується нелінійними статичними характеристиками.....	67
3.3.	Параметричний синтез САК з традиційним (П, ПІ, ПІД) регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання	69
3.4.	Розробка моделі САК з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	71
3.4.1.	Розробка моделі САК з нечітким регулятором (НР) за алгоритмом Сугену 0-го порядку для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	71
3.5.	Порівняльний аналіз функціонування САК з традиційним ПІД регулятором і САК з нечітким регулятором .....	78
3.6.	Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління .....	81
3.7.	Розробка моделі САК з нейрорегулятором .....	82
3.8.	Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором .....	93
3.9.	Аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють, випадкового характеру.....	96
3.10.	Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.....	99
3.11.	Висновки за розділом.....	108
<b>РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА САК ПРОЦЕСОМ КАТАЛІТИЧНОЇ ОЧИСТКИ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ, ЩО РЕАЛІЗУЄ ФУНКЦІЮ МАКСИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРИ ГАРАНТУВАННІ ДОТРИМАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ПО ТЕМПЕРАТУРІ.....</b>		
4.1.	Обґрунтування актуальності додаткової функції гарантування дотримання обмежень температури на виході з реактора САК процесом каталітичної очистки інертних газів для підвищення продуктивності .....	110

4.2. Вибір і опис принципу реалізації функції гарантування дотримання обмежень температури на виході з реактора.....	112
4.3. Розробка структурної схеми САК гарантування дотримання обмежень температури на виході з реактора .....	116
4.4. Розробка схеми імітаційного моделювання САК і плану комп'ютерних експериментів по дослідженню її ефективності, представлення та аналіз результатів моделювання.....	117
4.5. Висновки за розділом.....	123
РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ «КРІОІОН ІНЖИНІРИНГ» РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	124
5.1. Розробка програмно-технічної структури.....	124
5.1.1. Технічна структура.....	124
5.1.2. Реалізація ПЛК на базі BeagleBone Black.....	125
5.2. Розробка, налагодження та тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів системи гарантуючого керування (СГК) процесом каталітичної очистки інертних газів .....	126
5.2.1. Переслідувані цілі та основні положення.....	126
5.2.2. Реалізація «цифрової» моделі СГК процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink, з використанням бібліотеки PLCLib пакета Simulink PLC Coder.....	127
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 .....	131
5.3. Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога .....	135
5.3.1 Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів	135

5.3.2 Розробка програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога .....	137
5.3.3 Тестування розробленого програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога	139
5.3. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	142
5.4. Висновки за розділом.....	149
ВИСНОВОК .....	150
Перелік використаних джерел.....	155
ДОДАТОК А .....	158
ДОДАТОК Б.....	167
ДОДАТОК В.....	171

## 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.

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку світового виробництва характеризується наявністю окремих галузей, в яких використовують високо очищені продукти, зокрема гази високої чистоти.

Інертними газами високої чистоти заповнюють джерела світла при виробництві швидко вдосконалюваної мікропроцесорної техніки. Також висока чистота інертних газів, які заповнюють детекторні прилади, є вимогою при проведенні експериментальних наукових досліджень в сфері фундаментальної фізики, зокрема при проведенні ядерних досліджень. Вимога високої чистоти продукту є характерною також для діагностичного медичного обладнання. Ще вимога високої чистоти продукту висувається у військово-промисловому комплексі при виготовленні зброї та в деяких інших галузях.

Високоякісна очистка інертних газів здійснюється в очисному комплексі, в якому передбачено попередню підготовку продукту в реакторі для видалення зайвих сполук, адсорбцію та ректифікацію.

Для здійснення першого етапу очистки, який є найбільш відповідальним серед інших, використовують каталітичні реактори.

З метою забезпечення високої ефективності функціонування каталітичного реактора в ньому застосовують каталізатори, які мають високу активність та стійкість до високих температур. Використання таких каталізаторів дозволяє знизити кількість енергії, необхідної для здійснення реакції, і забезпечити високу якість продукту.

Каталітичні реактори є важливими компонентами в хімічній та нафтопереробній промисловості, де вони використовуються для прискорення хімічних реакцій та підвищення виходу продукту. При функціонуванні таких реакторів здійснюється активне виділення теплоти. За певних умов збільшення виділення теплоти може призвести до перегріву реактора і, в кінцевому рахунку, до зниження ефективності процесу. Тому технологічним процесом підтримки температурного режиму в каталітичному реакторі необхідно керувати. Причому лише автоматичне керування забезпечить високоточне додержання технологічного регламенту.

# РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС КАТАЛІТИЧНОЇ ОЧИСТКИ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ, 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.

Суть технологічного процесу – це цілеспрямоване перетворення енергетичних потоків у спеціальному технологічному устаткуванні (ТУ) (машинах, апаратах, агрегатах). Суть технологічного процесу каталітичної очистки газових сумішей – це цілеспрямоване перетворення небажаних сполук на більш безпечні і менш токсичні в ході каталітичної реакції.

Схема технологічної системи показана на рисунку 1.1. Вона складається з наступних основних вузлів:

В1 – регулюючий орган подачі газу;

I – рекуперативний теплообмінник;

II – газовий нагрівач;

III – каталітичний реактор.

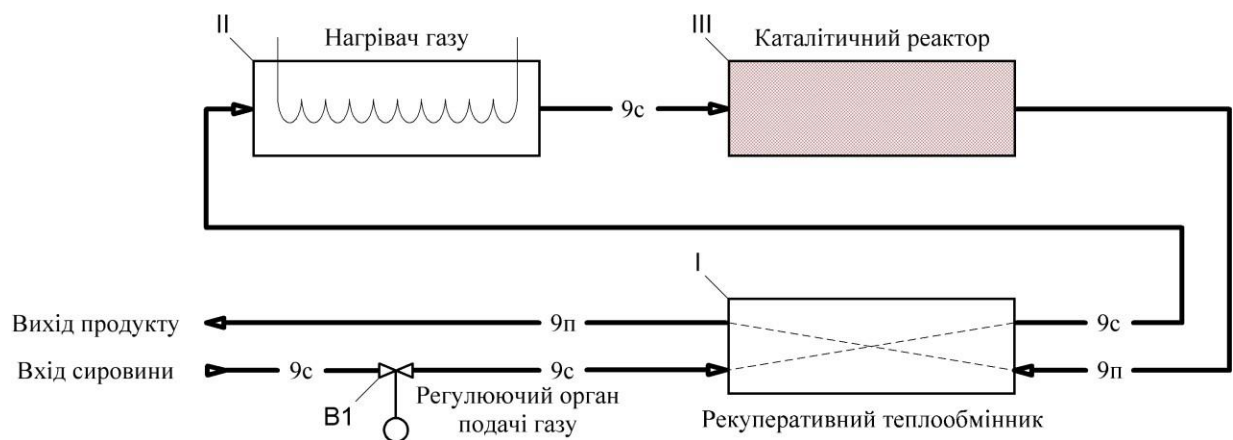


Рисунок 1.1 - Технологічна схема установки

1.1.1.2 Опис конструкції технологічного агрегату та особливостей його експлуатації.

Сировинна газова суміш (криптон, метан) подається через регулюючий орган подачі газу (B1) в рекуперативний теплообмінник (I) в якому підігрівається за рахунок зустрічного потоку продукту після каталітичного реактора (III). Попередньо підігріта сировина догрівається до 420°C в електричному газовому нагрівачі (II) і надходить до каталітичного реактору (III). Сировина проходить через реактор і вуглеводні які містяться в ній вступають з каталізатором в хімічну реакцію (горіння) із виділенням теплоти. Каталізатор складається з оксидів нікелю (NiO), міді (CuO), кальцію (CaO) та алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Вуглеводні перетворюються на більш безпечні сполуки, а саме на вуглекислий газ та водяну пару, які в подальшому легко відділити. Температура на виході з реактора не повинна перевищувати 550°C, тому що при збільшенні температури каталізатор руйнується. Перед початком роботи каталізатор в реакторі необхідно прогріти. Для цього через агрегат подається чистий інертний газ, азот (N<sub>2</sub>) з витратою близькою до 10 м<sup>3</sup>/год. У газовому нагрівачі азот прогрівається до 500°C, готовим до роботи агрегат вважається при досягненні температури на виході із реактора 420°C. Після цього відбувається перехід з чистого інертного газу на робочу сировинну суміш. Штатна зупинка відбувається по закінченню сировини або по наявності вуглеводнів у продукті, що означає відпрацювання каталізатора. Для зупинки потрібно вимкнути нагрів і замість сировини подати чистий інертний газ з малою витратою. Після охолодження реактору зупинити подачу газу. Відпрацьований каталізатор відновлюється шляхом подачі осушеного повітря при температурі 420°C на протязі шести годин, по закінченню цього періоду агрегат готовий до роботи. Аварійна зупинка відбувається при перевищенні температури на виході із реактора (більше 550°C) так само як і штатна.

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

Мета ведення процесу – отримання продукту без вмісту вуглеводнів при максимальній енергетичній ефективності. При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдано тільки тоді, коли технологічний процес має сенс реалізувати, коли виконується цілий ряд вимог до технологічного процесу. Найчастіше зустрічаються такі з них:

- режими роботи технологічного обладнання не повинні виходити за гранично-припустимі;
- шкідливий вплив технологічного процесу на людину та навколишнє середовище не повинен перевищувати нормативних значень;
- порушення режимів ведення технологічного процесу та роботи обладнання, що приводять до аварійних ситуацій, переростання яких в аварію приводить до істотних економічних втрат або навіть до катастрофічних наслідків, повинні бути досить рідкісними подіями та повинні бути передбачені заходи щодо запобігання переростання аварійних ситуацій в аварію.

Технологічний процес каталітичної очистки газових сумішей доцільно реалізовувати, якщо:

- є достатній запас сировини для забезпечення безперервної роботи на протязі декількох днів;
- наявний інертний газ для пуску та зупинки процесу;
- повинна бути електроенергія із середньостатистичними параметрами мережі;
- слід мати тару для зберігання готового продукту.

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

Технологічний процес каталітичної очистки газових сумішей є тепловим процесом, пов'язаним з виділенням тепла. Важливою умовою нормального функціонування технологічного процесу є підтримка оптимальної

температури для стабільної реакції на вході та виході з реактора. Проведемо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на Рис. 1.2.

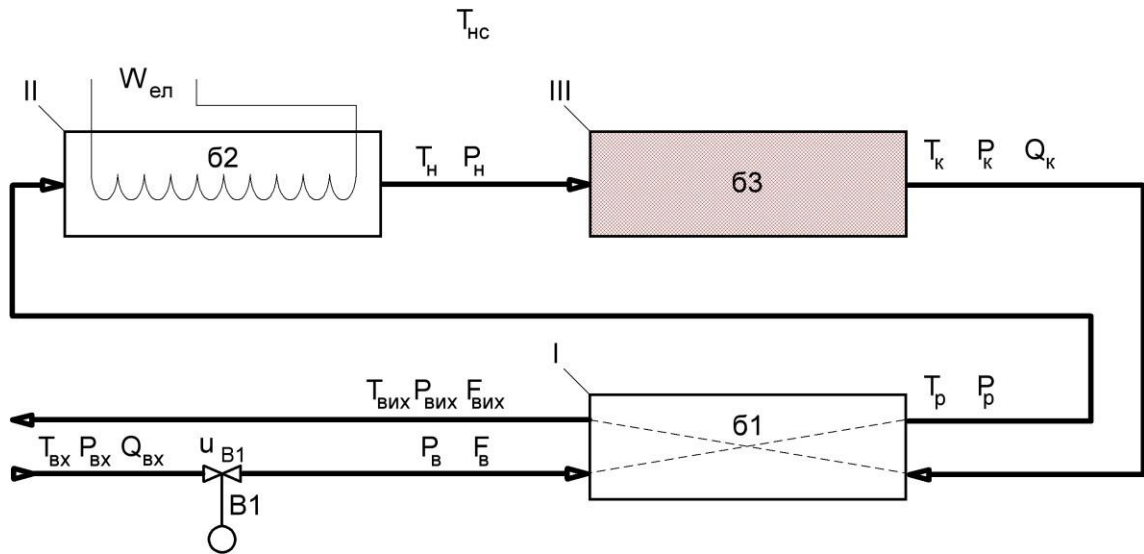


Рисунок 1.2 – Параметризована технологічна схема процесу

Позначення на параметризованій технологічній схемі:

$T_{нс}$  - температура навколишнього середовища [ $^{\circ}C$ ];

$T_{ВХ}$  - температура сировини [ $^{\circ}C$ ];

$P_{ВХ}$  - тиск сировини;

$Q_{ВХ}$  - вміст вуглеводнів в сировині [%];

$P_{В}$  - тиск сировини на вході в рекуператор;

$F_{В}$  - витрати сировини [ $м^3/год$ ];

$T_{P}$  - температура сировини на виході з рекуперативного теплообмінника [ $^{\circ}C$ ];

$P_{P}$  - тиск сировини на виході з рекуперативного теплообмінника;

$T_{H}$  - температура сировини на виході з газового нагрівача [ $^{\circ}C$ ];

$P_{H}$  - тиск сировини на виході з газового нагрівача;

$T_{K}$  - температура продукту на виході з каталітичного реактора [ $^{\circ}C$ ];

$P_{K}$  - тиск продукту на виході з каталітичного реактора;

$Q_{K}$  - вміст вуглеводнів в продукті [%];

$T_{ВИХ}$  - температура продукту на виході з рекуперативного теплообмінника [ $^{\circ}C$ ];

$P_{ВИХ}$  - тиск продукту на виході з рекуперативного теплообмінника;

$F_{\text{вих}}$  - витрати продукту [ $\text{м}^3/\text{год}$ ];

$W_{\text{ел}}$  - потужність живлення нагрівача [Вт];

$u_{\text{В1}}$  - положення регулюючого органу подачі сировини;

$\delta_1$  - конструктивні особливості рекуперативного теплообмінника;

$\delta_2$  - конструктивні особливості газового нагрівача;

$\delta_3$  - конструктивні особливості каталітичного реактора.

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 технологічного процесу каталітичної очистки газових сумішей такими параметрами є:

$T_{\text{н}}$  - температура сировини на виході з газового нагрівача;

$T_{\text{к}}$  - температура продукту на виході з каталітичного реактора;

$F_{\text{в}}$  - витрати сировини.

*Експлуатаційний регламент* – визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів технологічного обладнання. Для технологічного процесу каталітичної очистки газових сумішей такими параметрами є:

$P_{\text{в}}$  - тиск сировини на виході з редуктора;

$P_{\text{н}}$  - тиск сировини на виході з газового нагрівача;

$P_{\text{к}}$  - тиск продукту на виході з каталітичного реактора.

*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. До цієї групи параметрів можна віднести:

$T_p$  - температура сировини на виході з рекуперативного теплообмінника;

$P_p$  - тиск сировини на виході з рекуперативного теплообмінника;

$T_{\text{вих}}$  - температура продукту на виході з рекуперативного теплообмінника;

$P_{\text{вих}}$  - тиск продукту на виході з рекуперативного теплообмінника;

$F_{\text{вих}}$  - витрати продукту;

$Q_k$  - вміст вуглеводнів в продукті.

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

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

Відхилення в більшу сторону концентрації вуглеводнів в сировині може призвести до перегріву каталізатора і як наслідок його руйнування. В цьому випадку порушення регламенту веде до виходу браку.

Відхилення в більшу сторону масової витрати сировини може призвести до її недогріву в газовому нагрівачі або якщо нагрів здійснився до збільшення температури реакції в реакторі і як наслідок його руйнування. В обох випадках порушення регламенту веде до погіршення якості готового продукту і навіть до збільшення виходу браку.

Відхилення температури у реакторі нижче гранично допустимих значень може призвести до зупинки каталітичної реакції, а перевищення температури верхнього гранично припустимого значення може призвести до руйнування каталізатора. В обох випадках порушення регламенту веде до погіршення якості готового продукту і навіть до збільшення виходу браку.

Допуски на відхилення поточних (режимних) значень регламентованих параметрів від номінальних прийнято розділяти і задавати у вигляді допусків на тривалі та короточасні відхилення. Аналіз нормативів ведення

технологічного процесу та експлуатації обладнання оформимо у вигляді таблиці регламентів 1.1.

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру або ф-ція зміни номінального значення	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі ( $t \rightarrow \infty$ )	Короткочасні ( $0 < t << \infty$ )	
					величина	величина
1	2	3	4	5	6	7
Температура на виході з газового нагрівача	$T_H$	$^{\circ}\text{C}$	420	$5 \pm$	$10 \pm$	300
Температура на виході з реактора	$T_K$	$^{\circ}\text{C}$	530	$10 \pm$	$20 \pm$	300

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 і можуть бути (для зручності) згруповані за деякими ознаками.

*Сировинні параметри* характеризують властивості продукту, що йде на переробку. До цієї групи параметрів віднесемо:

$T_{\text{вх}}$  - температура сировини на вході в редуктор [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$P_{\text{вх}}$  - тиск сировини на вході в редуктор;

$Q_{\text{вх}}$  - вміст вуглеводнів в сировині.

*Енергетичні параметри* характеризують енергію, що підводить до технологічного встаткування ззовні й витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів віднесемо:

$W_{\text{ел}}$  - потужність живлення нагрівача [Вт].

*Механічні (або інші специфічні) параметри* технологічного обладнання характеризують стан її робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо:

$u_{В1}$  - положення регулюючого органу подачі сировини;

$\delta_1$  - конструктивні особливості рекуперативного теплообмінника;

$\delta_2$  - конструктивні особливості газового нагрівача;

$\delta_3$  - конструктивні особливості каталітичного реактора;

$T_{нс}$  - температура навколишнього середовища.

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.

Параметрична схема процесу наведена на Рис. 1.3.

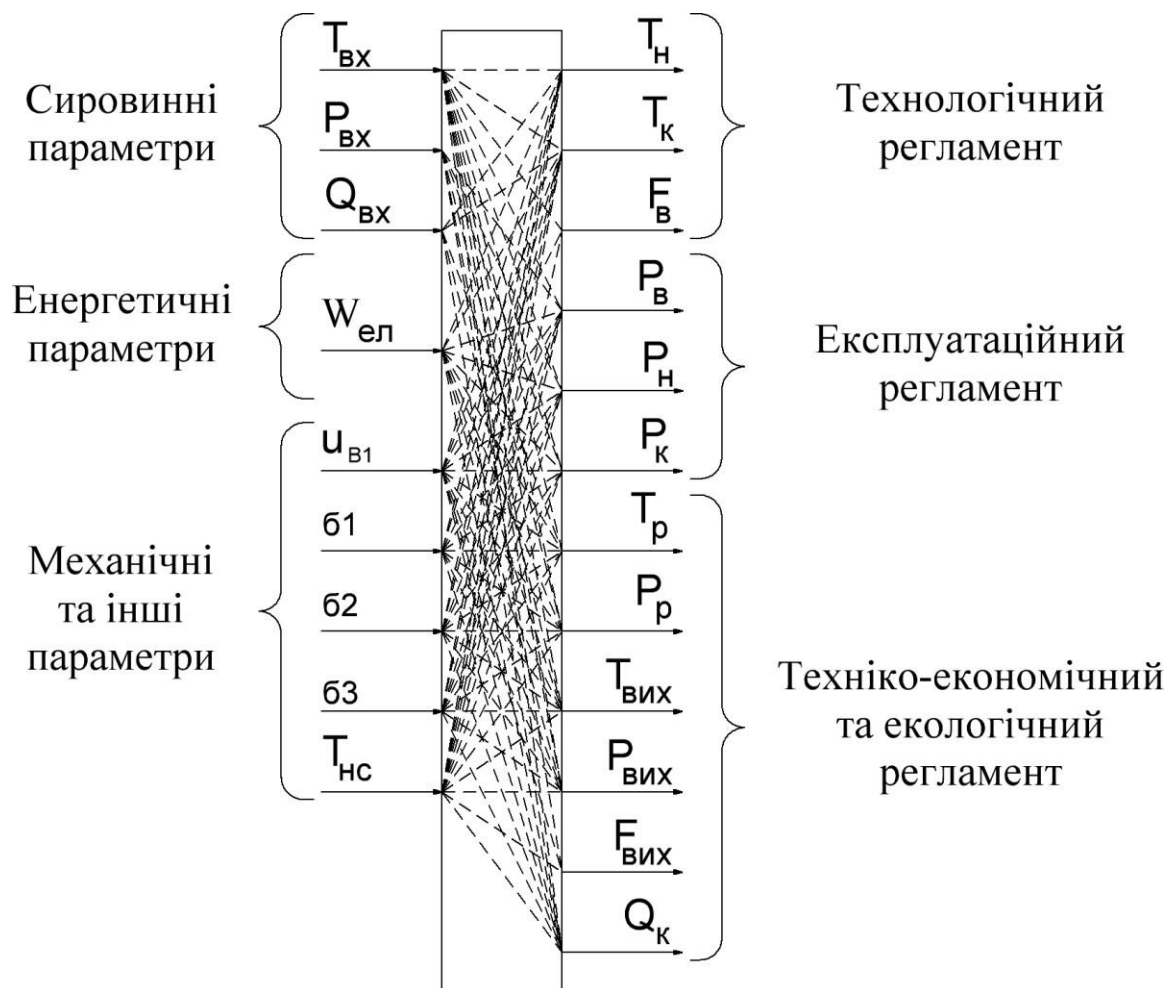


Рисунок 1.3 - Параметрична схема процесу

### 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 каталітичної очистки газових сумішей у якості регульованих координат доцільно обрати: температури на вході  $T_n$  та виході  $T_k$  з реактора.

### 1.1.3.2 Вибір керуючих дій об'єкту керування.

Необхідною умовою вирішення задач керування є наявність керуючих дій, що повинні бути входними змінними (координатами) ОК. Для задач регулювання, такими керуючими 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 каталітичної очистки газових сумішей до керуючих дій доцільно віднести електричну потужність нагрівача газу ( $W_{ел}$ ) та витрати сировини ( $F_b$ ).

### 1.1.3.3 Виділення та класифікація збурень об'єкта керування.

Після того, як визначені керуючі 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 каталітичної очистки газових сумішей до контрольованих збурень доцільно віднести  $T_{вх}$  – температура сировини на вході  $Q_{вх}$  – вміст вуглеводнів в сировини, всі інші входні дії, крім керуючих дій і контрольованого збурення  $f$ , віднесемо до неконтрольованих збурень.

Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до керуючих дій, а стохастичну складову – до регульованої координати.

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

Структурна схема ОК є черговим і останнім етапом формалізації подання технологічного процесу як ОК.

Структурна схема ОК, по суті, є найбільш загальною (концептуальною) моделлю технологічного процесу як ОК.

Структурна схема процесу каталітичної очистки газових сумішей наведена на рис. 1.4.

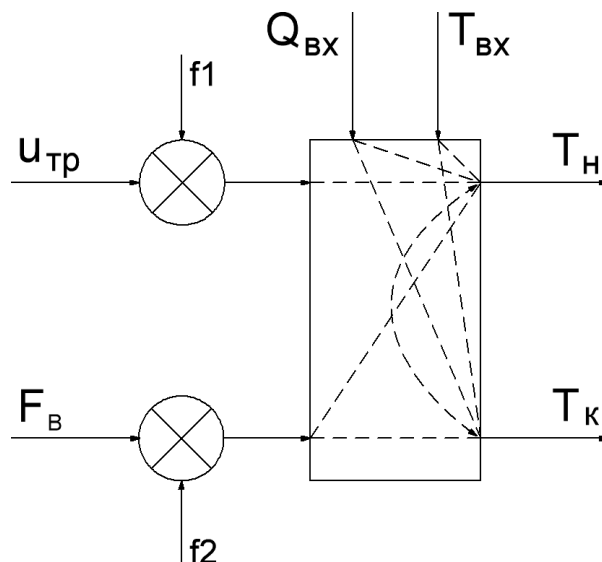


Рисунок 1.4 - Структурна схема процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту регулювання

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 каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування.

1.2.1.1 Розробка структурної схеми математичної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування.

Розробка ефективних САК не можлива без наявності імітаційної математичної моделі процесу як об'єкту керування (ОК). Провівши аналіз технологічного процесу та обладнання в якому він проходить, виділено три основні складові математичної моделі, а саме: модель нагрівача, модель реактора та модель рекуператора. В свою чергу для коректного опису процесів що протікають під час роботи агрегату кожену модель можна розділити на менші моделі: теплових втрат у навколишнє середовище, прогріву/охолодження газу, тепловиділення при горінні метану, прогріву каталізатора, теплопередачі через стінку. Відповідно до вище зазначеного складено структурну схему математичної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей як ОК, що зображена на рисунку 1.5.

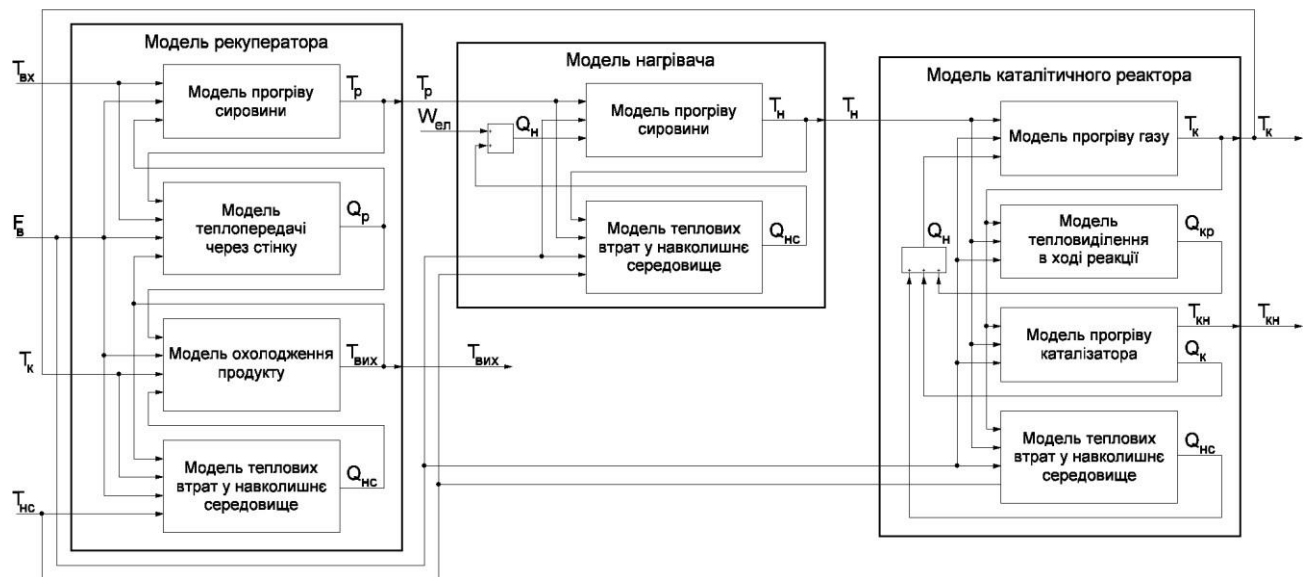


Рисунок 1.5 - Структурна схема математичної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей як ОК

$T_{нс}$  - температура навколишнього середовища [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_{вх}$  - температура сировини [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$F_{в}$  - витрати сировинної газової суміші [ $\text{м}^3/\text{год}$ ];

$T_p$  - температура сировини на виході з рекуперативного теплообмінника [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_n$  - температура сировини на виході з газового нагрівача [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_k$  - температура продукту на виході з каталітичного реактора [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_{\text{вих}}$  - температура продукту на виході з рекуперативного теплообмінника [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_{\text{кн}}$  - температура каталітичного наповнювача [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$Q_{\text{нс}}$  - тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище [Вт];

$Q_p$  - тепловий потік, що передається від продукту до сировини через стінку [Вт];

$W_{\text{ел}}$  - тепловий потік, що виробляється електричним нагрівачем [Вт];

$Q_n$  - тепловий потік, що нагріває газ [Вт];

$Q_{\text{кр}}$  - тепловий потік, що виділяється в ході каталітичної реакції [Вт];

$Q_k$  - тепловий потік, що витрачається на нагрів каталітичного наповнювача [Вт].

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

1) Теплоємність.

Кількість теплоти, необхідна для нагрівання будь-якого тіла на один градус ( $Q$ , Дж) називається теплоємністю тіла і знаходиться за формулою:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

де:  $c$  - питома теплоємність [Дж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$ ],  $m$  — маса речовини [кг],  $\Delta T$  — різниця кінцевої і початкової температур речовини [ $^{\circ}\text{C}$ ].

2) Теплота реакції.

Кількість теплоти, що виділяється при реакції довільної маси палива ( $Q$ , Дж), визначається за формулою:

$$Q = q \cdot m \quad (1.2)$$

де:  $q$  - питома теплота реакції [Дж/кг],  $m$  — маса речовини [кг].

3) Теплопередача через стінку.

Теплопередача - це складний вид теплообміну, коли тепловий потік передається між середовищами через стінку, що розділяє їх.

У цьому випадку гарячий продукт конвективно віддає своє тепло стінці, яке проходить через неї (теплопровідність) і досягає холодної сировини, де з поверхні конвективно “знімається” тепло.

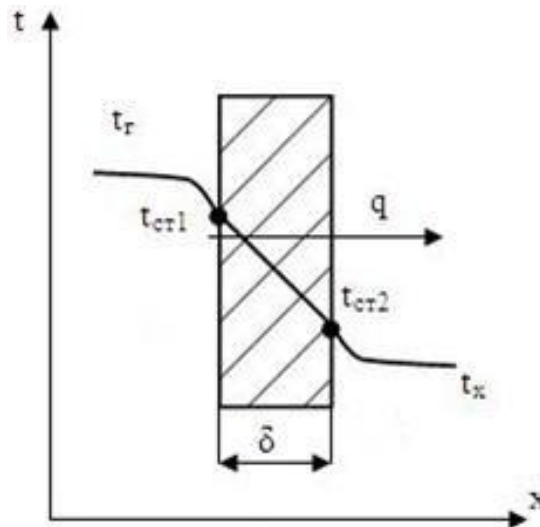


Рисунок 1.6 - Характер зміни температур в середовищах та стінках

Кількість теплоти при теплопередачі через плоску стінку ( $Q$ , Дж), визначається за формулою:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \quad (1.3)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1.4)$$

де:  $k$  – коефіцієнт теплопередачі [ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ];  $F$  – площа стінки [ $\text{м}^2$ ];  $\Delta t = t_r - t_x$  – температурний напір [ $^\circ\text{C}$ ];  $t_1$  і  $t_2$  – температура гарячого і холодного середовищ відповідно [ $^\circ\text{C}$ ];  $t_{cr1}$  і  $t_{cr2}$  – температура гарячої і холодної сторін стінки відповідно [ $^\circ\text{C}$ ];  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі в залежності від швидкості руху середовища відносно стінки [ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ];  $d_c$  – товщина стінки [ $\text{м}$ ];  $\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності стінки [ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ].

1.2.1.3 Розробка математичної моделі рекуператора та її реалізація в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink.

Для математичного опису рекуператора скористаємося наступними фізичними залежностями: теплоємність (1) та теплопередача через стінку (3).

Дана модель включає в себе моделі прогріву сировини, теплопередачі через стінку, охолодження продукту та теплових втрат у навколишнє середовище. Нижче наведено рівняння теплового балансу у рекуператорі,

$$Q_H = Q_p \quad (1.5)$$

$$Q_o = Q_{nc} + Q_p \quad (1.6)$$

де:  $Q_H$  – тепловий потік, що нагріває сировину [Вт];  $Q_o$  – тепловий потік, що охолоджує продукт [Вт];  $Q_p$  – тепловий потік, що передається від продукту до сировини через стінку [Вт];  $Q_{nc}$  – тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище [Вт].

Тепловий потік, що передається від продукту до сировини через стінку, опишемо наступними рівняннями:

$$Q_p = k_p \cdot F_p \cdot \Delta t - \left( \frac{(\frac{t_{cрп} + t_{cрc}}{2} - t_{cрт}) \cdot F}{\frac{d_p}{\lambda_p}} - k_p \cdot F_p \cdot \Delta t \right) \quad (1.7)$$

$$t_{cрт} = \int \frac{\frac{(\frac{t_{cрп} + t_{cрc}}{2} - t_{cрт1}) \cdot F}{\frac{d_p}{\lambda_p}} - k_p \cdot F_p \cdot \Delta t}{c_{тр} \cdot m_{тр}} dt + t_{nc} \quad (1.8)$$

де:  $t_{cрп}$  і  $t_{cрc}$  – середня температура готового продукту та сировини відповідно [°C];  $\Delta t = t_{cрп} - t_{cрc}$  – температурний напір [°C];  $F_p$  – площа стінки теплообмінника рекуператора [м<sup>2</sup>];  $k_p$  – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності стінки теплообмінника рекуператора [Вт/(м<sup>2</sup>·°C)];  $c_{тр}$  – питома теплоємність матеріалу стінки теплообмінника рекуператора [Дж/(кг·°C)];  $m_{тр}$  – маса стінки [кг];  $t_{cрт}$  – температура середини теплообмінника рекуператора [°C];  $t_{cрт1}$  – температура середини теплообмінника рекуператора на крок раніше [°C];  $d_p$  – товщина стінки теплообмінника рекуператора [м];  $\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності стінки теплообмінника рекуператора [Вт/(м·°C)].

Тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище  $Q_{nc}$ , опишемо наступним рівнянням:

$$Q_{nc} = \frac{((\int \frac{(t_{cr} - t_c) \cdot \alpha_{ch} \cdot F_c - Q_{nc1}}{m_c \cdot c_c} dt + t_{cn}) - t_{nc}) \cdot F_c}{\frac{d_T}{\lambda_T}} \quad (1.9)$$

де:  $Q_{\text{нсл}}$  – тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище на крок раніше [Вт];  $t_{\text{сг}}$  – середня температура готового продукту [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $t_{\text{с}}$  – температура внутрішньої стінки корпусу [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $t_{\text{сп}}$  – початкова температура внутрішньої стінки корпусу [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $\alpha_{\text{сн}}$  - коефіцієнт тепловіддачі від потоку готового продукту до стінки корпусу [ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $F_{\text{с}}$  – площа стінки корпусу [ $\text{м}^2$ ];  $c_{\text{с}}$  – питома теплоємність матеріалу стінки корпусу [ $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $m_{\text{с}}$  - маса стінки корпусу [кг];  $t_{\text{нс}}$  – температура навколишнього середовища [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $d_{\text{т}}$  – товщина теплоізолюючого шару стінки корпусу [м];  $\lambda_{\text{т}}$  – коефіцієнт теплопровідності теплоізолюючого шару стінки корпусу [ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ].

Зміну температури сировини на виході з рекуператора  $t_{\text{р}}$  та температури готового продукту на виході з рекуператора  $t_{\text{вих}}$  опишемо наступними рівняннями:

$$t_{\text{р}} = t_{\text{вих}} + \int \frac{(Q_{\text{п}} - c_{\text{с}} \cdot G_{\text{с}} \cdot \Delta t_{\text{с}})}{c_{\text{с}} \cdot G_{\text{с}}} dt \quad (1.10)$$

$$t_{\text{вих}} = t_{\text{к}} - \int \frac{(Q_{\text{о}} - c_{\text{п}} \cdot G_{\text{п}} \cdot \Delta t_{\text{п}})}{c_{\text{п}} \cdot G_{\text{п}}} dt \quad (1.11)$$

де:  $t_{\text{вих}}$  – температура сировини на вході в рекуператор [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $c_{\text{с}}$  – питома теплоємність сировини [ $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $G_{\text{с}}$  – масова витрата сировини [кг/с];  $\Delta t_{\text{с}}$  - різниця температури сировини до і після рекуператора [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $t_{\text{к}}$  – температура готового продукту на виході з каталітичного реактора [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $c_{\text{п}}$  – питома теплоємність готового продукту [ $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $G_{\text{с}}$  – масова витрата готового продукту [кг/с];  $\Delta t_{\text{п}}$  – різниця температури готового продукту до і після рекуператора [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Реалізація імітаційної моделі рекуператора в середовищі Matlab Simulink представлена на рисунку 1.7.

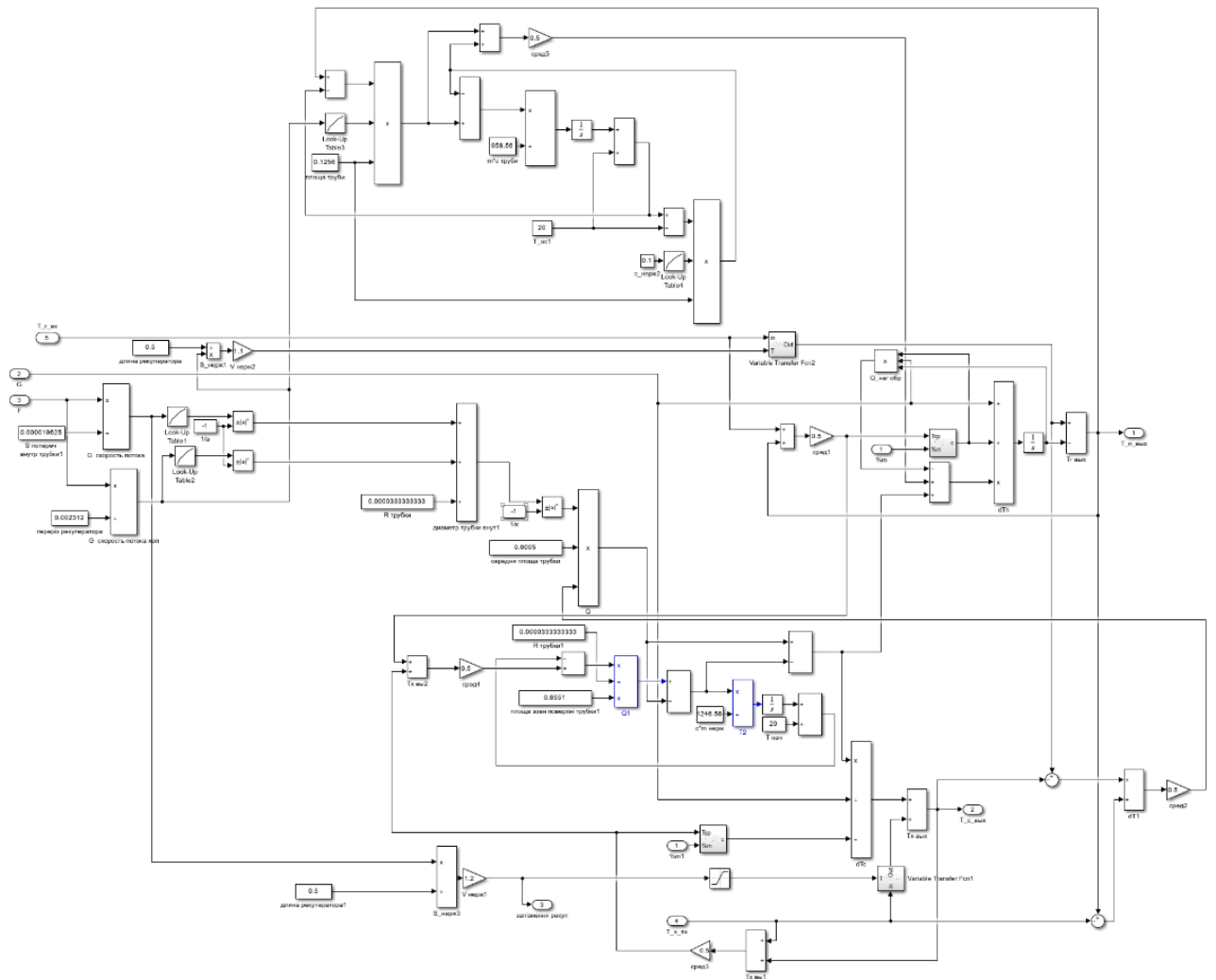


Рисунок 1.7 - Реалізація моделі рекуператора в середовищі Matlab Simulink

1.2.1.4 Розробка математичної моделі нагрівача та її реалізація в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink.

Для математичного опису нагрівача скористаємося наступними фізичними залежностями: теплоємність (1) та теплопередача через стінку (3).

Дана модель включає в себе моделі прогріву сировини та теплових втрат у навколишнє середовище. Нижче наведено рівняння теплового балансу у нагрівачі,

$$Q_H = Q_{HC} + W_{ел} \quad (1.12)$$

де:  $Q_H$  – тепловий потік, що нагріває сировину [Вт];  $Q_{HC}$  – тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище [Вт];  $W_{ел}$  – тепловий потік, що виробляється електричним нагрівачем [Вт].

Тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище  $Q_{nc}$ , опишемо наступним рівнянням:

$$Q_{nc} = \frac{\left( \int \frac{(t_{cr} - t_c) \cdot \alpha_{ch} \cdot F_c - Q_{nc1}}{m_c \cdot c_c} dt + t_{cp} - t_{nc} \right) \cdot F_c}{\frac{d_T}{\lambda_T}} \quad (1.13)$$

де:  $Q_{nc1}$  – тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище на крок раніше [Вт];  $t_{cr}$  – середня температура сировини [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $t_c$  – температура внутрішньої стінки корпусу [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $t_{cp}$  – початкова температура внутрішньої стінки корпусу [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $\alpha_{ch}$  – коефіцієнт тепловіддачі від потоку сировини до стінки корпусу [ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $F_c$  – площа стінки корпусу [ $\text{м}^2$ ];  $c_c$  – питома теплоємність матеріалу стінки корпусу [ $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $m_c$  – маса стінки корпусу [кг];  $t_{nc}$  – температура навколишнього середовища [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $d_T$  – товщина теплоізолюючого шару стінки корпусу [м];  $\lambda_T$  – коефіцієнт теплопровідності теплоізолюючого шару стінки корпусу [ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ].

Зміну температури сировини на виході з нагрівача  $t_n$  опишемо наступним рівнянням:

$$t_n = t_p + \int \frac{(Q_n - c_c \cdot G_c \cdot \Delta t_c)}{c_c \cdot G_c} dt \quad (1.14)$$

де:  $t_p$  – температура сировини на виході з рекуперативного теплообмінника [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $c_c$  – питома теплоємність сировини [ $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];  $G_c$  – масова витрата сировини [кг/с];  $\Delta t_c$  – різниця температури сировини до і після нагрівача [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Реалізація імітаційної моделі нагрівача в середовищі Matlab Simulink представлено на рисунку 1.8.

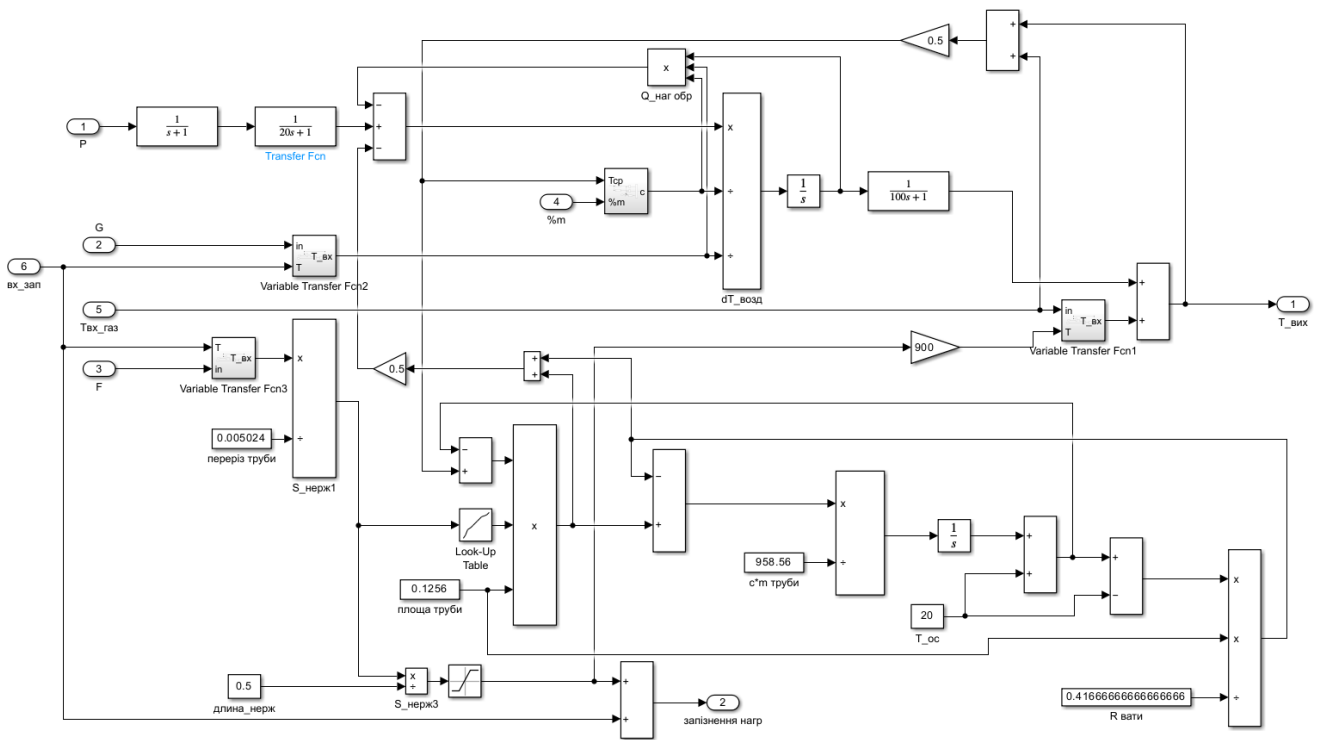


Рисунок 1.8 - Реалізація моделі нагрівача в середовищі Matlab Simulink

1.2.1.5 Розробка математичної моделі каталітичного реактора та її реалізація в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink.

Для математичного опису каталітичного реактора скористаємося наступними фізичними залежностями: теплоємність (1), теплота згоряння (2) та теплопередача через стінку (3).

Дана модель включає в себе моделі прогріву газу, тепловиділення в ході реакції, прогріву каталізатора та теплових втрат у навколишнє середовище. Нижче наведено рівняння теплового балансу у реакторі,

$$Q_H = Q_{кр} - Q_K - Q_{нс} \quad (1.15)$$

де:  $Q_H$  – тепловий потік, що нагріває сировину [Вт];  $Q_{кр}$  – тепловий потік, що виділяється в ході каталітичної реакції [Вт];  $Q_K$  – тепловий потік, що витрачається на нагрів каталітичного наповнювача [Вт];  $Q_{нс}$  – тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище [Вт].

Тепловий потік, що виділяється в ході каталітичної реакції  $Q_{кр}$ , опишемо наступним рівнянням,

$$Q_{кр} = \frac{q_B \cdot F_B \cdot Q_B}{100} \quad (1.16)$$

де:  $q_v$  – питома теплота згоряння вуглеводнів сировини [Вт/м<sup>3</sup>];  $F_v$  – витрати сировини [м<sup>3</sup>/год];  $Q_v$  – вміст вуглеводнів у сировині [%].

Важливо зауважити, що каталітична реакція починає протікати після досягнення температури каталітичного наповнювача 420°С.

Тепловий потік, що витрачається на нагрів каталізатора  $Q_k$ , опишемо наступним рівнянням,

$$Q_k = \frac{(t_{\text{п}} - t_{\text{нк}}) \cdot F_k}{\frac{d_k}{\lambda_k}} \quad (1.17)$$

Зміну температури поверхні  $t_{\text{п}}$  та центру  $t_{\text{нк}}$  каталітичного наповнювача опишемо наступними рівняннями:

$$t_{\text{п}} = \int \frac{(t_{\text{сг}} - t_{\text{п1}}) \cdot \alpha_k \cdot F_k - Q_k}{m_{\text{пк}} \cdot c_k} dt + t_{\text{пп}} \quad (1.18)$$

$$t_{\text{нк}} = \int \frac{Q_k}{m_k \cdot c_k} dt + t_{\text{нкп}} \quad (1.19)$$

де:  $t_{\text{сг}}$  – середня температура газу [°С];  $t_{\text{п1}}$  – температура поверхні каталітичного наповнювача на крок раніше [°С];  $t_{\text{пп}}$  – початкова температура поверхні каталітичного наповнювача [°С];  $t_{\text{нкп}}$  – початкова температура центру каталітичного наповнювача [°С];  $\alpha_k$  – коефіцієнт тепловіддачі від потоку газу до поверхні каталітичного наповнювача [Вт/(м<sup>2</sup>·°С)];  $F_k$  – площа поверхні каталітичного наповнювача [м<sup>2</sup>];  $c_k$  – питома теплоємність каталітичного наповнювача [Дж/(кг·°С)];  $m_{\text{пк}}$  – маса поверхні каталітичного наповнювача [кг];  $m_k$  – маса каталітичного наповнювача [кг];  $d_k$  – товщина каталітичного наповнювача [м];  $\lambda_k$  – коефіцієнт теплопровідності каталітичного наповнювача [Вт/(м·°С)].

Тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище  $Q_{\text{нс}}$ , опишемо наступним рівнянням,

$$Q_{\text{нс}} = \frac{((\int \frac{(t_{\text{сг}} - t_{\text{с}}) \cdot \alpha_{\text{ст}} \cdot F_{\text{с}} - Q_{\text{нс1}}}{m_{\text{с}} \cdot c_{\text{с}}} dt + t_{\text{сп}}) - t_{\text{нс}}) \cdot F_{\text{с}}}{\frac{d_{\text{т}}}{\lambda_{\text{т}}}} \quad (1.20)$$

де:  $Q_{\text{нс1}}$  – тепловий потік, що витрачається у навколишнє середовище на крок раніше [Вт];  $t_{\text{сг}}$  – середня температура газу [°С];  $t_{\text{с}}$  – температура внутрішньої стінки корпусу [°С];  $t_{\text{сп}}$  – початкова температура внутрішньої стінки корпусу



Реалізація повної імітаційної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування в середовищі Matlab Simulink представлено на рисунку 1.10.

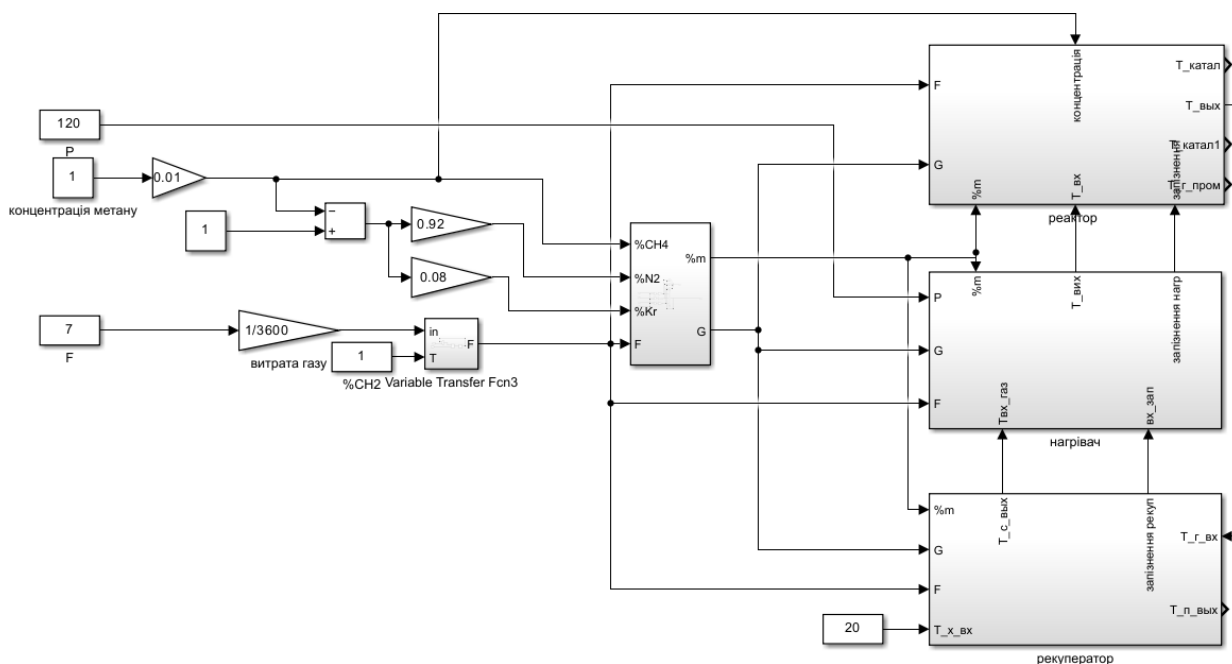


Рисунок 1.10 - Реалізація повної імітаційної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування в середовищі Matlab Simulink

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 обраними режимами для нагрівача, рекуператора та каталітичного реактора, робота яких включає каталітичні реакції з виділенням великої кількості тепла та зміною фізичних властивостей газів, дискретизація статичних характеристик може не дозволити виявити точки зміни 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 процесу каталітичної очистки газових сумішей як ОК, були організовані експерименти, які можна розглядати як отримання квазістатичних характеристик. Їх суть складається в почерговій зміні з постійною, заздалегідь вибраною швидкістю значення керуючих впливів (потужність живлення електричного нагрівача та витрата сировини) і реєстрації зміни при цьому температур в контрольних точках об'єкту ( $T_n$  – температури сировини на виході з газового нагрівача,  $T_k$  – температури продукту на виході з каталітичного реактора).

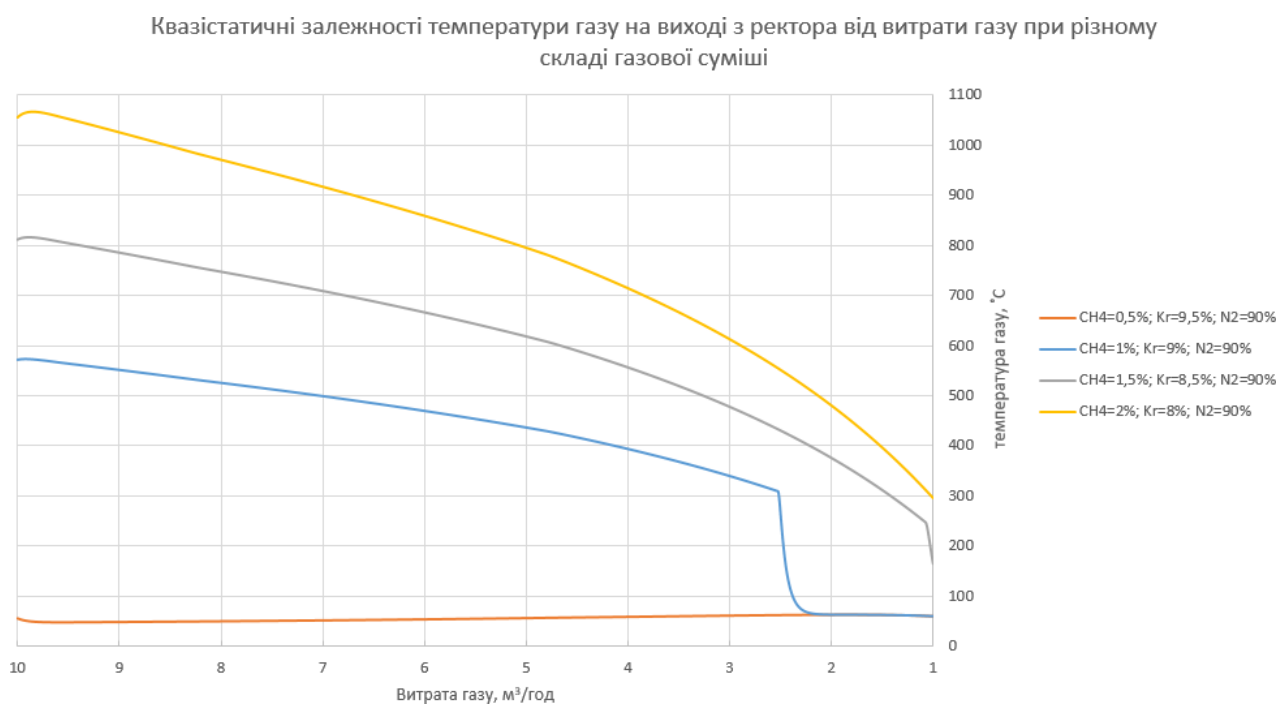


Рисунок 1.11 - Квазістатичні залежності температури готового продукту на виході з реактора від витрати сировини при різному складі сировини

На рисунку 1.11 представлені квазістатичні залежності температури газу на виході з реактора від витрати сировини при різному складі сировини (концентрації вуглеводнів у сировині 0,5 - 2 %). Характер цих залежностей свідчить про те, що зміна витрати сировини впливає на температуру готового продукту на виході з реактора. При зменшенні витрат сировини або концентрації вуглеводнів у сировині зменшується маса вуглеводнів які

вступають у каталітичну реакцію. Це зумовлює зменшення кількості теплоти від згоряння вуглеводнів, що в свою чергу призводить до зменшення температури каталітичного наповнювача та температури готового продукту на виході з реактора. Якщо кількість вуглеводнів сягає нижнього критичного рівня, каталітична реакція припиняється. Також варто зазначити, що через зміну температури газу та швидкості його руху, змінюється тепловий потік конвективного теплообміну. Це зумовлює певну нелінійність зміни температури на виході з реактора.

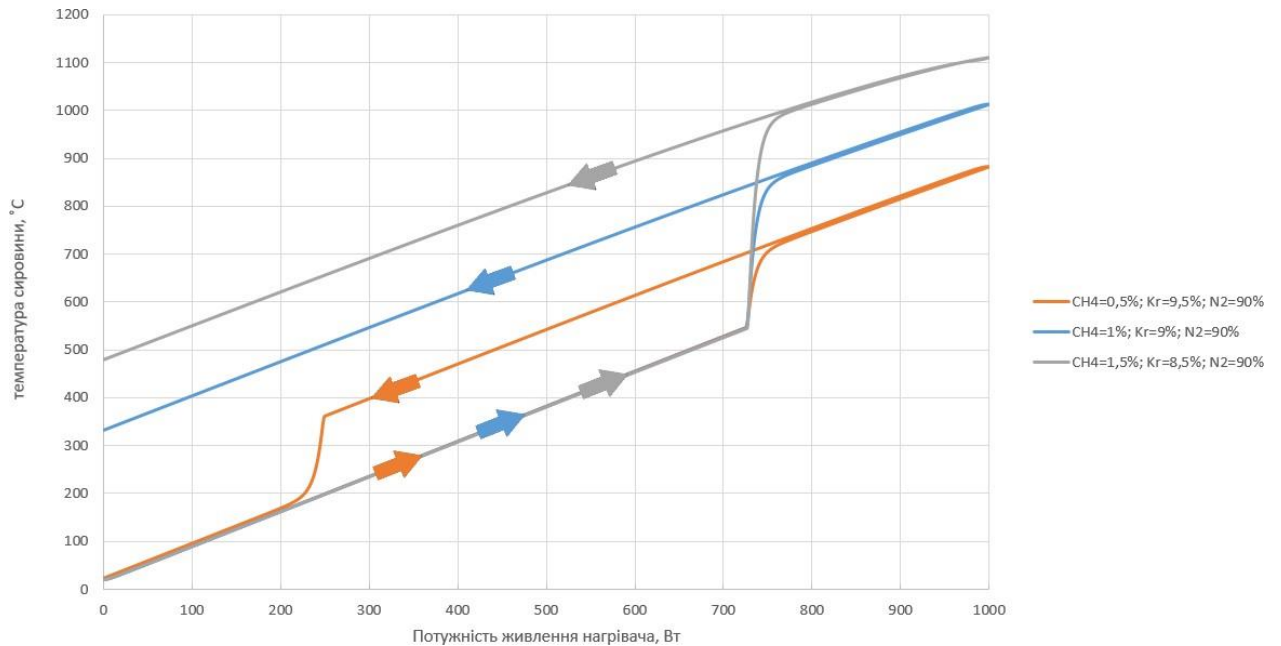


Рисунок 1.12 - Квазістатичні залежності температури сировини на вході у реактор від потужності нагрівача при різному складі сировини

На рисунку 1.12 представлені квазістатичні залежності температури газу на вході у реактор від витрати сировини при різному складі сировини (концентрації вуглеводнів у сировині 0,5 - 2 %). Характер цих залежностей свідчить про те, що температура сировини на вході у реактор пропорційно збільшується від потужності нагрівача відносно температури сировини на вході у нагрівач. На температуру сировини перед нагрівачем впливає температура на виході з реактора, що нагріває сировину у рекуператорі. При 700 Вт температура сировини на вході у реактор досягла 550°C. Подальше стрімке збільшення температури свідчить про розігрів реактора до необхідної

для початку каталітичної реакції температури. В свою чергу при зменшенні потужності нагрівача в момент коли температура на вході у реактор сягає нижнього критичного рівня, каталітична реакція припиняється.

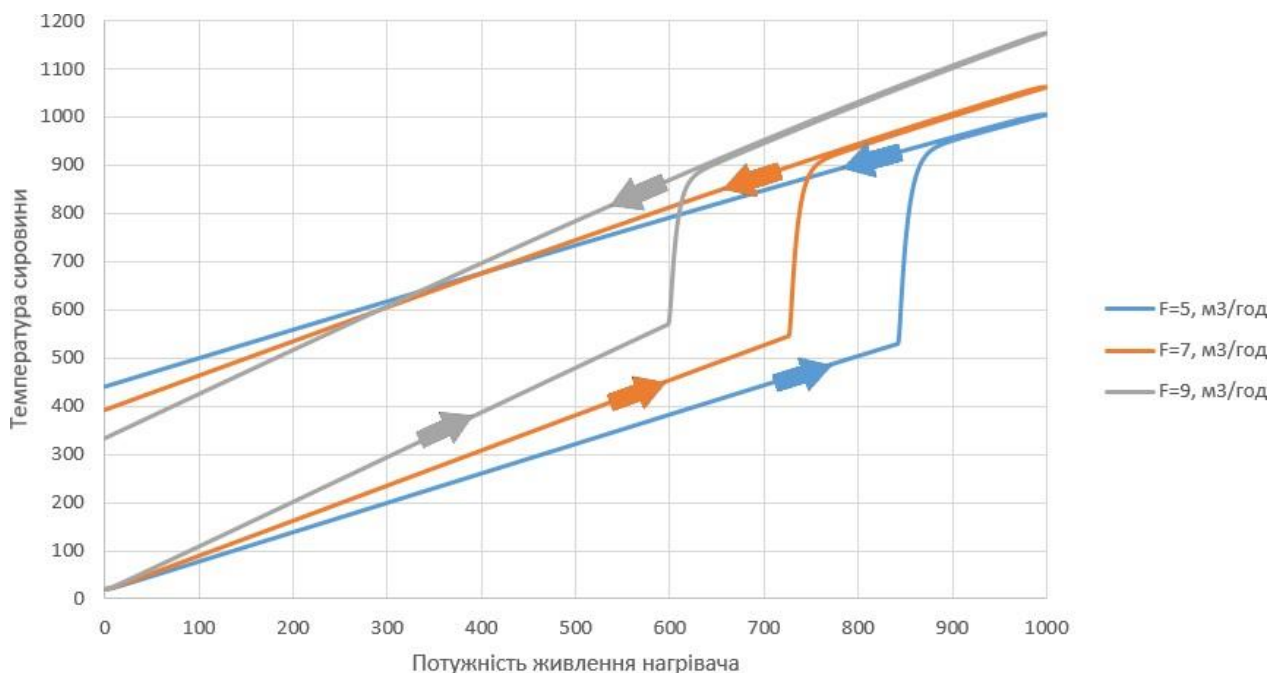


Рисунок 1.13 - Квазістатичні залежності температури газу на вході у реактор від потужності нагрівача при різних витратах газу

На рисунку 1.13 представлені квазістатичні залежності температури газу на вході у реактор від витрати сировини при різних витратах газу (5 - 9 м³/год). Характер цих залежностей свідчить про те, що температура сировини на вході у реактор пропорційно збільшується від потужності нагрівача відносно температури сировини на вході у нагрівач. На температуру сировини перед нагрівачем впливає температура на виході з реактора, що нагріває сировину у рекуператорі. При досягненні температури 550°C у реакторі розпочинається каталітична реакція, що призводить до стрімкого збільшення температури. В свою чергу при зменшенні потужності нагрівача в момент коли температура на вході у реактор сягає нижнього критичного рівня, каталітична реакція припиняється. Також варто зазначити, що через зміну температури газу та швидкості його руху, змінюється тепловий потік конвективного теплообміну. Це зумовлює певну нелінійність зміни температури на виході з реактора.

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

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого порядку за каналом  $F_B - T_K$ .

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК ( $K_0$ ), сталу часу ( $T_0$ ) і час запізнення ( $\tau_0$ ).

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta T_K}{\Delta F_g} = \frac{445,8 - 478,9}{50 - 40} = 3,31 \text{ } ^\circ\text{C} / \%x.p.o. \quad (1.22)$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення для моделі 1-го порядку доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$T_{H\ 1,0} = 478,9 - 445,8 = 33,1^\circ\text{C};$$

$$T_{H\ 0,33} = 0,33 \cdot 33,1 + 445,8 = 456,7^\circ\text{C};$$

$$T_{H\ 0,7} = 0,7 \cdot 33,1 + 445,8 = 468,9^\circ\text{C};$$

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

$$t_{0,33} = 611\text{c};$$

$$t_{0,7} = 1213\text{c}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 310\text{c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = 752,5\text{c}$$

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

$$W_0(p) = \frac{3,31 \cdot e^{-310p}}{752,5p + 1} \quad (1.23)$$

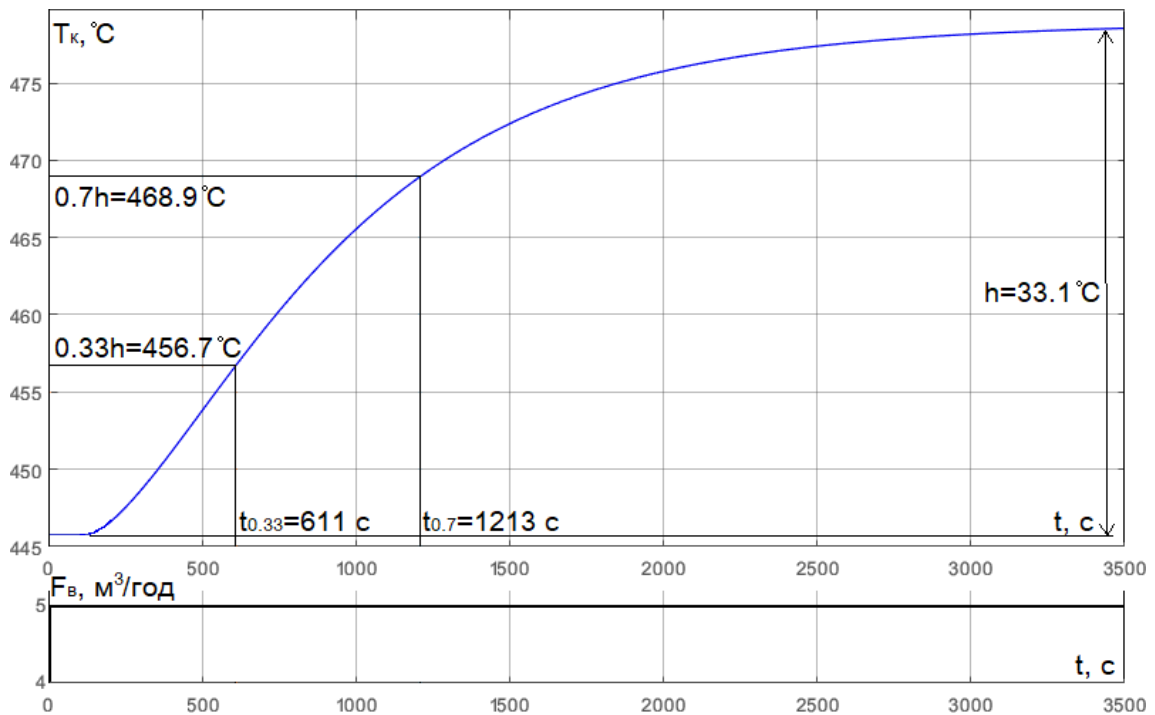


Рисунок 1.14 - Перехідна характеристика каналу  $F_{\text{в}} - T_{\text{к}}$  та проведення параметричної ідентифікації її моделі першого порядку

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого порядку за каналом  $F_{\text{в}} - T_{\text{н}}$ .

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК ( $K_0$ ), сталу часу ( $T_0$ ) і час запізнення ( $\tau_0$ ).

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta T_{\text{н}}}{\Delta F_{\text{в}}} = \frac{376,2 - 370,6}{40 - 50} = -0,56 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{ x.p.o.} \quad (1.24)$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення для моделі 1-го порядку доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$\Delta T_{\text{н}} = 376,2 - 370,6 = 5,6^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{н} 0,33} = 0,33 \cdot 5,6 + 370,6 = 372,45^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{н} 0,7} = 0,7 \cdot 5,6 + 370,6 = 374,5^\circ\text{C};$$

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

$$t_{0,33} = 145,1\text{с};$$

$$t_{0,7} = 281,4\text{c.}$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 76,95\text{c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = 170,4\text{c}$$

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

$$W_0(p) = \frac{-0,56 \cdot e^{-76,95p}}{170,4p + 1} \quad (1.25)$$

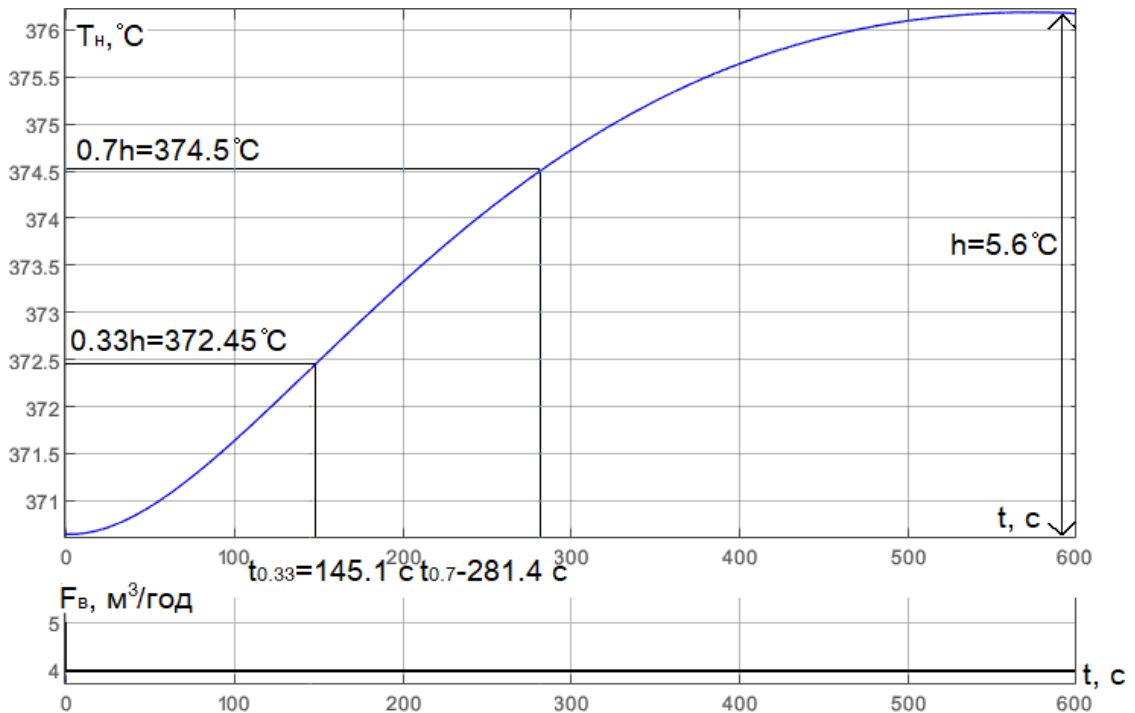


Рисунок 1.15 - Перехідна характеристика каналу  $F_v - T_n$  та проведення параметричної ідентифікації її моделі першого порядку

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого порядку за каналом  $W_{ел} - T_n$ .

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК ( $K_0$ ), сталу часу ( $T_0$ ) і час запізнення ( $\tau_0$ ).

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta T_n}{\Delta W_{ел}} = \frac{428,8 - 409,2}{40 - 30} = 3,92 \text{ } ^\circ\text{C} / \%x.p.o. \quad (1.26)$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення для моделі 1-го порядку доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$T_{H 1,0} = 428,8 - 409,2 = 19,6^{\circ}\text{C};$$

$$T_{H 0,33} = 0,33 \cdot 19,6 + 409,2 = 415,6^{\circ}\text{C};$$

$$T_{H 0,7} = 0,7 \cdot 19,6 + 409,2 = 422,9^{\circ}\text{C};$$

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

$$t_{0,33} = 40,12\text{c};$$

$$t_{0,7} = 145,7\text{c}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 18,95\text{c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = 105,6\text{c}$$

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

$$W_0(p) = \frac{3,92 \cdot e^{-18,95p}}{105,6p + 1} \quad (1.27)$$

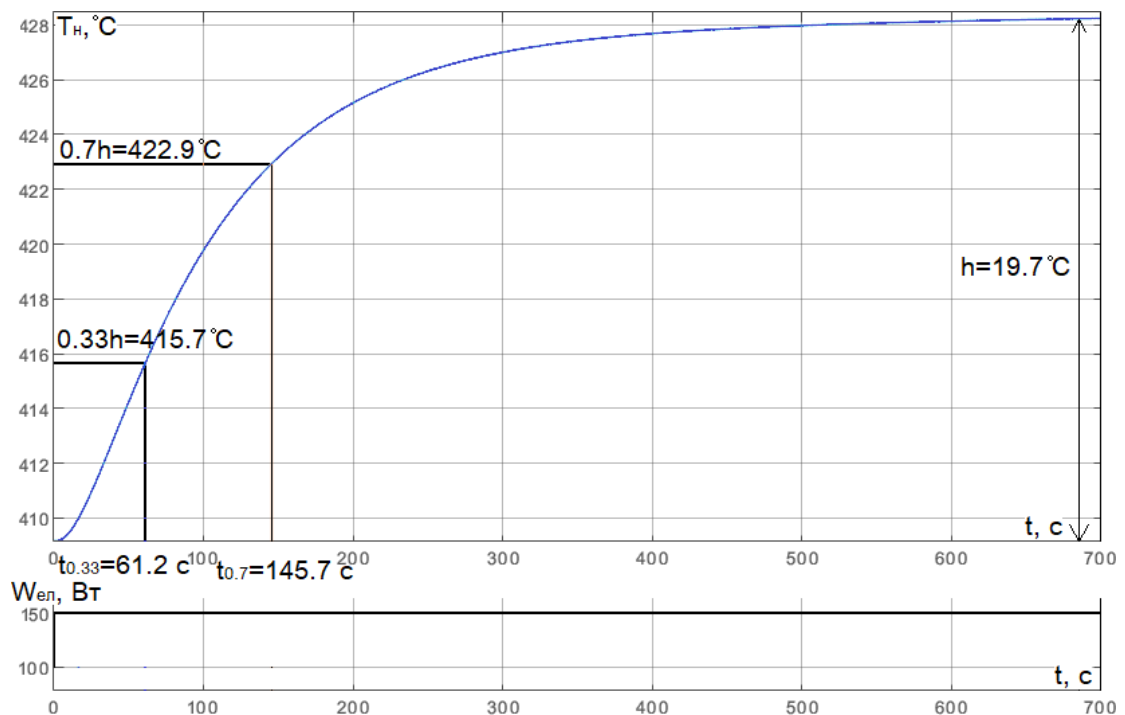


Рисунок 1.16 - Перехідна характеристика каналу  $W_{ел} - T_n$  та проведення параметричної ідентифікації її моделі першого порядку

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 завдання:

- підтримка вихідних змінних об'єкта керування  $T_n$ ,  $T_k$  на заданих значеннях  $T_n^{зад}$ ,  $T_k^{зад}$  – задача регулювання.
- пристосування в процесі роботи об'єкта керування до його властивостей, що змінюються – задача адаптації;
- забезпечення найкращих (оптимальних) у певному (заданому) сенсі режимів роботи об'єкта керування – задача оптимізації;
- забезпечити ввімкнення та вимкнення технологічного обладнання 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 кожну 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. таблицю 1.1) технологічний параметр температура на виході з газового нагрівача  $T_n$  повинна підтримуватися на рівні  $T_n^{\text{зад}} = 420 \text{ }^\circ\text{C}$ , з точністю  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для параметру припустимі короткочасні відхилення до  $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом часу не більше 300с. Регламентна зона за параметром наведена на рисунку 1.17.

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів (див. таблицю 1.1) технологічний параметр температура на виході з реактора  $T_k$ , повинен підтримуватися на рівні  $T_k^{\text{зад}} = 530 \text{ }^\circ\text{C}$ , з точністю  $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для параметру припустимі короткочасні відхилення до  $\pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом часу не більше 300с. Регламентна зона за параметром наведена на рисунку 1.18.

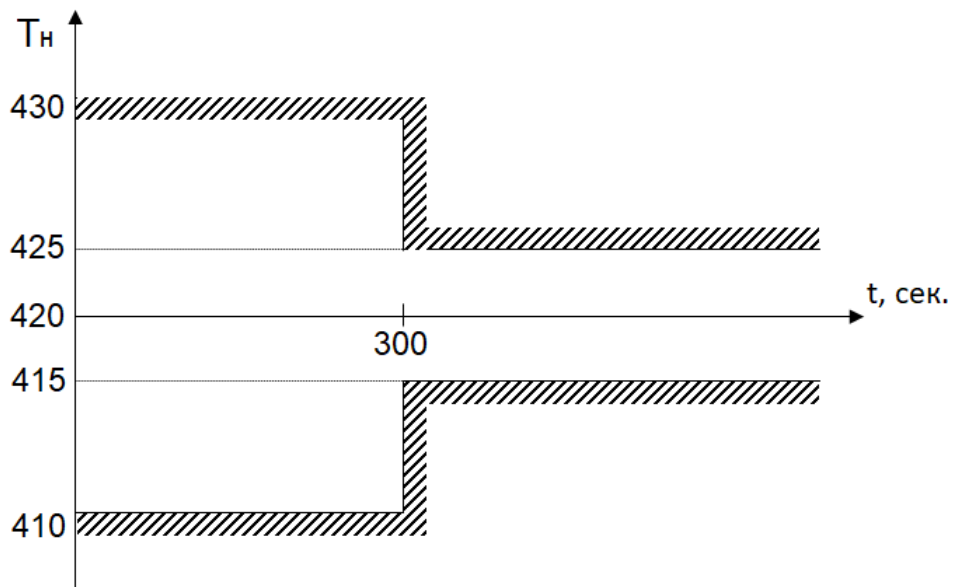


Рисунок 1.17 - Регламентна зона для технологічного параметра  $T_n$   
(температура на виході з газового нагрівача)

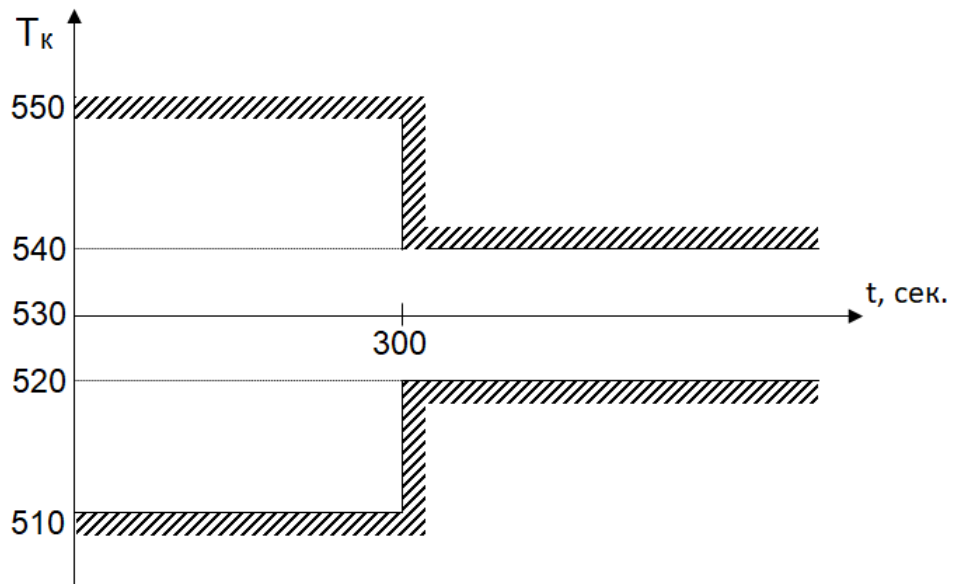


Рисунок 1.18 - Регламентна зона для технологічного параметра  $T_k$   
(температура на виході з реактора)

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 утилізації тепла димових газів особливо жорсткі вимоги пред'являються до короткочасних відхилень, оскільки саме недотримання цих регламентів може призвести зниження

ефективності ведення ТП і суттєвих економічних збитків. При цьому малі відхилення регламентуються дуже жорстко. Тому в якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний модульний критерій.

#### 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.

Структурна схема процесу каталітичної очистки газових сумішей наведена на рис. 1.4. Відповідно до неї та до структурної схеми, що відповідає замкненому принципу керування, структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 1.19.

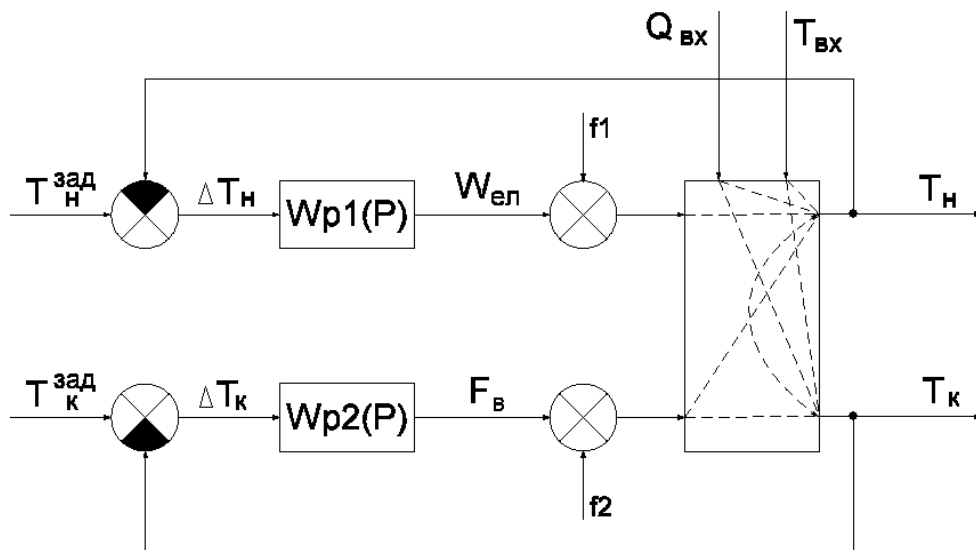


Рисунок 1.19 - Структурна схема САР температури сировини на виході з газового нагрівача та температури готового продукту на виході з реактора базової структури

Позначення на рисунку 1.19:

$W_{ел}$  - потужність живлення нагрівача;

$F_B$  – витрати сировини.

$T_H$  – температура сировини на виході з газового нагрівача;

$T_K$  – температура продукту на виході з каталітичного реактора;

$f_1, f_2$  – вектор неконтрольованих збурень;

$W_{P1}(p)$  – передаточна функція регулятора температури сировини на виході з газового нагрівача;

$W_{P2}(p)$  – передаточна функція регулятора температури на виході з каталітичного реактора;

$T_H^{3ДН}$  – задане значення температури сировини на виході з газового нагрівача;

$T_K^{3ДН}$  – задане значення температури на виході з каталітичного реактора;

$\Delta T_H$  – помилка регулювання температури сировини на виході з газового нагрівача;

$\Delta T_K$  – помилка регулювання температури на виході з каталітичного реактора;

$T_{ВХ}$  – температура сировини;

$Q_{ВХ}$  – вміст вуглеводнів в сировині.

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

Процес каталітичної очистки газових сумішей за всіма каналами має статичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо і пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) алгоритм регулювання.

Рівняння руху ПІД-регулятора:

$$u(t) = K_P \cdot \left( \Delta y(t) + \frac{1}{T_{ИЗ}} \int_0^t \Delta y(t) dt + T_{ИП} \frac{d\Delta y(t)}{dt} \right) + u_0 \quad (1.28)$$

Передаточна функція ПІД-регулятора:

$$W_P(p) = K_P \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{ИЗ} p} + \frac{T_{ИП} p}{0,2 \cdot T_{ИП} p + 1} \right) \quad (1.29)$$

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. 4.2.

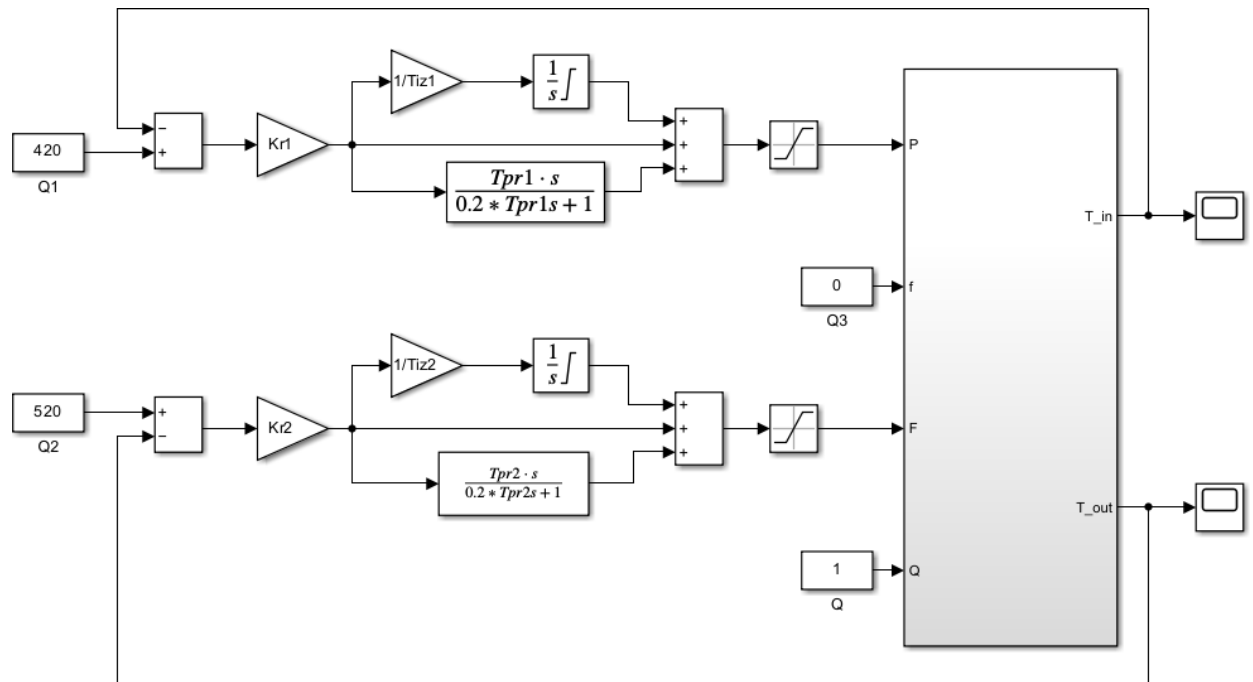


Рисунок 1.20 - Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

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.

Передаточна функція ( $W_{ел} - T_H$ ) моделі 1-го порядку ОК:

$$W_0(p) = \frac{3,92 \cdot e^{-18,95 p}}{105,6 p + 1} \quad (1.30)$$

Розрахунок параметрів ПІД- регулятора:

$$K_p = \frac{1 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{1 \cdot 105,6}{3,92 \cdot 18,95} = 1,4 \frac{\%x.p.o.}{^{\circ}C}$$

$$T_{i3} = 2 \cdot \tau_o = 2 \cdot 18,95 = 37,9c$$

$$T_{IP} = \frac{\tau_o}{2} \dots \tau_o = 13,9c$$

Передаточна функція ( $F_b - T_k$ ) моделі 1-го порядку ОК:

$$W_0(p) = \frac{3,31 \cdot e^{-310p}}{752,5p + 1} \quad (1.31)$$

Розрахунок параметрів ПД-регулятора:

$$K_p = \frac{1 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{1 \cdot 752,5}{3,31 \cdot 310} = 0,74 \frac{\%x.p.o.}{^{\circ}C}$$

$$T_{i3} = 2 \cdot \tau_o = 2 \cdot 310 = 620c$$

$$T_{IP} = \frac{\tau_o}{2} \dots \tau_o = 231,9c$$

1.4.2.2 Параметричний оптимальний синтез САР з альтернативними алгоритмами регулювання для детермінованих (ступінчастих) вхідних діях.

Для оптимального параметричного синтезу САР температури сировини на виході з газового нагрівача та температури готового продукту на виході з реактора з ПД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 1.21. Результати оптимізації налаштувань ПД-регулятора наведені на рис. 1.22.

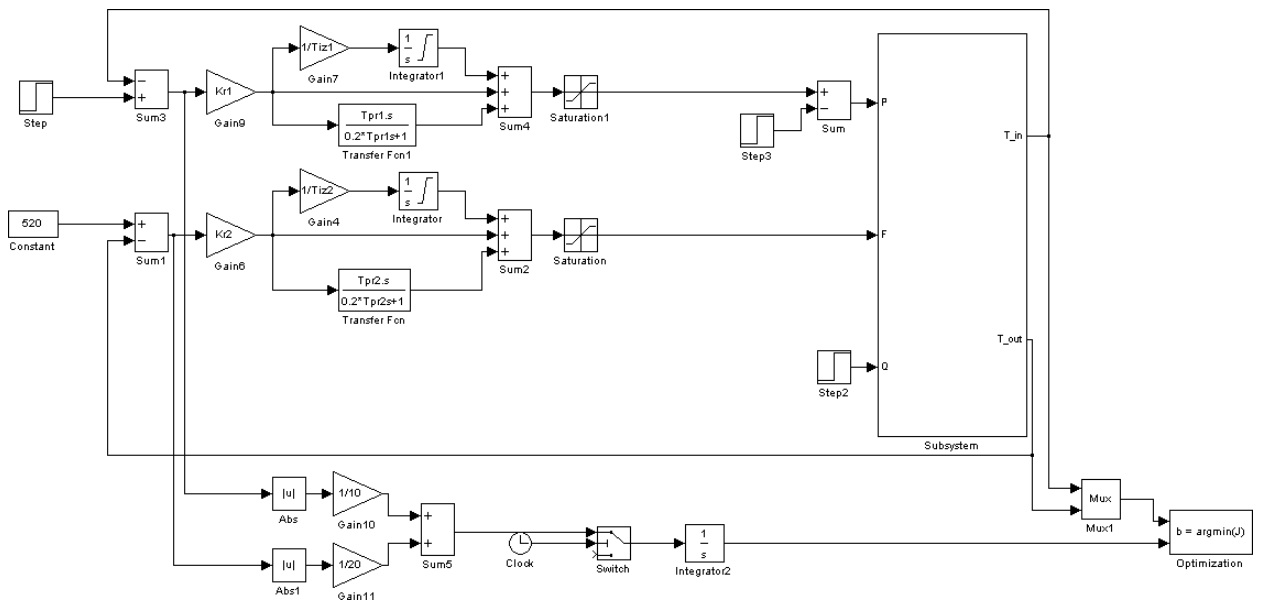
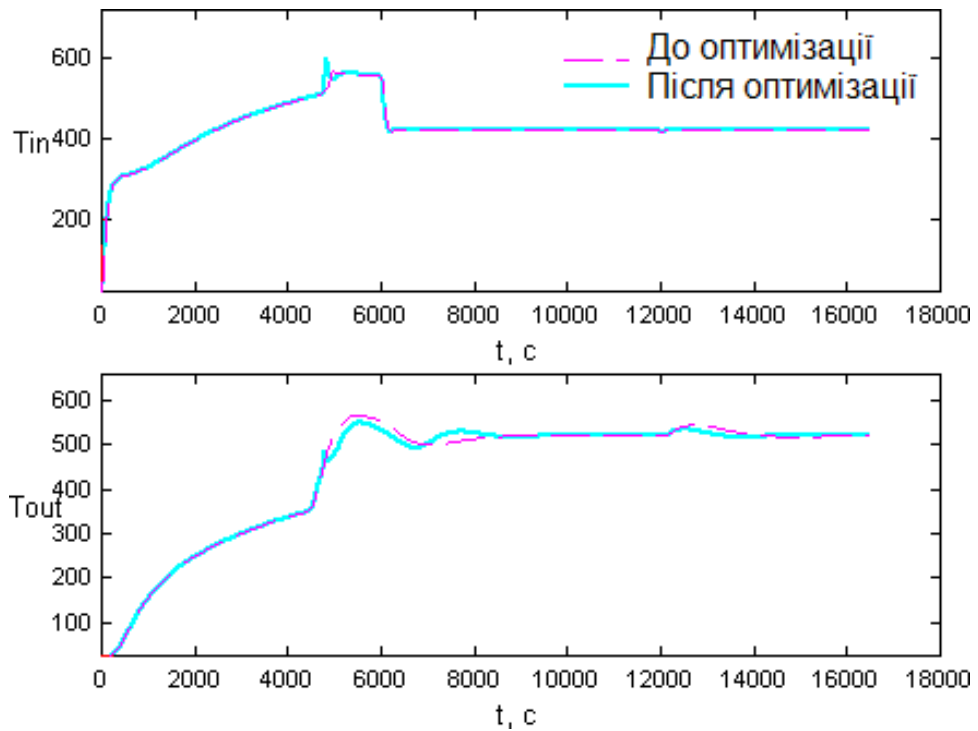


Рисунок 1.21 - Структурна схема моделювання оптимального параметричного синтезу САР базової структури з ПІД-регуляторами



Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності: до – 1651.2598 після – 735.1888 оптимізації.
Kr1	0.96974	0	1.4	5	
Tiz1	38.6035	0	37.9	100	
Tpr1	9.7985	0	13.9	50	
Kr2	1.1809	0	0.74	5	Кількість кроків процедури оптимізації: максимальне – 1000 фактичне – 38
Tiz2	343.3329	100	620	1000	
Tpr2	206.7695	100	231,9	500	

Рисунок 1.22 - Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів

На рисунку 1.23 представлена схема моделювання САР температури на виході з газового нагрівача ( $T_H$ ) та температури на виході з реактору ( $T_K$ ) з ПІД регуляторами до та після оптимізації налаштувань регуляторів.

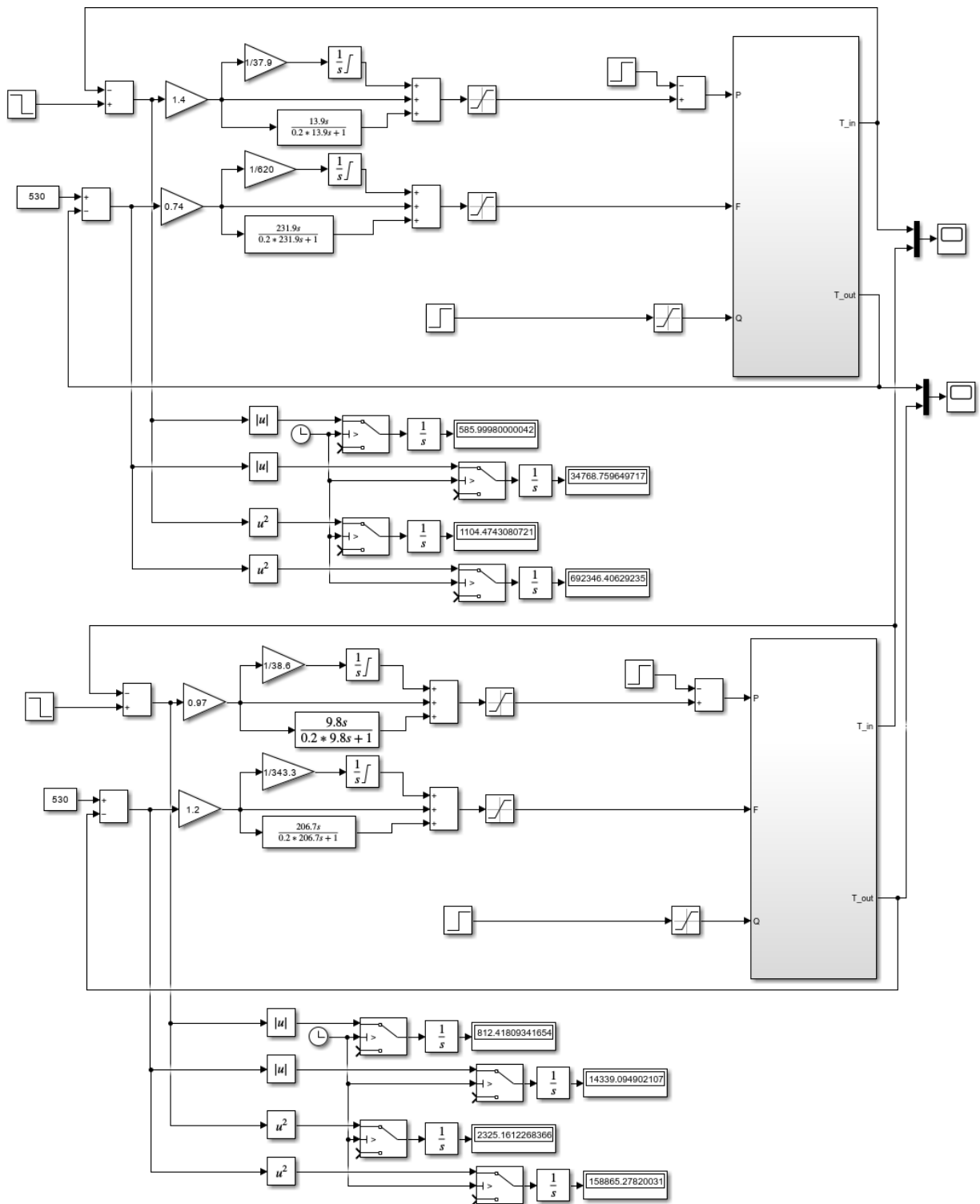


Рисунок 1.23 – схема моделювання порівняння САР базової структури з ПІД-регуляторами до та після оптимізації

На рисунку 1.24 представлено результати моделювання САР температури  $T_H$  з ПД регулятором до та після оптимізації налаштувань регулятора.

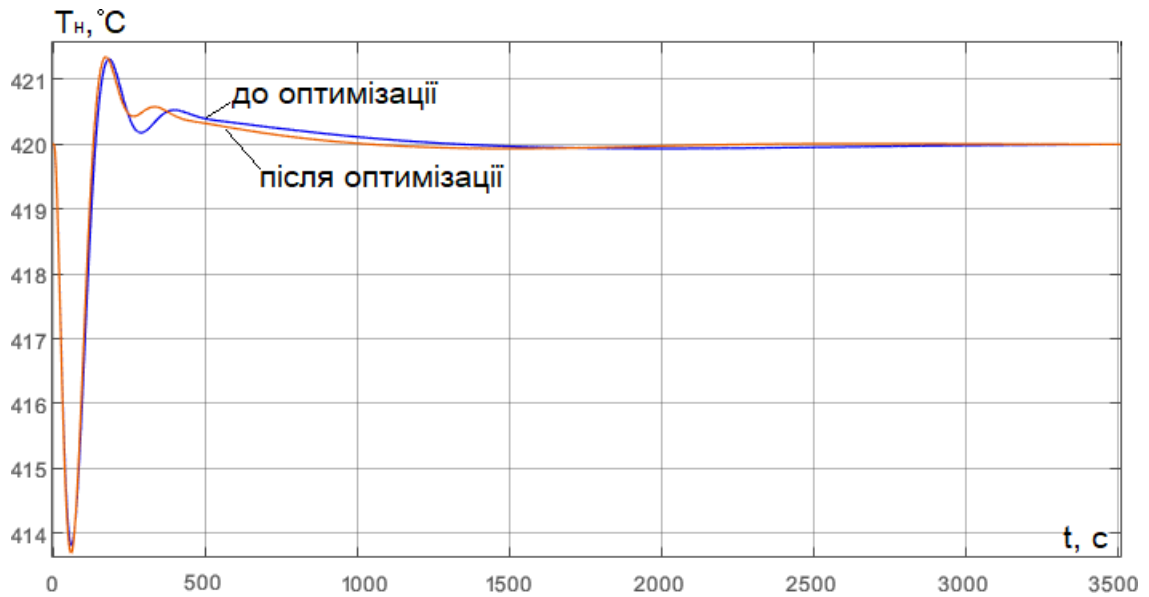


Рисунок 1.24 – Порівняльний аналіз САР температури сировини на виході з нагрівача з ПД-регулятором

На рисунку 1.25 представлено результати моделювання САР температури  $T_K$  з ПД регулятором до та після оптимізації налаштувань регулятора.

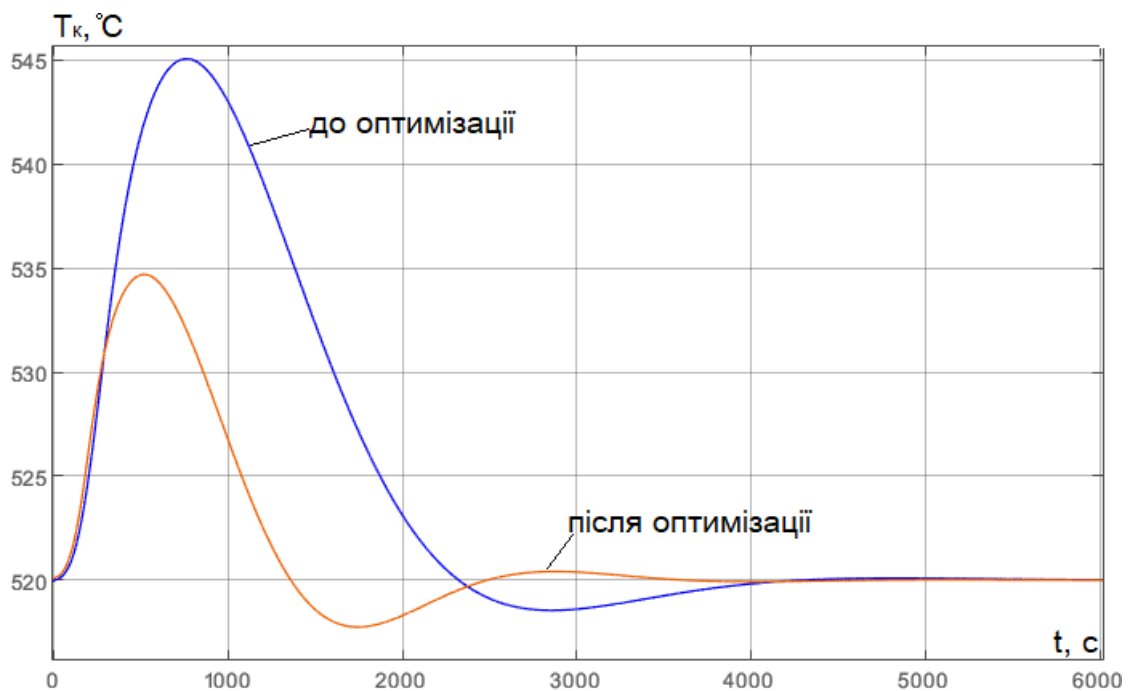


Рисунок 1.25 – Порівняльний аналіз САР температури сировини на виході з каталітичного реактора з ПД-регулятором

Порівняння САР температури сировини на виході з нагрівача з ПІД-регулятором  $T_n$  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  $W_{ел} - T_n$ .

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

Порівняння САР температури сировини на виході з реактора з ПІД-регулятором  $T_k$  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  $F_v - T_k$ .

Система	Показники якості				
	Інтегральні		Прямі		
	$ I $	$I^2$	dy_max	$T_{рег}$	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.

В розділі було розглянуто суть технологічного процесу каталітичної очистки інертних газів, його схема та конструкцію агрегату, що реалізує даний процес. Визначено регламенти ведення ТП та виділено регульовані координати, в якості яких доцільно обрати температуру на виході з газового нагрівача  $T_n$  і температуру на виході з реактору  $T_k$ . Необхідною умовою

вирішення задач керування є наявність керуючих дій, що повинні бути вхідними змінними (координатами) ОК і їх кількість повинна бути рівною кількості регульованих змінних. Для процесу каталітичної очистки інертних газів до керуючих дій доцільно віднести потужність живлення електричного нагрівача  $W_{ел}$  та витрати сировини  $F_B$ . Всі інші вхідні дії, окрім керуючих, класифікуємо як некеровані збурення.

У ході виконання розділу була розроблена структурна схема процесу каталітичної очистки інертних газів та структурна схема його математичної моделі. Також в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink була відтворена математична модель об'єкту керування. В результаті моделювання математичної моделі ОК були отримані його динамічні та квазістатичні характеристики, а також доведена адекватність аналітичної математичної моделі процесу каталітичної очистки інертних газів як ОК. За всіма каналами ОК має статичні властивості, параметрична ідентифікація моделей каналів керування проводилася за методикою двох спільних точок першого порядку.

САР температури на виході з газового нагрівача  $T_n$  та САР температури на виході з реактору  $T_k$  були синтезовані на базі ПІД регуляторів. Синтез САР проведено в два етапи. На першому етапі розрахунок налаштувань ПІД регуляторів проводився за інженерними методиками Капеловича, на другому етапі було застосовано оптимальний параметричний синтез.

Хоча із налаштуваннями регуляторів, отриманими за інженерними методиками САР дає стійкі перехідні процеси, після оптимізації інтегральні показники якості суттєво зменшилися що свідчить про підвищення динамічної якості системи. Також варто зазначити, що попри вжиті заходи існує запас підвищення динамічної точності САР.

## 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  $t_0 / T_0$ , взаємний вплив каналів в багатовимірної САР).

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія перехресного зв'язку витрати сировини на температуру сировини після нагрівача. 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.

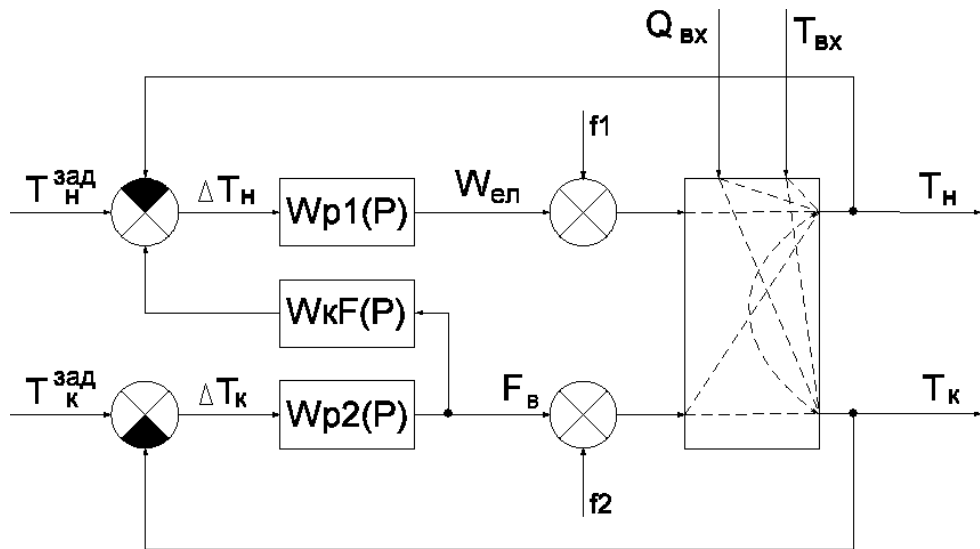


Рисунок 2.1 – Структурна схема двомірної автономної САР, з міжрегуляторним коригуючим зв'язком

Позначення на рисунку 2.1:

$W_{ел}$  - потужність живлення нагрівача;

$F_{в}$  – витрати сировини.

$T_{н}$  – температура сировини на виході з газового нагрівача;

$T_{к}$  – температура продукту на виході з каталітичного реактора;

$f_1, f_2$  – вектор неконтрольованих збурень;

$W_{p1}(p)$  – передаточна функція регулятора температури сировини на виході з газового нагрівача;

$W_{p2}(p)$  – передаточна функція регулятора температури на виході з каталітичного реактора;

$W_{кF}(P)$  – передаточна функція коригуючого зв'язку температури у реакторі;

$T_{н}^{зад}$  – задане значення температури сировини на виході з газового нагрівача;

$T_{к}^{зад}$  – задане значення температури на виході з каталітичного реактора;

$\Delta T_{н}$  – помилка регулювання температури сировини на виході з газового нагрівача;

$\Delta T_k$  – помилка регулювання температури на виході з каталітичного реактора;

$T_{вх}$  – температура сировини;

$Q_{вх}$  – вміст вуглеводнів в сировині.

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  $W_{K_F}(p)$ , що забезпечує автономність контуру регулювання температури сировини на вході у реактор  $T_H$  відносно контуру регулювання температури готового продукту на виході з реактора  $T_K$ . В якості вхідного параметра системи регулювання приймемо керуючу дію  $F$ . Запишемо рівняння, яке буде відповідати умові автономності:

$$y = W_{F_{вТН}}^c(p) \cdot F_{в|_{F_{в\neq 0}=0}} \quad (2.1)$$

Умова автономності виконується, якщо  $W_{F_{вТН}}^c(p) = 0$ . Для забезпечення автономності при записі передаточної функції системи за означеним каналом замкненими контурами САР можна знехтувати. Звідси передаточна функція коригуючого зв'язку:

$$W_{F_{вТН}}^k(p) = - \frac{W_{F_{вТН}}^0(p)}{W_{елТН}^p(p) \cdot W_{елТН}^0(p)} \quad (2.2)$$

Якщо:

$$W_{F_{вТН}}^0(p) = \frac{-0,56 \cdot e^{-76,95p}}{170,4p + 1};$$

$$W_{елТН}^0(p) = \frac{3,92 \cdot e^{-18,95p}}{105,6p + 1};$$

$$W_{W_{елТН}}^p(p) = 4,3 \cdot \left(1 + \frac{1}{93,5p} + 12,8p\right).$$

Тоді:

$$\begin{aligned} W_{F_{ВТН}}^k(p) &= - \frac{W_{ТН}^o(p)}{W_{елТН}^p(p) \cdot W_{елТН}^o(p)} = \\ &= - \frac{\frac{-0,56 \cdot e^{-76,95p}}{170,4p + 1}}{0,95 \cdot \left(1 + \frac{1}{38,6p} + 9,8p\right) \cdot \frac{3,92 \cdot e^{-18,95p}}{105,6p + 1}} = \\ &= - \frac{-0,56 \cdot e^{-76,95p}}{170,4p + 1} \cdot \frac{105,6p + 1}{3,92 \cdot e^{-18,95p} \cdot 0,95 \cdot \left(1 + \frac{1}{38,6p} + 9,8p\right)} = \\ &= - \frac{-0,56}{3,92 \cdot 0,95} \cdot e^{(-76,95p + 18,95p)} \cdot \frac{105,6p + 1}{(170,4p + 1) \cdot \left(\frac{378,3p^2 + 38,6p + 1}{38,6p}\right)} = \\ &= 0,15 \cdot e^{-58p} \cdot \frac{38,6p \cdot (105,6p + 1)}{(170,4p + 1) \cdot (378,3p^2 + 38,6p + 1)} \end{aligned}$$

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку є фізично реалізуємою, оскільки містить ланку чистого запізнення.

Структурна схема моделювання передатної функції коригуючого зв'язку приведена на рис. 2.2, а її перехідна характеристика - на рис. 2.3.

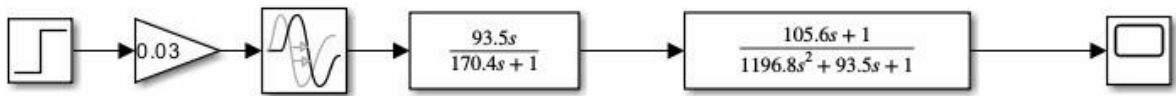


Рисунок 2.2 – Структурна схема моделювання передатної функції коригуючого зв'язку

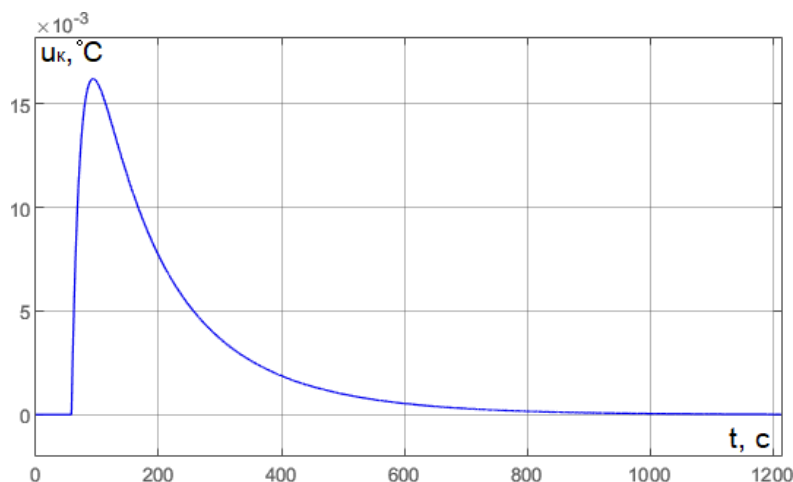


Рисунок 2.3 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку

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. Спрощена передатна функція коригуючого зв'язку буде мати такий вигляд:

$$W_{F_B T_H}^k(p) = K_k \cdot e^{-T_{k1}p} \cdot \frac{T_{k2}p}{(T_{k2}p+1)^2} \quad (2.3)$$

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 використаєм наступні значення параметрів:  $K_K = 0,15$ ;  $T_{K1} = 58$ ;  $T_{K2} = 38,6$ . 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, а результати моделювання - на рис. 2.6.

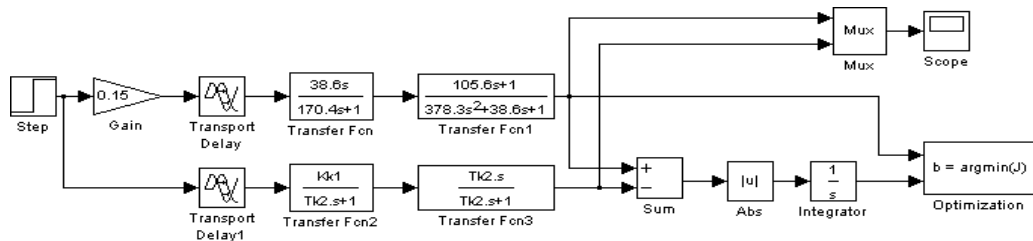
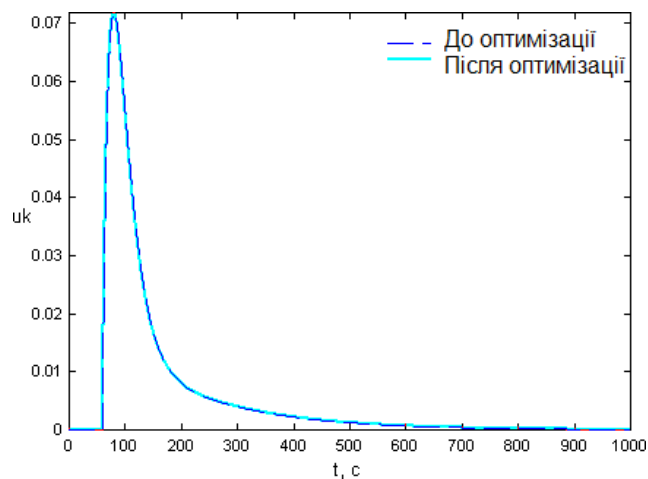


Рисунок 2.4 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку



Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності: до – 2.7833 після – 1.5124 оптимізації.
$K_k$	0.18874	0	0.15	1	
$T_{k1}$	56.7067	0	58	100	
$T_{k2}$	23.7298	0	38.6	2000	Кількість кроків процедури оптимізації: максимальне – 1000 фактичне - 156

Рисунок 2.5 – Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку

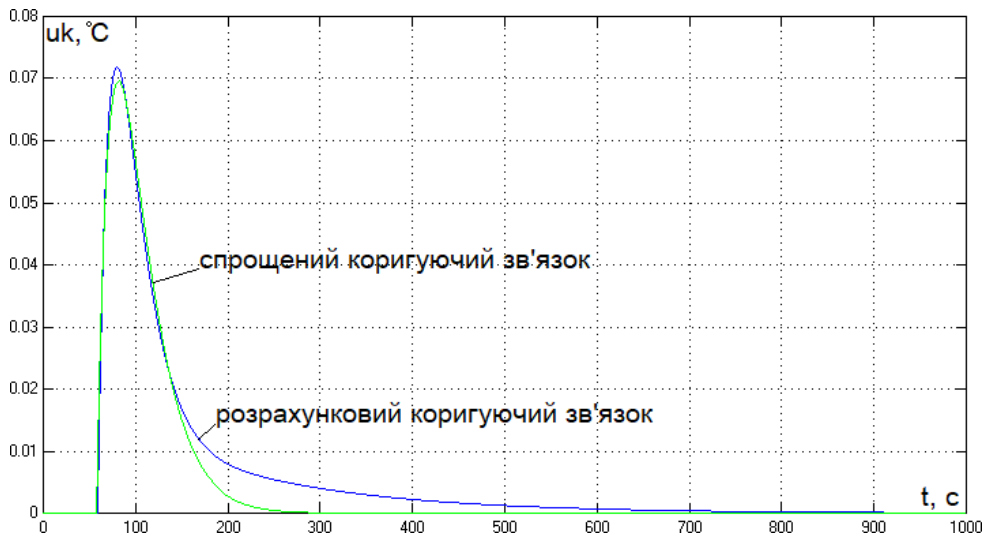


Рисунок 2.6 – Перехідна характеристика розрахункового та спрощеного коригуючого зв'язку

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

Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку наведена на рис. 2.7, а результати оптимізації - на рис. 2.8.

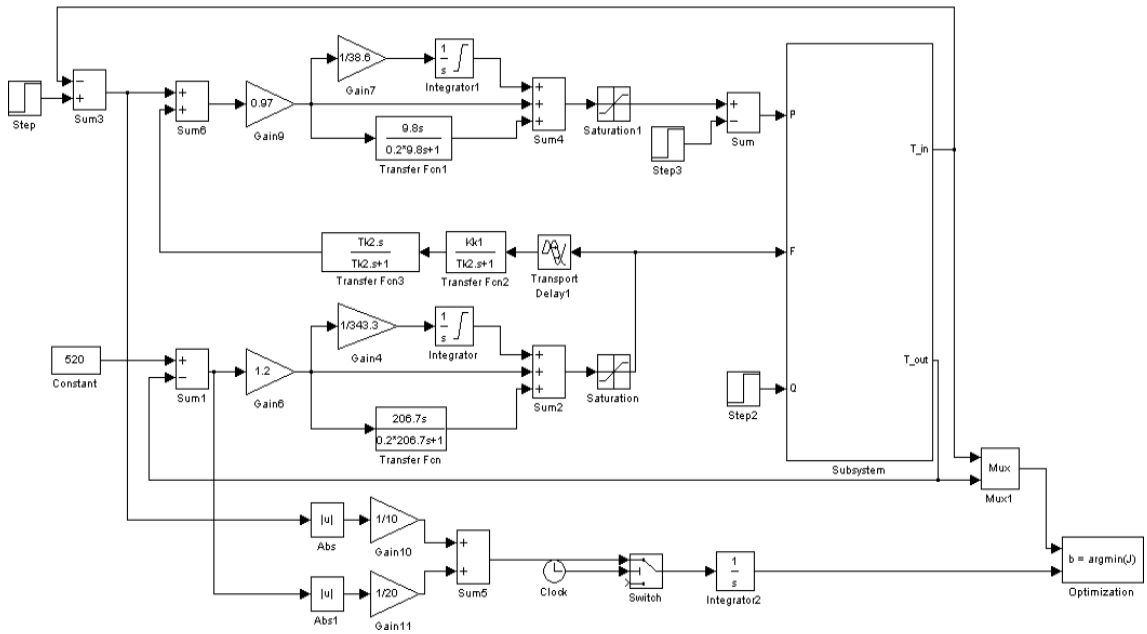
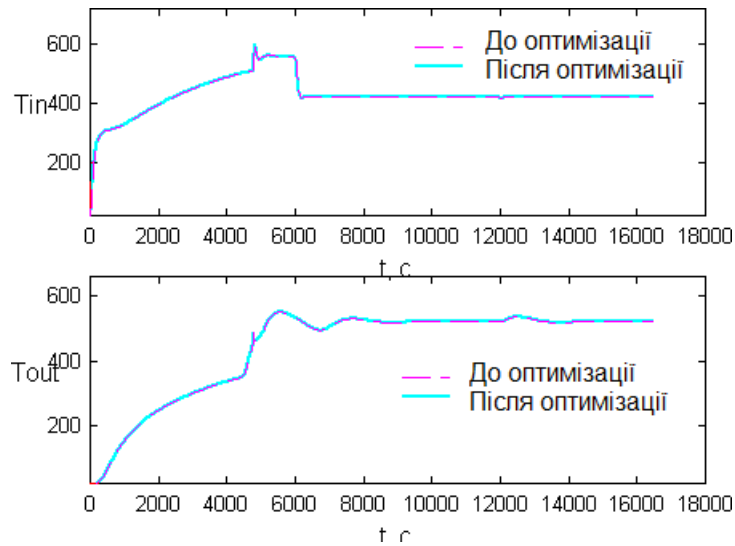


Рисунок 2.7 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку



Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності: до – 2.7833 після – 1.5124 оптимізації.
Kk	0.059073	0	0.19	1	
Tk1	23.6597	0	56.7	100	
Tk2	124.026	0	23.7	2000	Кількість кроків процедури оптимізації: максимальне – 1000 фактичне - 156

Рисунок 2.8 – Результати оптимізації параметрів коригуючого зв'язку

На рисунку 2.9 представлена схема моделювання САР температури на виході з газового нагрівача ( $T_H$ ) та температури на виході з реактору ( $T_K$ ) базової структури та САР температури на виході з газового нагрівача ( $T_H$ ) та температури на виході з реактору ( $T_K$ ) ПДТ.

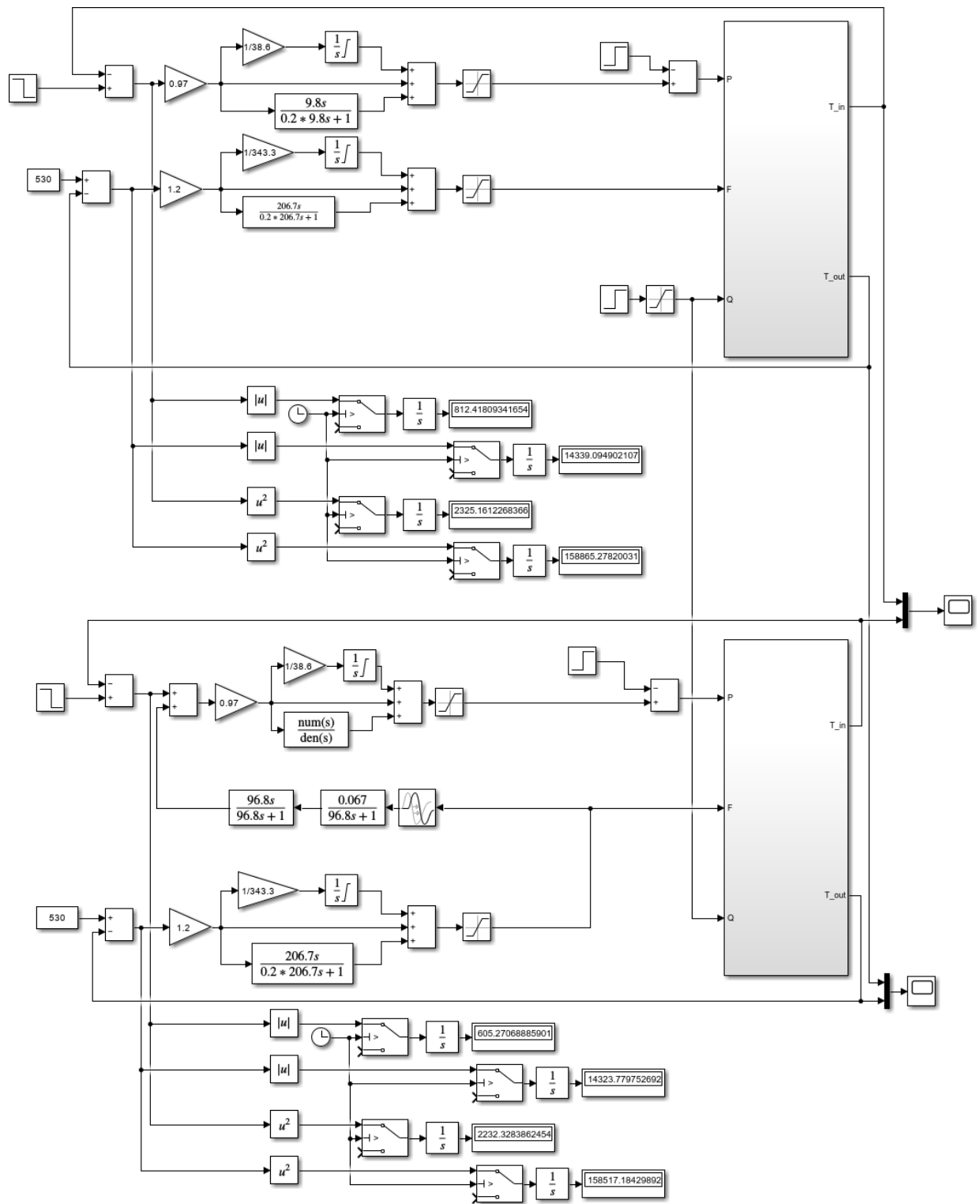


Рисунок 2.9 – Схема моделювання порівняння САР базової структури з ПІД-регуляторами та САР ПДТ

Результати моделювання з порівнянням САР базової структури та САР ПДТ наведено на рисунку 2.10.

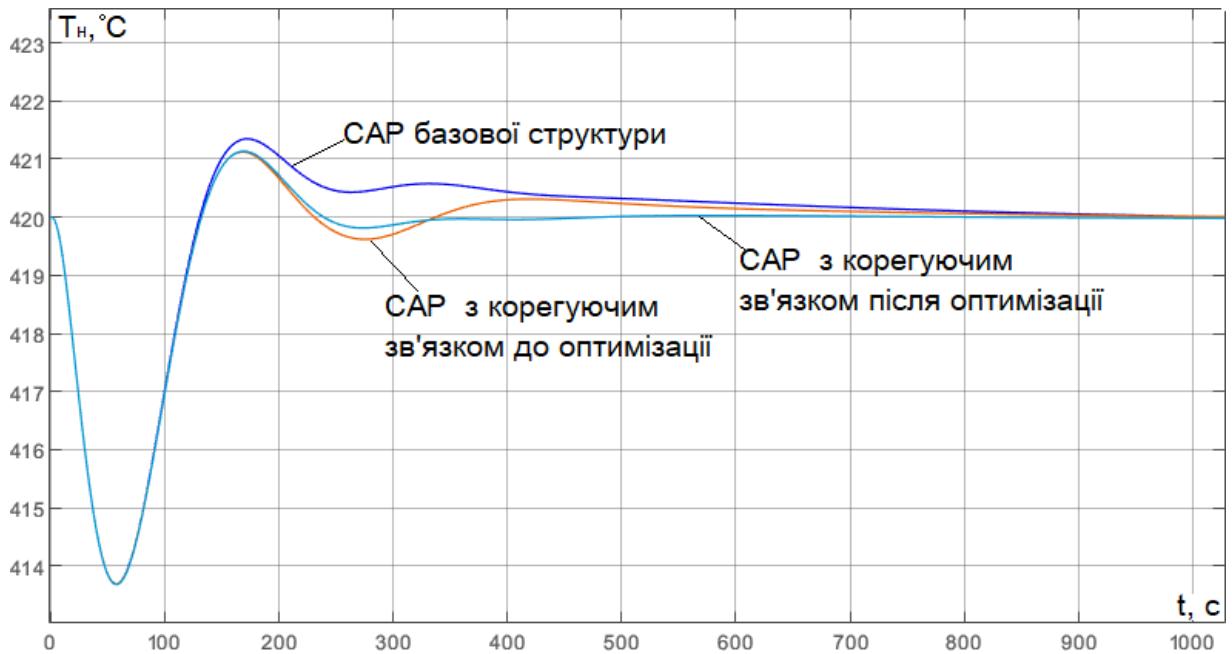


Рисунок 2.10 – Порівняння САР температури на виході з газового нагрівача базової структури, з корегуючим зв'язком до та після оптимізації

Порівняння інтегральних та прямих показників якості САР базової структури та САР ПДТ за каналом  $W_{ел} - T_n$  зображено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – порівняння показників якості САР базової структури та САР ПДТ за каналом  $W_{ел} - T_n$

Система	Показники якості				
	Інтегральні		Прямі		
	$ I $	$I^2$	$dy_{max}$	$T_{рег}$	$dy_{ct}$
Базова	816,38	2324,36	6,2	83	0
ПДТ	605,27	2232	6,2	83	0

Порівняння інтегральних та прямих показників якості САР базової структури та САР ПДТ за каналом  $F_b - T_k$  зображено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – порівняння показників якості САР базової структури та САР ПДТ за каналом  $F_B - T_K$

Система	Показники якості				
	Інтегральні		Прямі		
	$ I $	$I^2$	$dy_{max}$	$T_{рег}$	$dy_{ct}$
Базова	34768,76	692346,4	27,9	1656	0
ПДТ	14339,09	158865,2	16,6	908	0

### 2.3 Висновки за розділом.

Як було зазначено у попередньому розділі двомірна САР температури  $T_H$  та  $T_K$  базової структури має запас підвищення динамічної точності.

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія перехресного зв'язку витрати сировини на температуру сировини після нагрівача. 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 ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

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

Однією з основних проблем при автоматичному керуванні технологічними процесами є нелінійність контурів регулювання. В таких випадках зазвичай використовуються такі методи як лінійна апроксимація або кусково-лінійна апроксимація, за яких не завжди отримується бажаний результат. Інший варіант САК, який забезпечує більшу ефективність, це системи керування з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Найбільш вигідне, в порівнянні з традиційними САК, використання нечіткого керування за умов невизначеності інформації про динамічну поведінку ОК. Нечіткі регулятори більш грубі, оскільки цей підхід забезпечує можливість формування числа правил управління залежно від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурень.

Нечіткі регулятори забезпечують грубість і стабільну збіжність процесів в умовах невизначеності, що виникає через ряд факторів таких як: збурюючі випадкові впливи, складність розробки динамічної моделі, її високий порядок та нелінійний характер.

Істотні невизначеності у статичних і динамічних характеристиках процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування представляють труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи керування. У зв'язку з цим є актуальним застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

Наявність в сучасних системах програмування контролерів вбудованих бібліотек нечіткого керування, що мають зручний графічний інтерфейс, у якому дуже легко і наочно представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку, що дуже спрощують налаштування системи автоматичного регулювання, є перевагою нечіткого регулювання.

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

Для підтвердження актуальності застосування системи керування, побудованої на базі апарата нечіткої логіки, необхідно переконатися, що розглянутий у даній роботі об'єкт керування описується нелінійною моделлю. Тобто, моделі каналів регулювання розглянутого об'єкта управління повинні характеризуватися нелінійною статичною характеристикою. Спочатку представимо нелінійну статичну характеристику ОК для підтвердження відповідності з моделлю об'єкта керування. На рисунку 3.1 представлена екстремальна статична характеристика ОК для того, щоб переконатися у присутності нелінійних властивостей об'єкта за каналом регулювання температури в газовому нагрівачі.

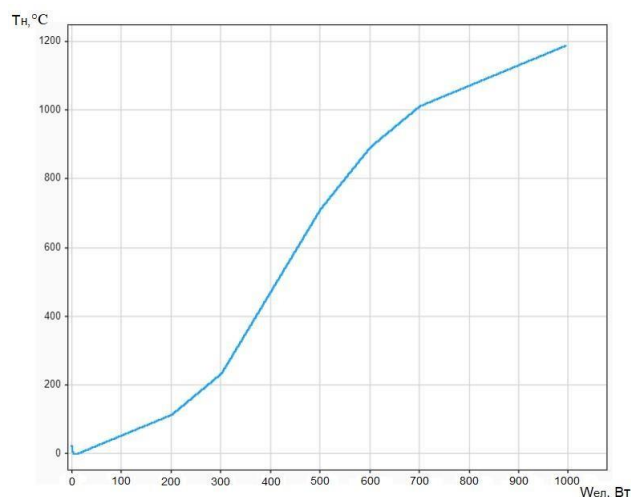


Рисунок 3.1 - Статична характеристика об'єкта управління за каналом «керуюча дія потужність газового нагрівача  $W_{ел}$ , Вт – температура газу на виході з газового нагрівача  $T_n$ , °C»

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 ПД-регулятори. Структурна схема повної моделі ОК з додатковим блоком Ramp представлена на рис. 3.2.

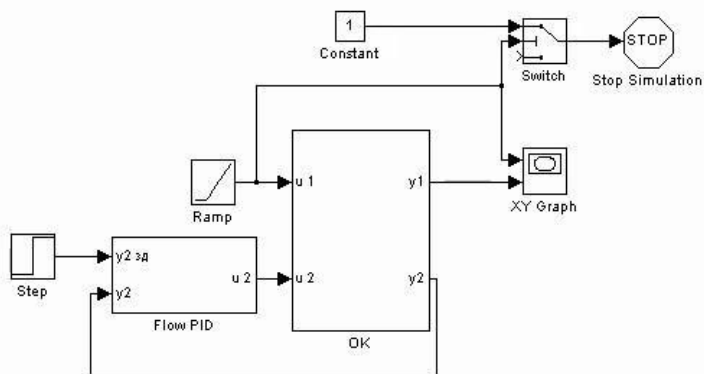


Рисунок 3.2 – Схема моделювання для отримання статичних залежностей температури на виході з нагрівача від потужності нагрівача

В остаточному підсумку в результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $W_{ел} - T_H$ », яка має вигляд, представлений на рисунку 3.3.

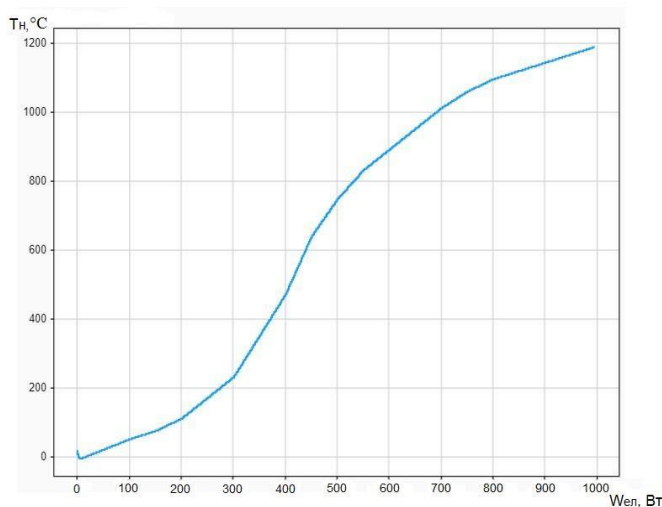


Рисунок 3.3 – Статична характеристика моделі каналу регулювання « $W_{ел} - T_H$ »

З рисунку 3.3 видно, що статична характеристика моделі каналу регулювання нелінійна та відповідає експериментальним даним, це дає можливість виконати синтез САУ з традиційними ПД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

3.3. Параметричний синтез САУ з традиційним під регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.

У даній роботі був виконаний параметричний синтез САУ з традиційним – лінійним ПД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Параметри настроювання регуляторів були визначені на основі статичних і динамічних параметрів ОК в рамках лінійної моделі.

Для реалізації параметричної оптимізації регуляторів системи керування в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 у відповідності з рисунком 3.4 була розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів за наступним компромісним критерієм якості роботи системи:

$$J = \int_0^{\infty} (|e_1(t)| + \beta \cdot |e_2(t)|) dt \rightarrow \min \quad (3.1)$$

де:  $e_1(t)$  – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням тиску в ресивері;  $e_2(t)$  – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величиною і заданим значенням температури повітря в сушильній камері;  $\beta$  – коефіцієнт.

У результаті параметричної оптимізації за обраним інтегральним показником якості роботи системи та за допомогою відповідного модуля – додатка MATLAB\Simulink 5.2 були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації і відповідні параметри настроювання регуляторів, що представлені на рисунку 3.5 у вікні результатів оптимізації. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання температури, помітно

покращилася після оптимізації САК. Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи керування. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

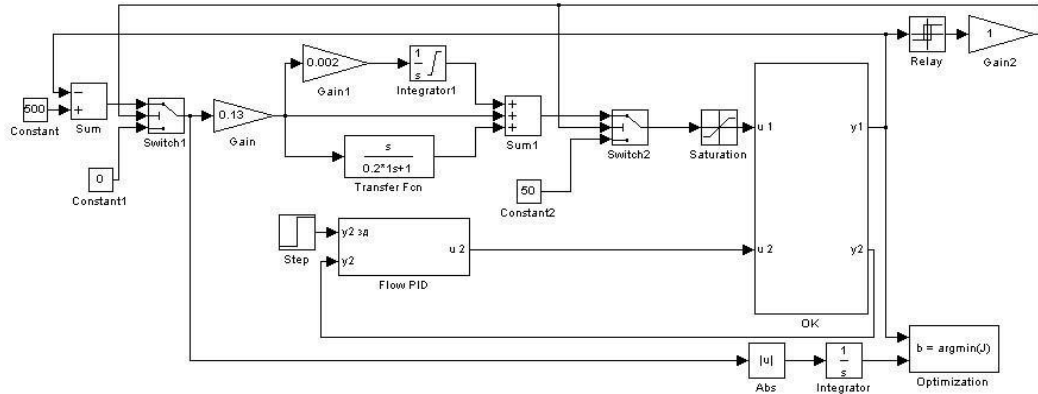
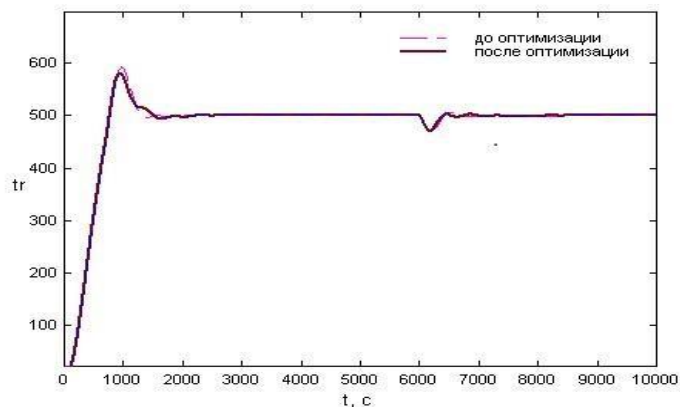


Рисунок 3.4 – Структурна схема моделі САК з традиційним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB Simulink для визначення оптимальних налаштувань системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr	0.31964	0.01	0.3	5	до - 9501.7796
Tiz	286.117	100	300	1000	после - 8365.1933
Tpr	125.4467	0.1	100	1000	оптимизации:
					Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 500
					фактическое - 112

Рис. 3.5 - Результати параметричної оптимізації значень параметрів регуляторів САК з каналом регулювання, що характеризується нелінійною статичною характеристикою

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 процесу каталітичної очистки інертних газів, як нелінійного об'єкта керування, доцільно застосувати в контурі регулювання температури газу на виході з реактору  $T_k$  нечіткий логічний регулятор (НЛР), який має властивості нелінійного регулятора. Застосування нечіткого-логічного регулятора (Fuzzy – регулятора) обумовлено наявністю нелінійного об'єкта управління, а також складного опису його статичних режимів роботи.

Складність опису статичних режимів роботи процесу з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі 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 САУ із Fuzzy – нечітким регулятором.

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазіуправління: фазіфікація, логічного висновку і дефазіфікація. Спрощена структурна схема розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.6. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

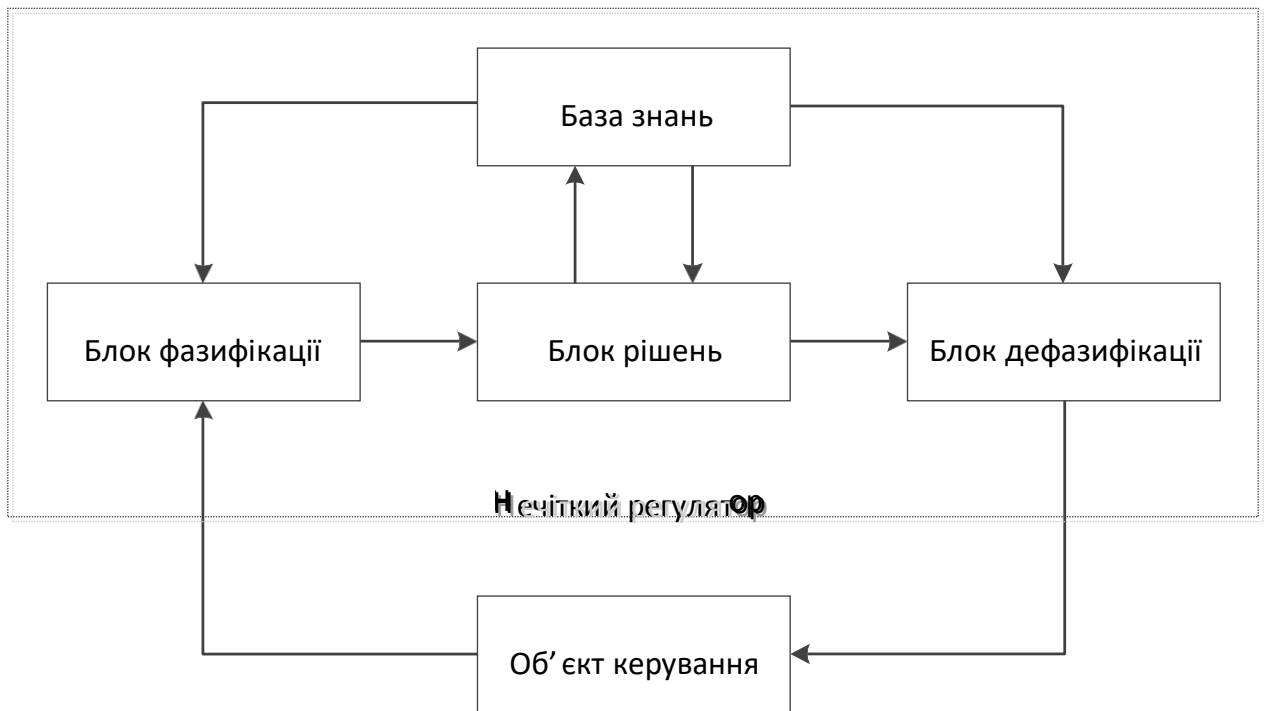


Рисунок 3.6 - Спрощена структурна схема нечіткого логічного регулятора

Всі визначені блоки (фазифікація, блок рішень, дефазифікація), що представлені на рисунку 3.6, 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 необхідний алгоритм (Sugeno або Mamdani) та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рисунку 3.7 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора температури в реакторі з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

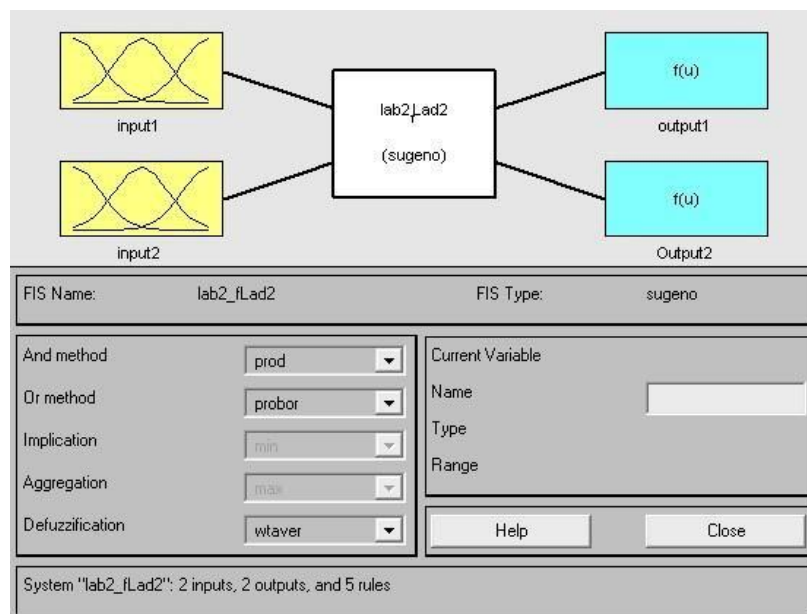


Рисунок 3.7 - Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

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, та алгоритм Мамдані.

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

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

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

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

де  $x, y$  – вхідні змінні,  $A_i, B_i$  - нечіткі множини,  $z_i = f(x_1, \dots, x_n)$  - 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:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 1 \rangle: \text{ЯКЩО } (x \in A_1 \text{ } | \text{ } y \in B_1), \text{ ТО, } z_1 = C_1,$$

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 2 \rangle: \text{ЯКЩО } (x \in A_2 \text{ } | \text{ } y \in B_2), \text{ ТО, } z_2 = C_2,$$

(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  $e_l$  належить нечіткій множині «велика позитивна PE» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_l$  належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія  $u_l = w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_l = w_2$ ;

П2: Якщо похибка регулювання  $e_l$  належить нечіткій множині «велика негативна NE» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_l$  належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія  $u_l = -w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_l = -w_2$ ;

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

П4: Якщо похибка регулювання  $e_l$  належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_l$  належить множині «велика позитивна PE», то керуюча дія  $u_l = w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_l = w_2$ ;

П5: Якщо похибка регулювання  $e_l$  належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання  $\Delta e_l$  належить множині «велика негативна NE», то керуюча дія  $u_l = -w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_l = -w_2$ .

Відповідно вище представленим правилам складемо таблиці баз знань для НЛР температури в реакторі.

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора температури в реакторі

<i>el</i>	<i>Δel</i>		
	NE (Велика негативна <i>Δel</i> )	Z (Приблизно нульова <i>Δel</i> )	PE (Велика позитивна <i>Δel</i> )
NE	-	$u_1 = -150$ $\Delta u_1 = -0.035$	-
Z	$u_1 = -150$ $\Delta u_1 = -0.035$	$u_1 = 0$ $\Delta u_1 = 0$	$u_1 = 150$ $\Delta u_1 = 0.035$
PE	-	$u_1 = 150$ $\Delta u_1 = 0.035$	-

Як видно з рисунку 3.7, 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 = -1000, c = 1000; b - найбільш можливе значення змінної.

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.8 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 3.9.

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 3.10.

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;

$\alpha_1 = \min(\mu_{A1}(x_0), \mu_{B1}(x_0))$ ,  $\alpha_2 = \min(\mu_{A1}(x_0), \mu_{B2}(x_0))$  – значення ступенів істинності всіх висновків правил нечітких продукцій з використанням методу  $\min$  активізації.

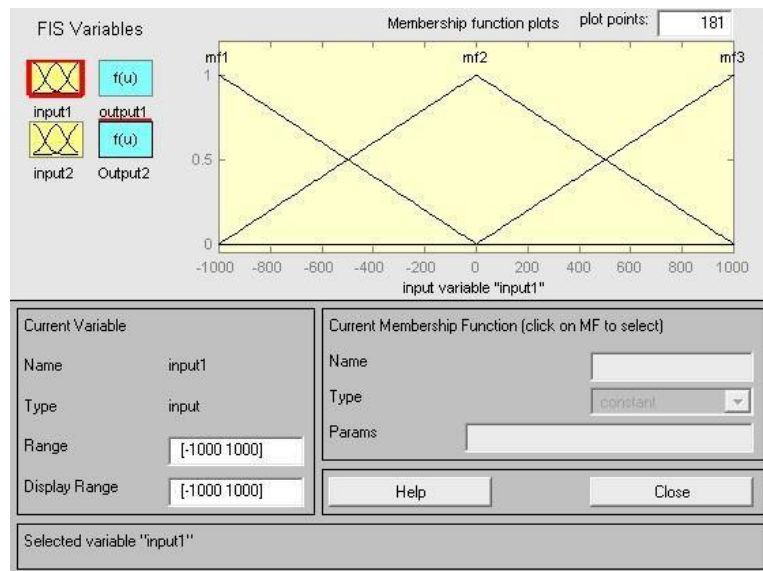


Рисунок 3.8 - Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

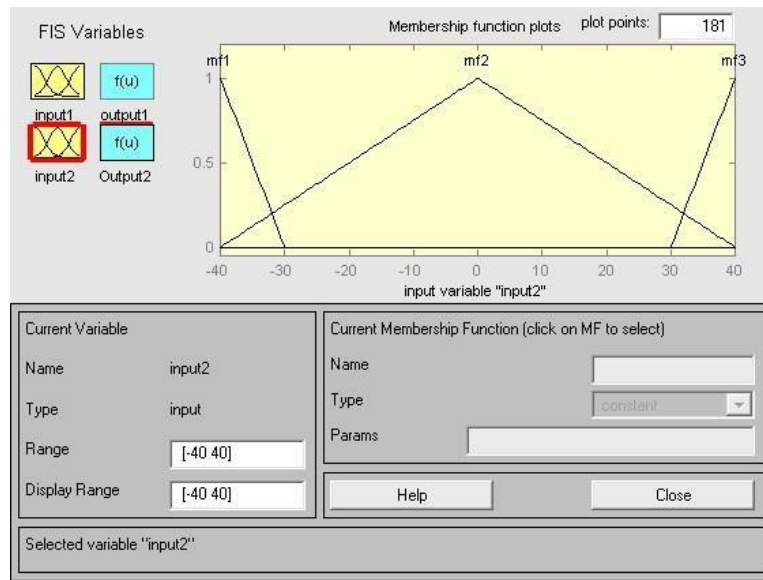


Рисунок 3.9 - Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів  $C_i$  згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на рисунку 3.11. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну П-складову регулятора, а «output2» – відповідно І-складову.

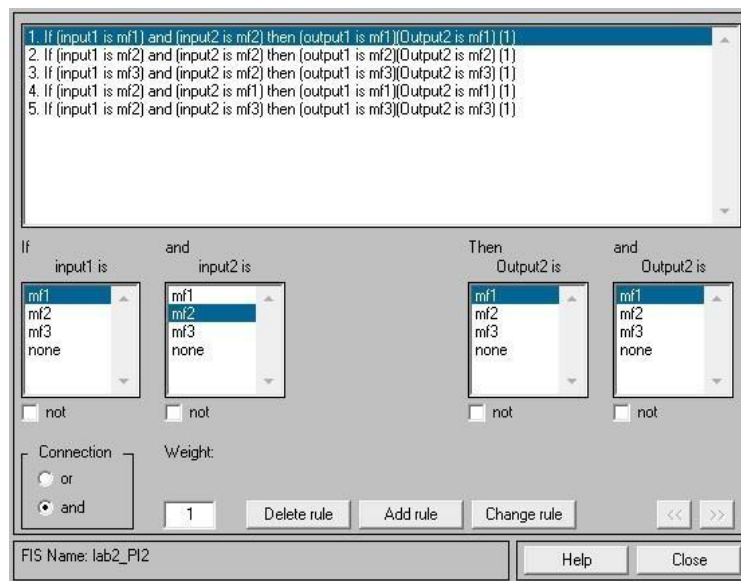


Рисунок 3.10 - Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

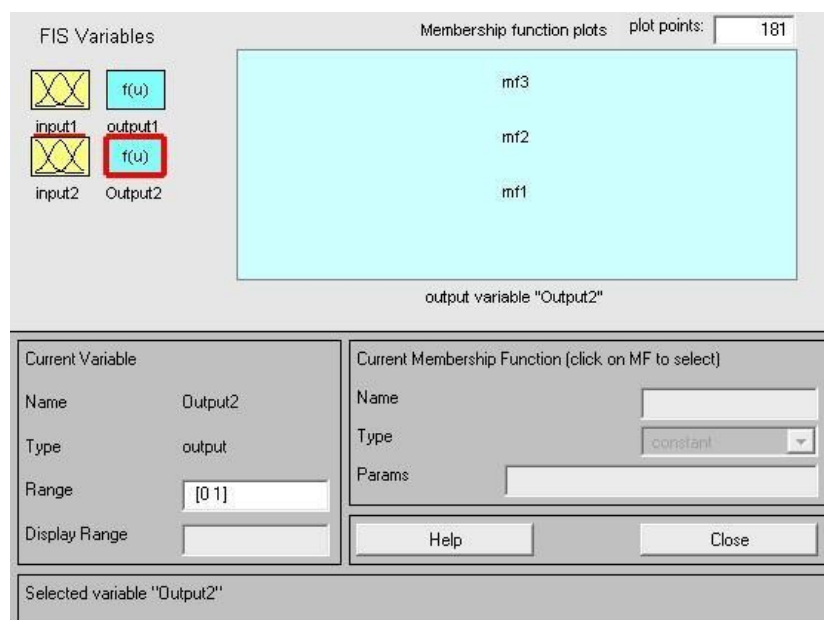


Рисунок 3.11 - Вікно редактора вихідних функцій приналежності нечіткого регулятора Сугено 0-порядку у середовищі MATLAB\Simulink

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

### 3.5. Порівняльний аналіз функціонування САУ з традиційним ПІД регулятором і САУ з нечітким регулятором.

У результаті моделювання САУ з нечітким регулятором за алгоритмом Сугено 0порядку були отримані графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування і також перехідні процеси при детермінованому і випадковому впливі, що збурює. Для порівняльного аналізу також були представлені відповідні графіки перехідних процесів у САУ з традиційним ПІД-регулятором. Схеми моделювання відповідних САК представлені на рисунку 3.12.

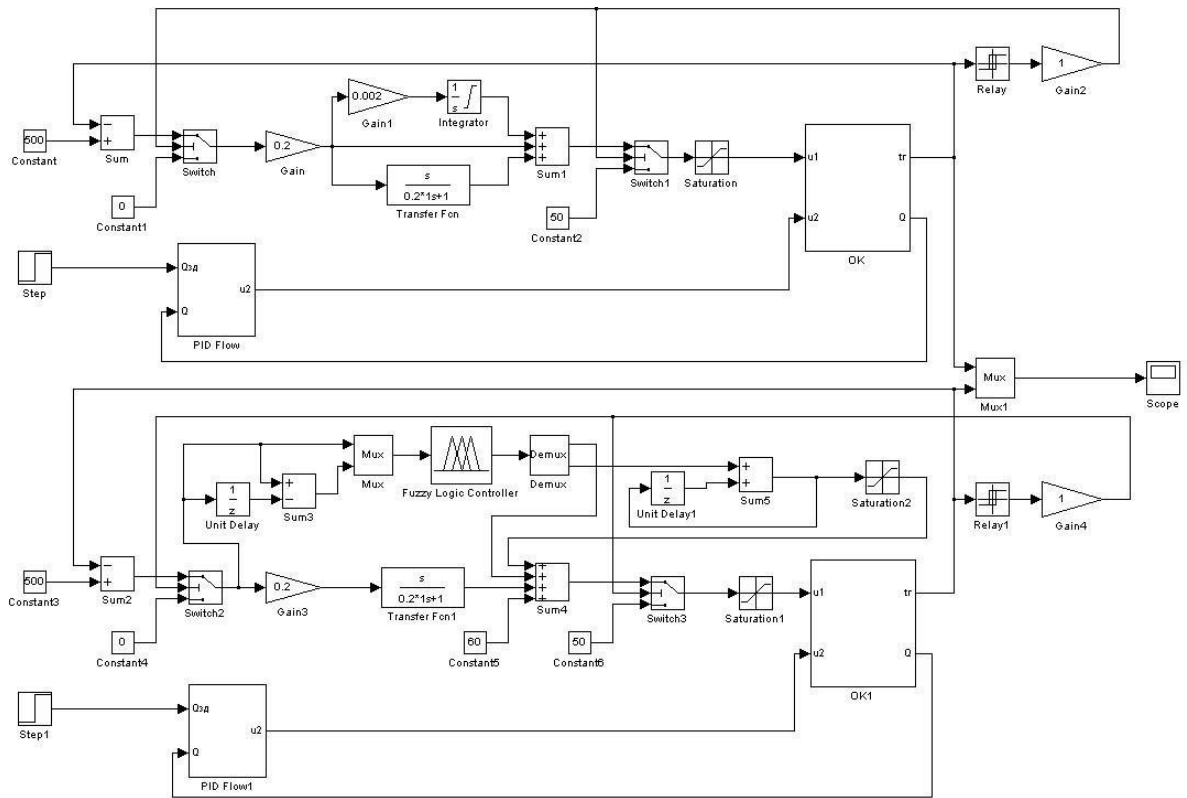


Рисунок 3.12 - Схема порівняння перехідних характеристик САК температури в реакторі з традиційним ПІД-регулятором та нечіткими логічними регуляторами Сугено 0-порядку

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

На рисунку 3.13 представлені графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування. А на рисунку 3.14 представлені графіки динамічних процесів при детермінованому збурюючому впливі і при випадковому впливі, що був введений на 200 секунд.

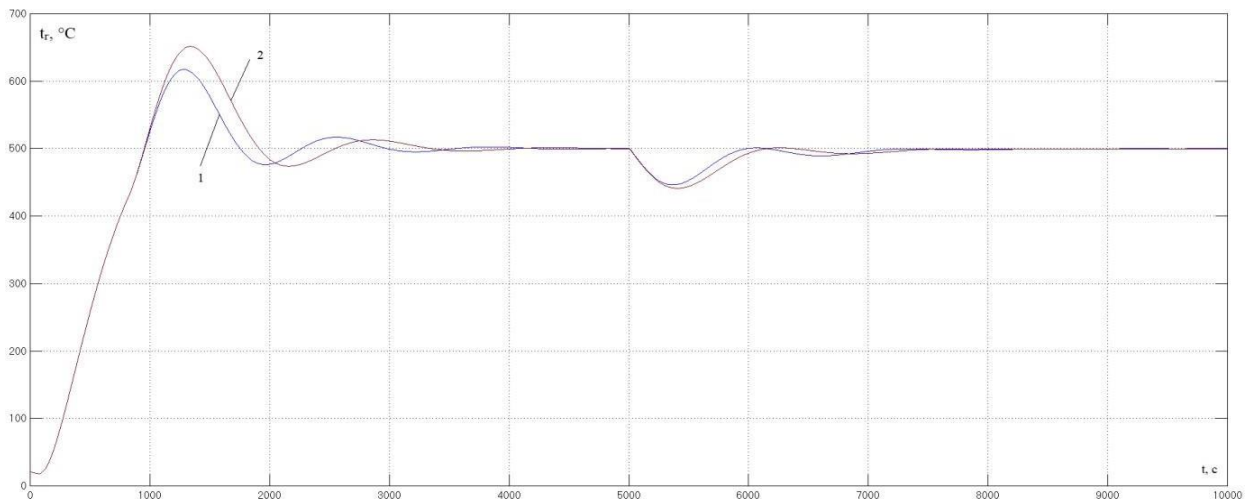


Рисунок 3.13 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при виході на номінальний режим: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку

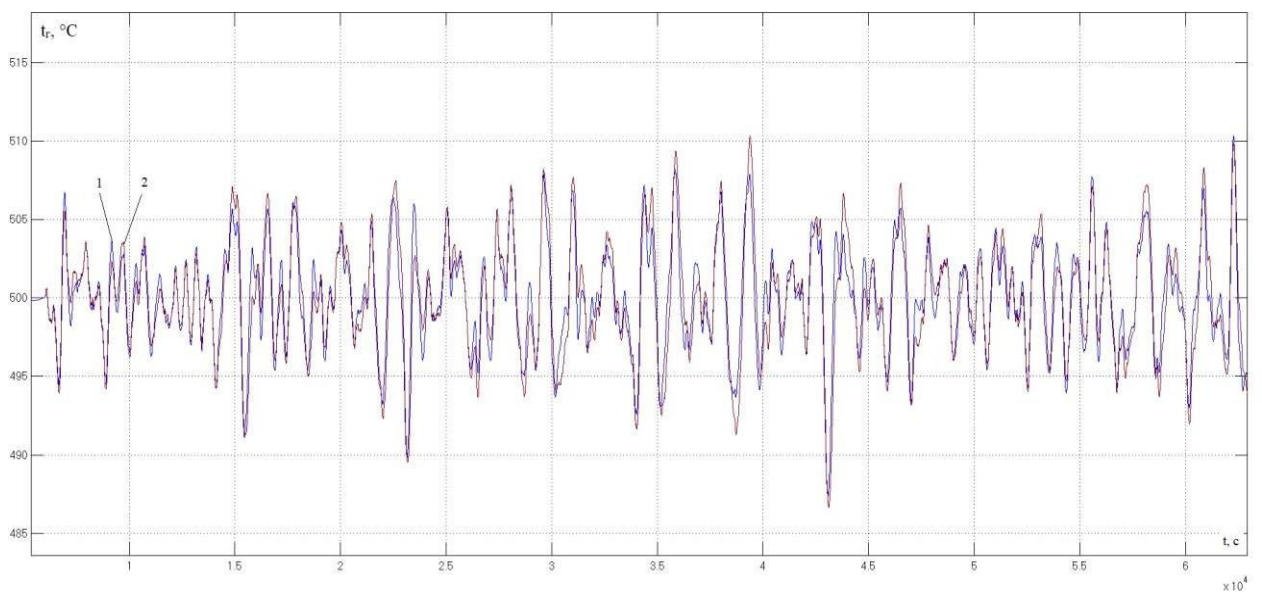


Рисунок 3.14 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при випадкових збурюючих впливах: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку

З рисунків можна побачити, що за якістю регулювання різні САК функціонують ідентично, як з традиційним, так і з нечітким регулятором.

Графіки перехідних процесів різні САК зливаються в один. Це отримано завдяки корегуванню параметрів нечіткого регулятора.

3.6. Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління.

Штучні нейронні мережі застосовуються в областях де людський інтелект малоефективний, а традиційні обчислення трудомісткі або фізично неадекватні. Застосування нейронних мереж актуалізується з необхідністю розв'язку погано формалізованих задач. Основні області застосування нейронних мереж: автоматизація процесів класифікації, прогнозування, розпізнавання, прийняття розв'язків; керування, кодування і декодування інформації; апроксимації залежностей та ін.

В різних предметних областях завжди є місце для застосування штучних нейронних мереж (ШНМ). 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. Великою перевагою цього регулятора є те що він 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 керуванні. 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 Маккалоха – Піттса. У даній моделі сигнали, що поступили на входи нейронелементу, множаться на свої ваги. Сигнал першого входу  $x_1$  множиться на відповідну вагу  $w_1$ . У підсумку отримуємо  $x_1w_1$ . І так до  $n$ -ого входу. У підсумку на останньому вході отримуємо  $x_nw_n$ . 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:

$$x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_nw_n = \sum_{i=1}^n x_iw_i \quad (3.4)$$

Для формування адекватного вихідного сигналу 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 керуючої дія як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейрорегулятора необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку буде використано гіперболічну тангенціальну функцію (tansig). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних

знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі керування. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.16.

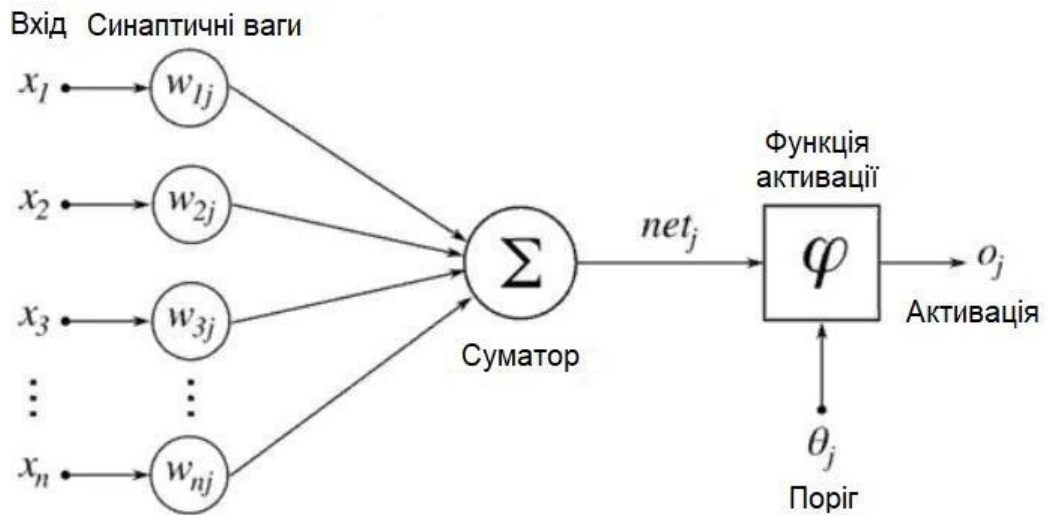


Рисунок 3.15 - Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

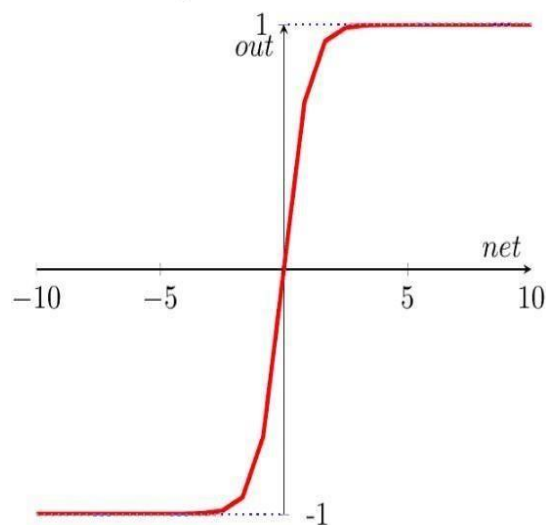


Рисунок 3.16 - Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

$$f(net) = \frac{2}{1 + \exp(-\alpha \cdot net)} - 1, \quad (3.5)$$

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 3.17. На рисунку 3.17 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.

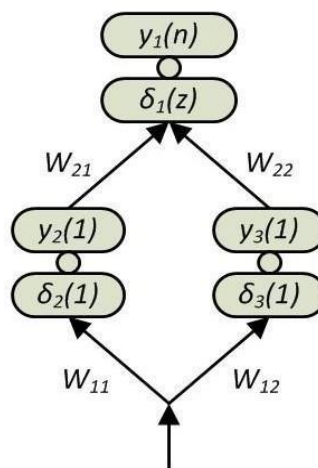


Рисунок 3.17 - Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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 керуючої дії.

Штучна нейронна 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 3.2).

Дані, представлені у таблиці 3.2, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

Таблиця 3.2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	$\Delta y$	$\Delta u$	$u$
1	-1000	-200	-0.1
2	-750	-150	-0.075
3	-500	-100	-0.05
4	-200	-40	-0.02
5	-25	-5	-0.0025
6	-20	-4	-0.002
7	-15	-3	-0.0015
8	-10	-2	-0.001
9	-5	-1	-0.0005
10	0	0	0
11	5	1	0.0005
12	10	2	0.001
13	15	3	0.0015
14	20	4	0.002
15	25	5	0.0025
16	200	40	0.02
17	500	100	0.05
18	750	150	0.075
19	1000	200	0.1

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 3.18.

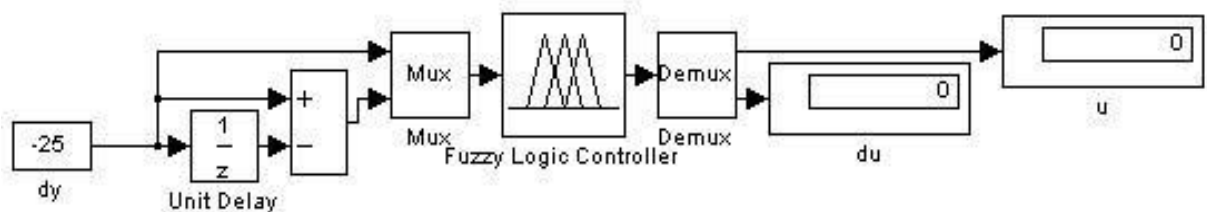


Рисунок 3.18 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.19 і 3.20 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у

командній строчці Matlab – command window, в результаті чого згенерується відповідна нейронна мережа.

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

```
» P=[-1000 -750 -500 -200 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 200 500 750 1000];
» t=[-0.2 -0.15 -0.1 -0.04 -0.005 -0.004 -0.003 -0.002 -0.001 0 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.04 0.1 0.15 0.2];
» net=newff([-1000 1000], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=200;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 0.62258/0, Gradient 404.795/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/200, MSE 2.14257e-006/0, Gradient 0.0604453/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/200, MSE 3.63336e-009/0, Gradient 0.0794295/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/200, MSE 1.46031e-010/0, Gradient 4.5302e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/200, MSE 1.17363e-010/0, Gradient 3.27849e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/200, MSE 9.52517e-011/0, Gradient 2.42055e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/200, MSE 4.84119e-011/0, Gradient 0.000861784/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/200, MSE 1.71643e-011/0, Gradient 9.32563e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/200, MSE 1.37671e-011/0, Gradient 1.45829e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

-0.2000 -0.1500 -0.1000 -0.0400 -0.0050 -0.0040 -0.0030

Columns 8 through 14

-0.0020 -0.0010 -0.0000 0.0010 0.0020 0.0030 0.0040

Columns 15 through 19

0.0050 0.0400 0.1000 0.1500 0.2000

gensim(net)
```

Рисунок 3.19 - Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

» P=[-1000 -750 -500 -200 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 200 500 750 1000];
» t=[-0.2 -0.15 -0.1 -0.04 -0.005 -0.004 -0.003 -0.002 -0.001 0 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.04 0.1 0.15 0.2];
»
» P=[-1000 -750 -500 -200 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 200 500 750 1000];
» t=[-0.1 -0.075 -0.05 -0.02 -0.0025 -0.002 -0.0015 -0.001 -0.0005 0 0.0005 0.001 0.0015 0.002 0.0025 0.02 0.05 0.075 0.1];
» net=newff([-1000 1000], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.596177/0, Gradient 259.49/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 4.51954e-005/0, Gradient 0.0758553/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 5.82849e-006/0, Gradient 0.011765/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 2.34042e-006/0, Gradient 0.00663727/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 1.39982e-006/0, Gradient 0.00385997/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 9.91536e-007/0, Gradient 0.0024712/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 7.67967e-007/0, Gradient 0.0017099/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 6.27883e-007/0, Gradient 0.00125349/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 5.32109e-007/0, Gradient 0.000959648/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 2.19521e-007/0, Gradient 0.00851435/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 1.41392e-007/0, Gradient 0.00361818/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 1.05187e-007/0, Gradient 0.00201157/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 8.39543e-008/0, Gradient 0.00128573/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

    -0.0992    -0.0758    -0.0499    -0.0196    -0.0025    -0.0020    -0.0015

Columns 8 through 14

    -0.0010    -0.0005    -0.0000     0.0005     0.0010     0.0015     0.0019

Columns 15 through 19

     0.0024     0.0198     0.0498     0.0750     0.1004

» gensim(net)

```

Рисунок 3.20 - Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.21, з яких можливо побачити, що десь на 120-му кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями пропорційної складової нейрорегулятора було закінчено, а інтегральної складової – на 270.

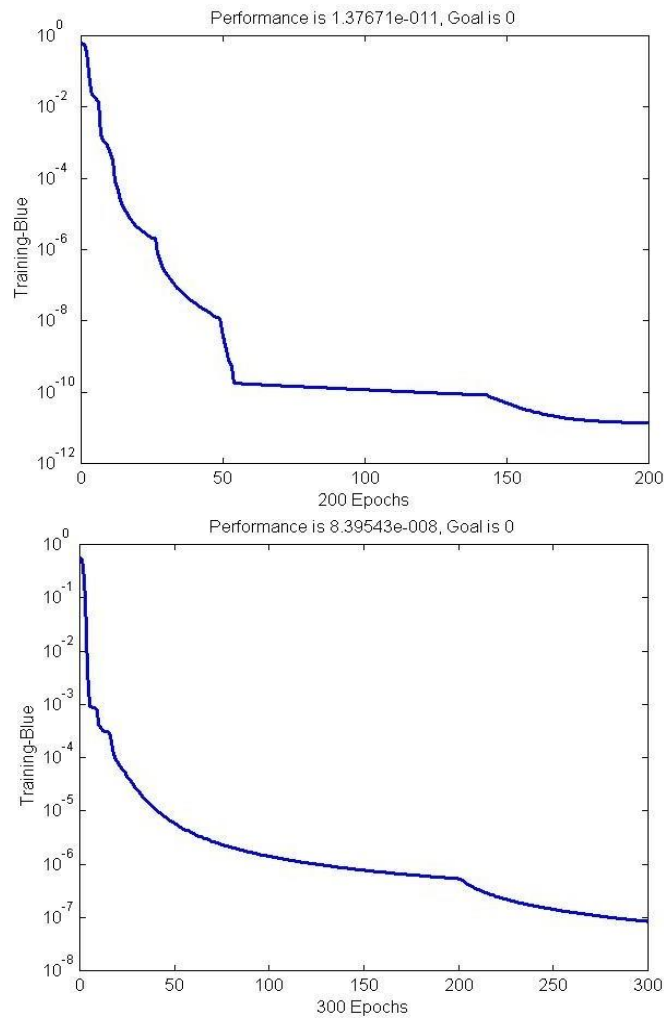


Рисунок 3.21 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі. На рисунках 3.22 та 3.23 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу всього вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову та II – складову нейрорегулятора відносної вологи окремо.

Фактичні значення:																		
-0.0992	-0.0758	-0.0499	-0.0196	-0.0025	-0.002	-0.0015	-0.001	-0.0005	0	0.0005	0.001	0.0015	0.0019	0.0024	0.0198	0.0498	0.0750	0.1004
Бажані значення:																		
-0.1	-0.075	-0.05	-0.02	-0.0025	-0.002	-0.0015	-0.001	-0.0005	0	0.0005	0.001	0.0015	0.002	0.0025	0.02	0.05	0.075	0.1

Рисунок 3.22 - Бажані та фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову нейрорегулятора

Фактичні значення:																		
-0.2	-0.15	-0.1	-0.04	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.04	0.1	0.15	0.2
Бажані значення:																		
-0.2	-0.15	-0.1	-0.04	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.04	0.1	0.15	0.2

Рисунок 3.23 - бажані та фактичні значення вихідного сигналу  $i$ -того вихідного нейрону НМ, що відтворює  $\Pi$  – складову нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених на рисунках 3.22 та 3.23, 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:

$$\delta_i(n) = (y_i(n) - d_i) \cdot y_i(n) \cdot (1 - y_i(n)) \quad (3.6)$$

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:

$$\delta_i(n) = y_i(n) \cdot (1 - y_i(n)) \cdot \sum w_{in+1} \cdot \delta_i(n+1) \quad (3.7)$$

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

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

- розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 3.22:

$$\delta_1(z) = (y_1(n) - d_1) \cdot y_1(n) \cdot (1 - y_1(n)) = (-0,0992 + 0,1) \cdot (-0,0992) \cdot (1 + 0,0992) = 0,000087;$$

- розрахунок помилки для  $i$ -тих нейронів прихованого шару:

$$\delta_2(n) = y_2(n) \cdot (1 - y_2(n)) \cdot w_{21} \cdot \delta_1(z) = 0,9998 \cdot (1 - 0,9998) \cdot (-0,0016711101739331142) \cdot 0,000087 = -0,0000000002907;$$

$$\delta_3(n) = y_3(n) \cdot (1 - y_3(n)) \cdot w_{31} \cdot \delta_1(z) = -0,4652 \cdot (1 + 0,4652) \cdot 2,1708301744111727 \cdot 0,000087 = -0,0001287.$$

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

Сформовані нейронні мережі були визначені у схемі моделювання замість нечіткого регулятора, як показано на рисунку 3.24. У такий спосіб була синтезована модель САК з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink.

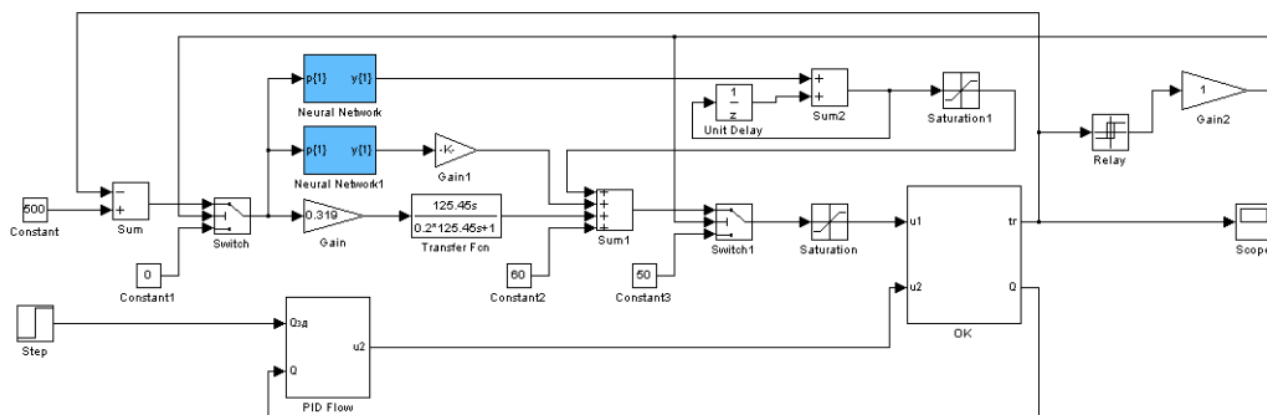


Рисунок 3.24 – Схема моделювання САК температури в реакторі з нейрорегулятором який представлений засобами середовища MATLAB\Simulink

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.25, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.24.

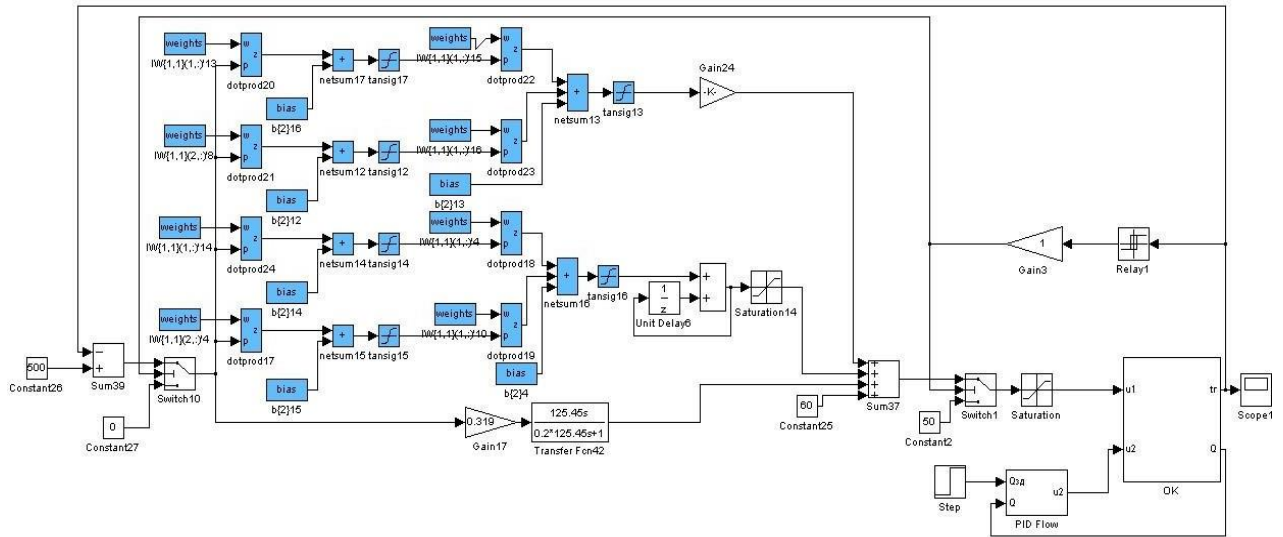


Рисунок 3.25 – Схема моделювання нейронного регулятора

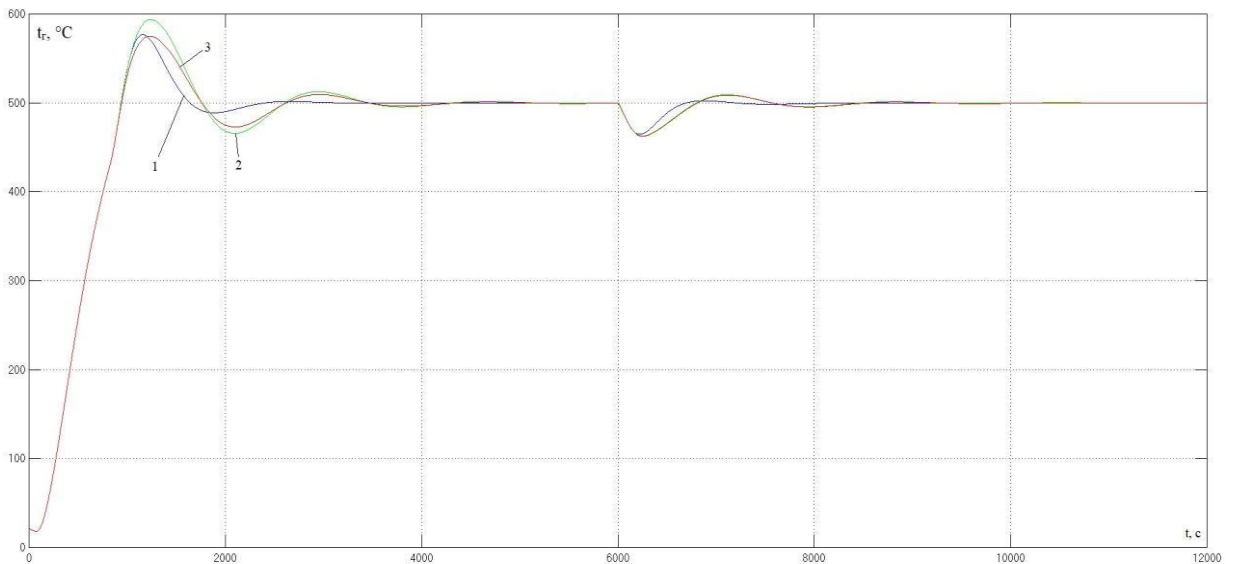


Рисунок 3.26 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при виході на номінальний режим: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нейронним регулятором

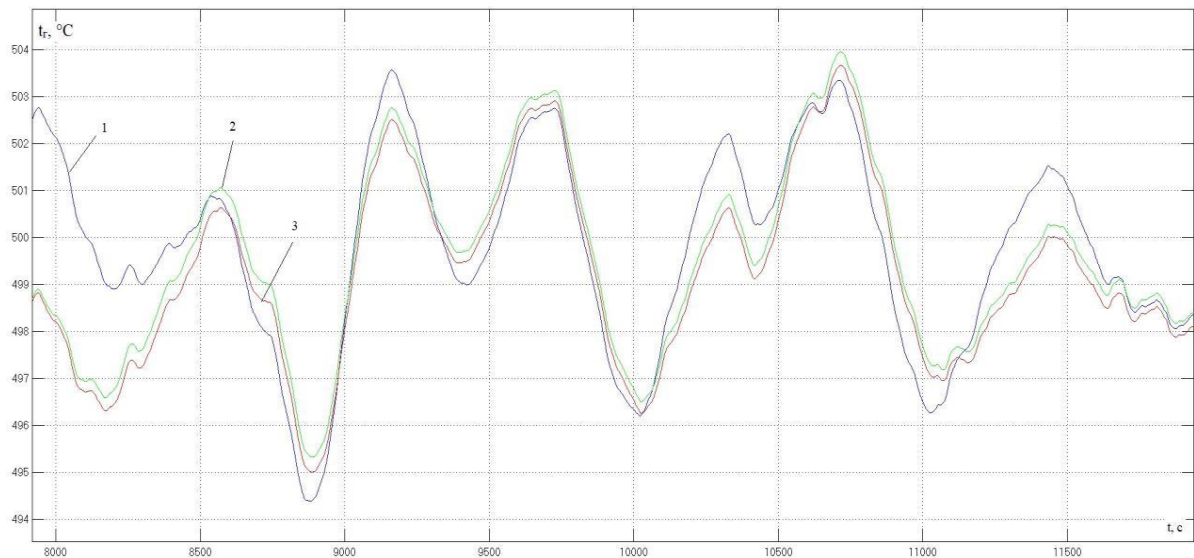


Рисунок 3.27 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при випадкових збурюючих впливах: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нейронним регулятором

У результаті моделювання САК з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САК з нечітким регулятором та традиційним ПІД-регулятором. Ці графіки представлені на рисунках 3.26 та 3.27. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором працює гірше, ніж САК з традиційним регулятором. Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування в складає 2000 секунд для САК з традиційним регулятором, 2500 секунд для САК з нейрорегулятором та нечітким регулятором Сугено. Але при детермінованому збурюючому впливі у САК з нейрорегулятором час регулювання більший ніж в САК з традиційним регулятором. Максимальне динамічне відхилення з нейрорегулятором більше ніж в інших САК, як показано на рисунку 3.27. При цьому регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має вісім ваг між нейронних з'єднань, тобто параметри які можна оптимізувати для додаткового

покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.25, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

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

### 3.8. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором.

Для покращення якості регулювання проведена параметрична оптимізація САК з нейронним регулятором. Оптимізувались чотири вагових коефіцієнти нейронних з'єднань першого вхідного шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась в таких же умовах і з тим же інтегральним показником якості, які були при оптимізації САК з традиційним ПД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 визначена структурна схема моделі САК з нейронним ПД регулятором і параметричним оптимізатором для визначення оптимальних налаштувань системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання, що зображена на рисунку 3.28.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, оптимальні визначені ваги між-нейронних з'єднань першого шару нейронної мережі та результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації при визначеному інтегральному критерії якості роботи системи, що зображені на рисунку 3.29.

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

Результати параметричної оптимізації показують, що нейрорегулятор на відміну від традиційного та нечіткого регуляторів, має велику можливість

налаштування під обраний об'єкт з нелінійною статичною характеристикою каналів регулювання.

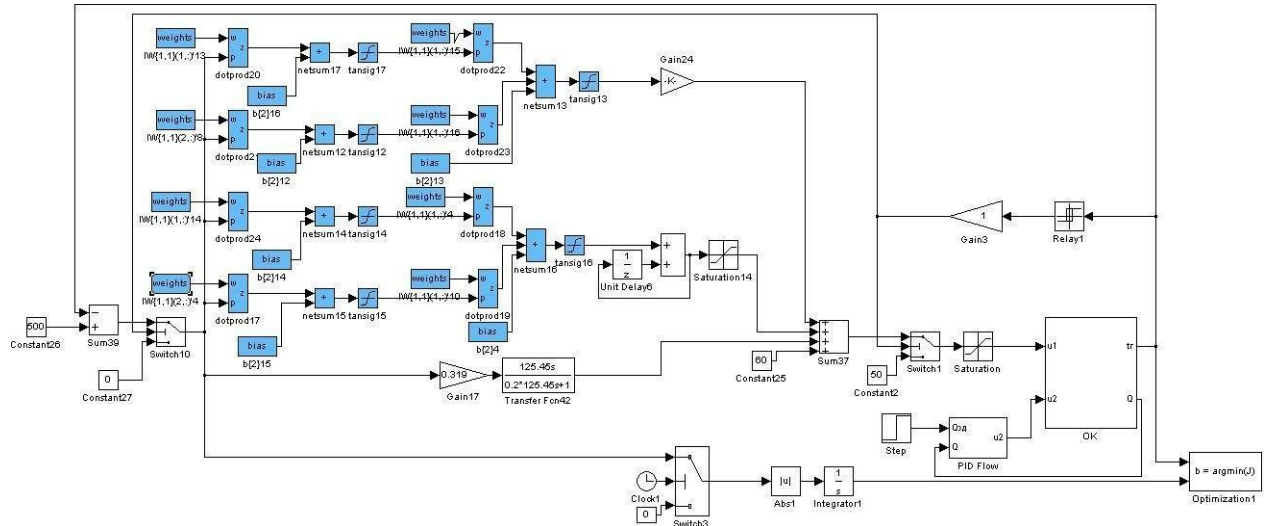
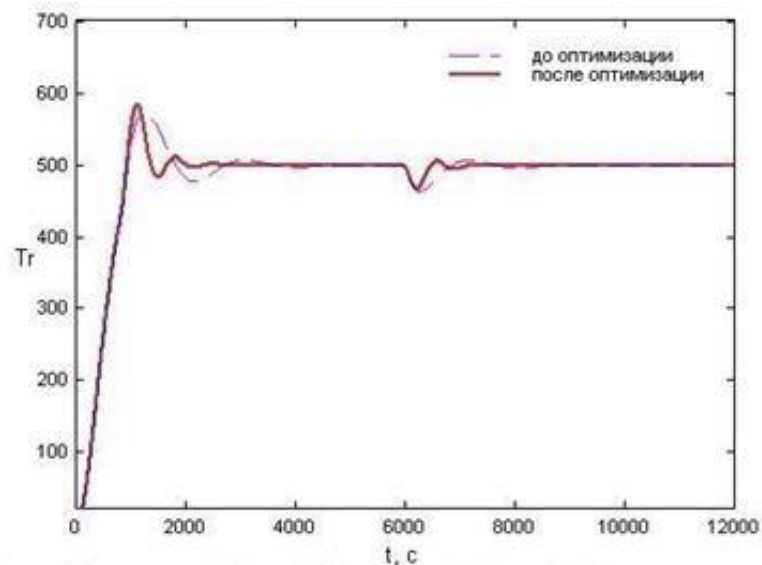


Рисунок 3.28 – Структурна схема моделі САК з нейронним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB Simulink для визначення оптимальних налаштувань системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности: до - 25877.3363 после - 13469.3087 оптимизации.
w1	-0.0010598	-1	-0.00021	1	
w2	4.8334e-006	-1	0.00023	1	
w3	0.0091777	-1	-0.009	1	
w4	8.318e-005	-1	0.00005	1	
					Количество шагов процедуры оптимизации: максимальное - 1500 фактическое - 230

Рисунок 3.29 – Результати параметричної оптимізації значень параметрів нейронного регулятора САК з каналом регулювання, що характеризується нелінійною статичною характеристикою

Після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора стійкість САК при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні  $\pm 20\%$ . Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, представлені на рисунку 3.30. З рисунку 3.30 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 контролеру для практичного застосування його у відповідній системі керування.

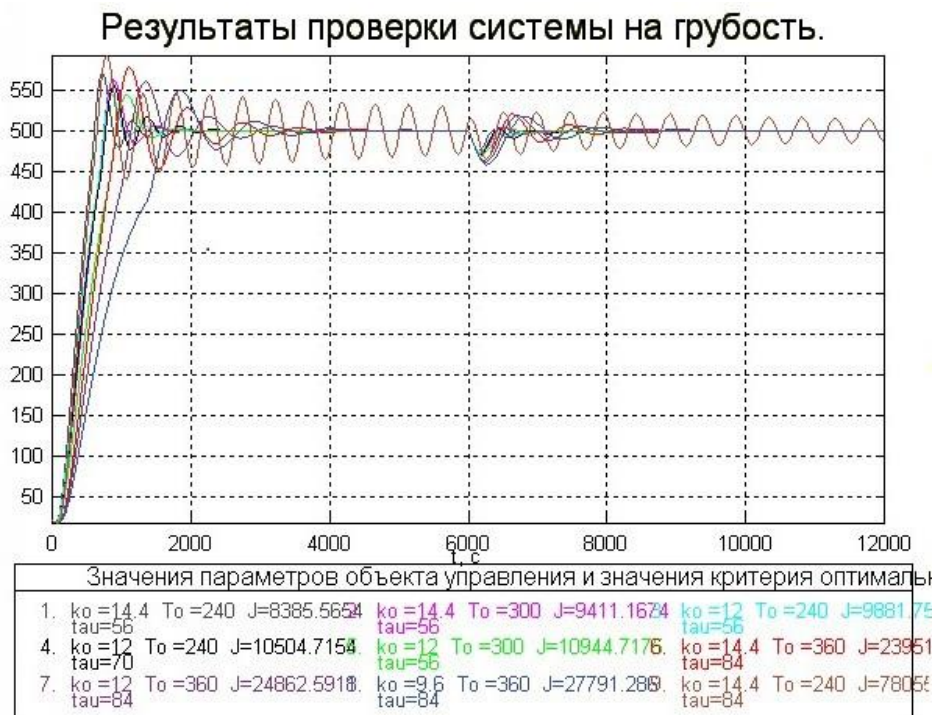


Рисунок 3.30 – Вікно результатів перевірки САК з нейронним ПД-регулятором на грубість

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

На заключному етапі розробки САК виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САК за виходом системи на номінальний режим функціонування, що показані на рисунку 3.31. Також у результаті моделювання були отримані відповідні графіки перехідних процесів при випадкових збурюючих впливах, що відображені на рисунку 3.32. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування менший при САК з традиційним та нейрорегулятором, ніж при САК з нечітким регулятором, але при випадкових збурюючих впливах, різниця в якості регулювання різних САК практично непомітна.

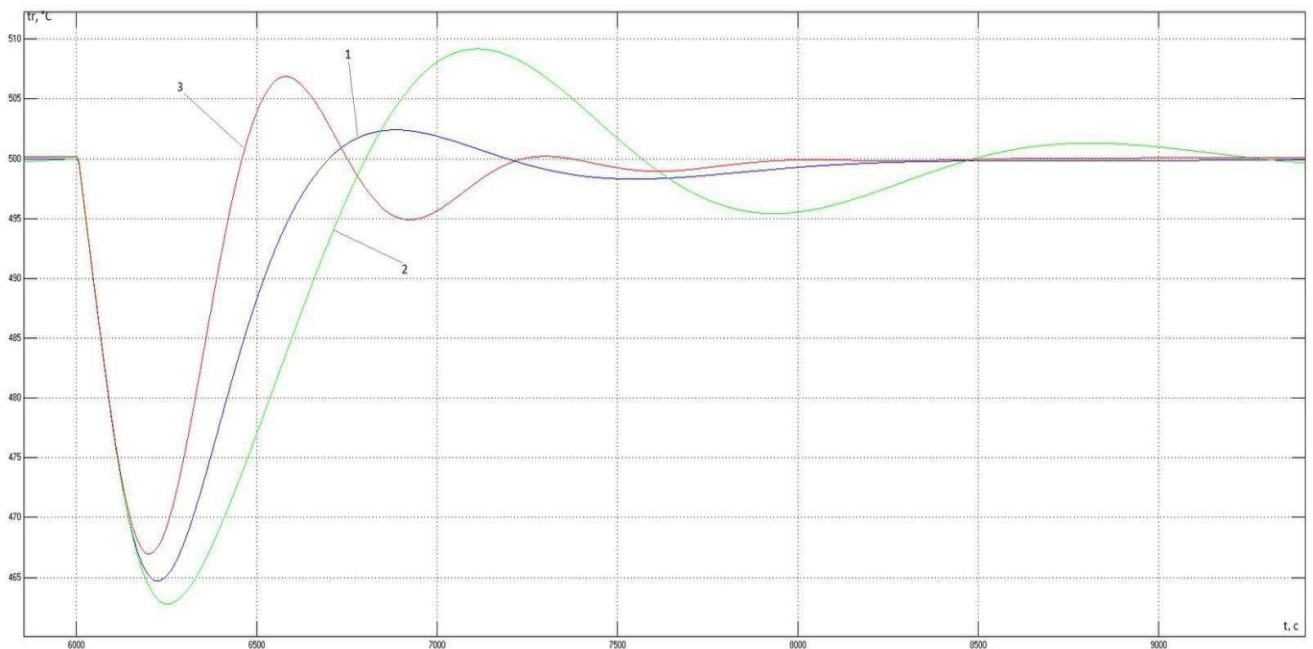


Рисунок 3.31 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при виході на номінальний режим: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нейронним регулятором

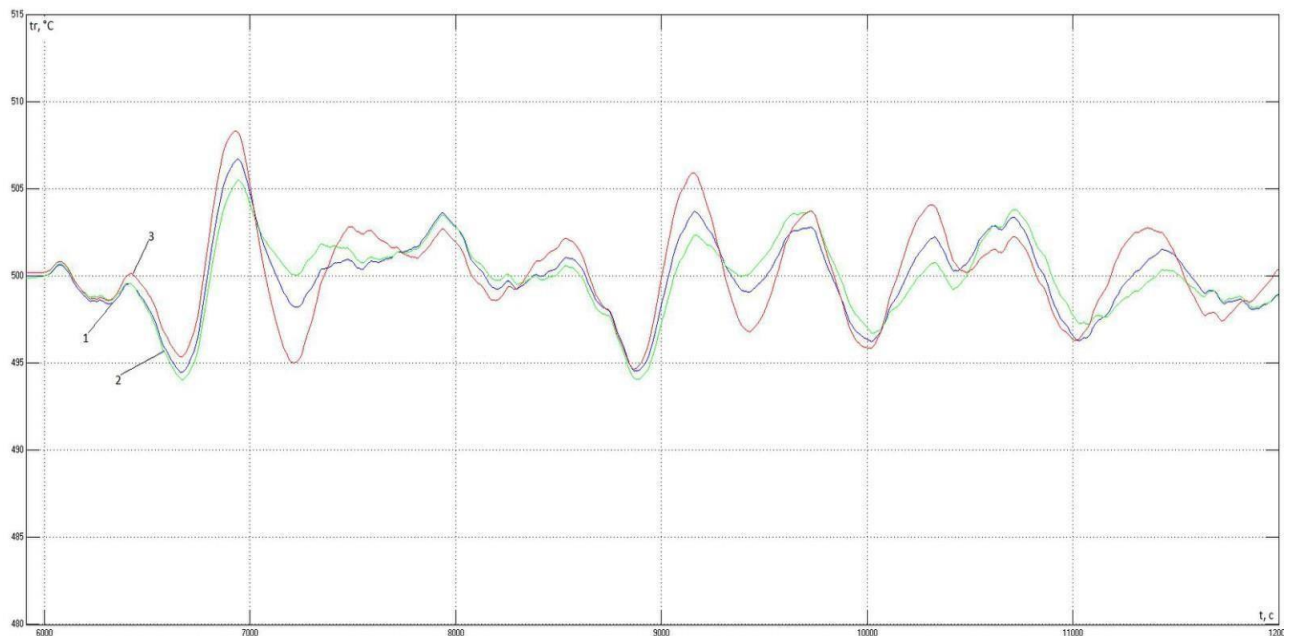
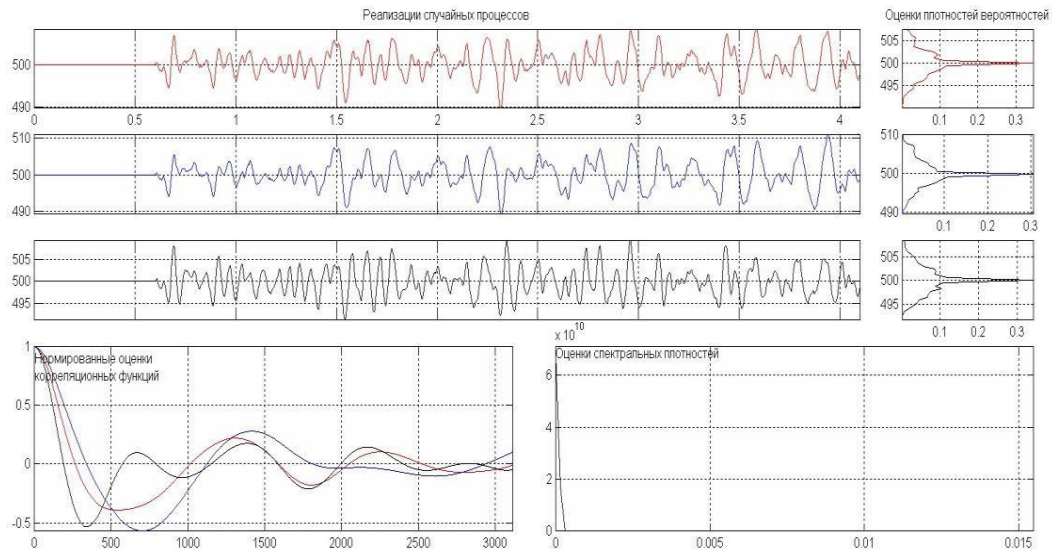


Рисунок 3.32 - Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САК при випадкових збурюючих впливах: графік 1 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САК з традиційним ПД-регулятором; графік 3 – перехідний процес у САК з нечітким регулятором Сугено 0-порядку; графік 3 – перехідний процес у САК з нейронним регулятором

За допомогою аналізатора імовірнісних характеристик, що вбудований у середовище MATLAB\Simulink, визначена якість регулювання різних САК при випадкових збурюючих впливах. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання САК з традиційним ПД-регулятором, з нечітким регулятором Сугено 0-порядку та САК з нейронним регулятором при випадкових збурюючих впливах. Результати представлені на рисунку 3.33, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання різних САК.



Числовые оценки по всему интервалу моделирования	Номер процесса		
	1	2	3
Оценка среднего значения (математического ожидания)	500.0	500.0	500.0
Оценка среднеквадратического отклонения	3.0	3.5	2.9
Оценка среднеквадратического периода / частоты	901.1 / 0.007	1038.0 / 0.0061	811.9 / 0.0077

Рисунок 3.33 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

З рисунку 3.33 можна побачити, що за середньо квадратичним відхиленням САК з традиційним ПІД-регулятором, САК з нейронним регулятором і САК з нечітким регулятором функціонують практично ідентично. В кінцевому випадку показники функціонування різних САК за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3– Показники якості регулювання різних САК

Критерій	САК		
	САК з традиційним ПІД регулятором	САК з нечітким регулятором Сугено 0- порядку	САК з нейронним регулятором
Час регулювання	519	659	389
Максимальне динамічне відхилення	35,32	37,22	33
Інтегральний показник	90110,283	105588,088	89135,716
Середнє квадратичне відхилення	3,0	3,5	2,9

З таблиці 3.3 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САК з нейронним регулятором функціонує краще ніж САК з традиційним регулятором і ще краще ніж САК з нечітким регулятором.

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

Генерування коду у структурованому текстовому форматі з моделі Simulink для промислових систем керування можна автоматично отримати за допомогою Simulink PLC Coder. Для генерації коду використана програма Matlab версії 2022b. Розроблена програма для ПЛК CoDeSys V2.3.

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 CoDeSys V2.3 наступний:

```
(*
*
*   File: Neuro_prog_1.exp
*
*   IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for
*   subsystem "Neuro_prog_1/Subsystem"
*
*   Model name           : Neuro_prog_1
*   Model version        : 1.1
*   Model creator        : Centurion
*   Model last modified by : Centurion
*   Model last modified on  : Wed May 31 17:51:25 2023
*   Model sample time    : 0s
```

```

* Subsystem name : Neuro_prog_1/Subsystem
* Subsystem sample time : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 3.7 (R2022b) 13-May-2022
* ST code generated on : Wed May 31 15:19:43 2023 *
* Target IDE selection : 3S CoDeSys 2.3
* Test Bench included : No
*
*)

```

```

FUNCTION_BLOCK Subsystem VAR_INPUT

```

```

    ssMethodType: SINT;    sp: LREAL;    pv: LREAL;

```

```

END_VAR VAR_OUTPUT

```

```

    u: LREAL;

```

```

END_VAR

```

```

VAR

```

```

    Gain17: LREAL;

```

```

    DiscreteFilter: LREAL;

```

```

    DiscreteFilter_tmp: LREAL;

```

```

    UnitDelay6_DSTATE: LREAL;

```

```

    Relay2_Mode: BOOL;

```

```

    DiscreteFilter_states: ARRAY [0..2] OF LREAL;

```

```

END_VAR VAR_TEMP

```

```

    rtb_UnitDelay6: LREAL;    rtb_Sum38: LREAL;    temp1: LREAL;    temp2:
LREAL;    temp3: LREAL;    temp4: LREAL;

```

```

END_VAR

```

```

CASE ssMethodType OF    SS_INITIALIZE:        plc_ts_counter1 := 0;

```

```

    (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/Subsystem' *)

```

```

    (* InitializeConditions for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter' *)

```

```

    DiscreteFilter_states[0] := 0.0;

```

```

    DiscreteFilter_states[1] := 0.0;

```

```

    DiscreteFilter_states[2] := 0.0;

```

```

    (* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay6' *)

```

```

UnitDelay6_DSTATE := 0.0;
(* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/Subsystem' *)
SS_STEP:
(* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Subsystem' *)      (* Relay:
'<S1>/Relay2' incorporates:
    * Inport: '<Root>/pv' *)
IF pv >= 400.0 THEN
    Relay2_Mode := TRUE;
ELSIF pv <= 400.0 THEN
    Relay2_Mode := FALSE;
END_IF;
IF Relay2_Mode THEN
    u := 1.0;
    (* Switch: '<S1>/Switch10' incorporates:
    * Sum: '<S1>/Sum39' *)      rtb_UnitDelay6 := sp - pv;      ELSE
u := 0.0;
    (* Switch: '<S1>/Switch10' incorporates:      * Constant:
'<S1>/Constant27' *)      rtb_UnitDelay6 := 0.0;
END_IF;
(* End of Relay: '<S1>/Relay2' *)
(* Gain: '<S1>/Gain17' *)
Gain17 := 0.319 * rtb_UnitDelay6;
IF plc_ts_counter1 = 0 THEN
    (* DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter' *)
    DiscreteFilter_tmp := (Gain17 - (258.0 * DiscreteFilter_states[0])) / 259.0;
    (* DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter' *)
        DiscreteFilter := (((1254.0 * DiscreteFilter_tmp) +
(5.0 *
DiscreteFilter_states[0])) + (-1254.0 * DiscreteFilter_states[1])) +
(5.0 *
DiscreteFilter_states[2]);

```

END\_IF;

(\* Sum: '<S1>/Sum38' incorporates:

- \* Constant: '<S12>/one'
- \* Constant: '<S12>/one1'
- \* Constant: '<S13>/one'
- \* Constant: '<S13>/one1'
- \* Constant: '<S14>/one'
- \* Constant: '<S14>/one1'
- \* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)10'
- \* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)14'
- \* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)4'
- \* Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:)4'
- \* Constant: '<S1>/b{2}4'
- \* Gain: '<S12>/Gain'
- \* Gain: '<S12>/Gain1'
- \* Gain: '<S13>/Gain'
- \* Gain: '<S13>/Gain1'
- \* Gain: '<S14>/Gain'
- \* Gain: '<S14>/Gain1'
- \* Math: '<S12>/Math Function'
- \* Math: '<S12>/Math Function1'
- \* Math: '<S13>/Math Function'
- \* Math: '<S13>/Math Function1'
- \* Math: '<S14>/Math Function'
- \* Math: '<S14>/Math Function1'
- \* Product: '<S16>/Product'
- \* Product: '<S17>/Product'
- \* Product: '<S18>/Product'
- \* Product: '<S23>/Product'
- \* Sum: '<S12>/Sum'
- \* Sum: '<S12>/Sum1'

```

* Sum: '<S13>/Sum'
* Sum: '<S13>/Sum1'
* Sum: '<S14>/Sum'
* Sum: '<S14>/Sum1'
* Sum: '<S1>/netsum14'
* Sum: '<S1>/netsum15'
* Sum: '<S1>/netsum16'
* UnitDelay: '<S1>/Unit Delay6'
*
* 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 '<S14>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S14>/Math Function1':
* Operator: reciprocal *)    temp1 := EXP(((0.0091777 * rtb_UnitDelay6) -
5.1613352687052076) * -2.0);    temp2 := EXP(((8.318E-5 * rtb_UnitDelay6) -
0.44885267739389123) * -2.0);    rtb_Sum38 := (((1.0 / (EXP((((((1.0 / (temp1
+ 1.0)) * 2.0) - 1.0) * -0.001798) +
((((1.0 / (temp2 + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 2.171)) + 0.91212588137328865) * -2.0) +
1.0)) * 2.0) - 1.0) + UnitDelay6_DSTATE;

```

(\* Switch: '<S1>/Switch4' incorporates:

- \* Constant: '<S10>/one'
- \* Constant: '<S10>/one1'
- \* Constant: '<S11>/one'
- \* Constant: '<S11>/one1'
- \* Constant: '<S15>/one'
- \* Constant: '<S15>/one1'
- \* Constant: '<S1>/Constant25'
- \* Constant: '<S1>/Constant7'
- \* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)'13'
- \* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)'15'
- \* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)'16'
- \* Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:)'8'
- \* Gain: '<S10>/Gain'
- \* Gain: '<S10>/Gain1'
- \* Gain: '<S11>/Gain'
- \* Gain: '<S11>/Gain1'
- \* Gain: '<S15>/Gain'
- \* Gain: '<S15>/Gain1'
- \* Gain: '<S1>/Gain24'
- \* Math: '<S10>/Math Function'
- \* Math: '<S10>/Math Function1'
- \* Math: '<S11>/Math Function'
- \* Math: '<S11>/Math Function1'
- \* Math: '<S15>/Math Function'
- \* Math: '<S15>/Math Function1'
- \* Product: '<S19>/Product'
- \* Product: '<S20>/Product'
- \* Product: '<S21>/Product'
- \* Product: '<S22>/Product'
- \* Sum: '<S10>/Sum'

```

* Sum: '<S10>/Sum1'
* Sum: '<S11>/Sum'
* Sum: '<S11>/Sum1'
* Sum: '<S15>/Sum'
* Sum: '<S15>/Sum1'
* Sum: '<S1>/Sum37'
* Sum: '<S1>/netsum12'
* Sum: '<S1>/netsum13'
* Sum: '<S1>/netsum17'
*
* 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 '<S15>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S15>/Math Function1':
* Operator: reciprocal *)
IF u >= 1.0 THEN
    (* Saturate: '<S1>/Saturation14' *) IF rtb_Sum38 > 100.0 THEN
        u := 100.0;
    ELSIF rtb_Sum38 >= -100.0 THEN u := rtb_Sum38;
ELSE

```

```

    u := -100.0;
END_IF;
(* End of Saturate: '<S1>/Saturation14' *)      temp3 := EXP((-
0.0010598 * rtb_UnitDelay6) - 1.0587196123426126) * -2.0);      temp4 :=
EXP(((4.8334E-6 * rtb_UnitDelay6) - 1.0587263650887493) * -2.0);      u :=
(((((((1.0 / (EXP(((((((1.0 / (temp3 + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * -1.2328) + (((1.0 / (temp4
+ 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 1.077)) - 0.14131623373286345) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0)
*
1000.0) + u) + DiscreteFilter) + 60.0;
ELSE      u := 50.0;
END_IF;
(* End of Switch: '<S1>/Switch4' *)
(* Saturate: '<S1>/Saturation3' *)
IF u > 100.0 THEN
    (* Output: '<Root>/u' *)
    u := 100.0;
ELSIF u < 0.0 THEN
    (* Output: '<Root>/u' *)      u := 0.0;
END_IF;
(* End of Saturate: '<S1>/Saturation3' *)
IF plc_ts_counter1 = 0 THEN
    (* Update for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter' *)
    DiscreteFilter_states[2] := DiscreteFilter_states[1];
    DiscreteFilter_states[1] := DiscreteFilter_states[0];
    DiscreteFilter_states[0] := DiscreteFilter_tmp;
END_IF;
(* Update for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay6' *)
UnitDelay6_DSTATE := rtb_Sum38;
(* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Subsystem' *)      IF
plc_ts_counter1 >= 9 THEN      plc_ts_counter1 := 0;      ELSE
    plc_ts_counter1 := plc_ts_counter1 + 1;

```

```
    END_IF;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK
VAR_GLOBAL CONSTANT
    SS_INITIALIZE: SINT := 0;
    SS_STEP: SINT := 1;
END_VAR
VAR_GLOBAL
    plc_ts_counter1: DINT;
END_VAR
```

Програма представлена структурованою мовою управління Structured Text (ST), за синтаксисом близька до Pascal; Structured Text (ST) — мова програмування стандарту IEC61131-3. Призначена для програмування промислових контролерів і операторських станцій. Основою ST-програми є вираження. Вираження складаються з операндів (констант і змінних) і операторів.

### 3.11. Висновки за розділом.

В процесі виконання роботи розглянуто не лінійність об'єкту, розроблено модель САК з традиційним та САК з нечітким регулятором. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Визначено функції приналежності до нечітких множин, сформовано бази правил функціонування регуляторів у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначено алгоритми нечіткого виводу – Сугено 0-порядку.

Встановлено, що за якістю регулювання такі САК функціонують приблизно однаково, а можливо трохи краще, ніж САК з традиційним ПІД-регулятором при об'єкті керування з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої реалізації параметричної оптимізації САК за характеристиками нечіткого регулятора виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може, виконувати роль нейрорегулятора. Тренування штучної нейронної мережі виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink. Розроблена модель САК з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором проведена при тих же умовах, що і САК з традиційним ПІД регулятором.

У результаті моделювання різних САК було встановлено, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САК, це за інтегральним показником якості регулювання відповідно 89135,716 у САК з нейрорегулятором і 90110,283 у САК з традиційним ПІД-регулятором. Середнє квадратичне відхилення регульованої зміни від заданого значення, при випадкових впливах, що збурюють, практично однаково як у САК з традиційним ПІД-регулятором 3,0, так і у САК з нейрорегулятором 2,9.

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора була сформована програма для промислового контролера.

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

## РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА САК ПРОЦЕСОМ КАТАЛІТИЧНОЇ ОЧИСТКИ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ, 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 каталітичної очистки інертних газів 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 каталітичної очистки інертних газів є температура продукту на виході з реактору  $T_k$ .

В даному випадку на температуру продукту на виході з реактору регламентом накладаються обмеження від  $420^{\circ}\text{C}$  до  $550^{\circ}\text{C}$ . Такі значення зумовлені особливостями перебігу каталітичної реакції. Якість очищення продукту оцінюють за допомогою контролю температури продукту на виході з реактору. Експериментальним шляхом визначено, що  $420^{\circ}\text{C}$  - це нижня межа гарантування повної очистки продукту від вуглеводнів. Варто зазначити що вихід за нижнє обмеження по температурі створює можливість аварійної ситуації та може призвести до аварійної зупинки обладнання, втрат сировини та зниження якості продукту. Водночас, за допомогою контролю температури продукту на виході з реактору оцінюють стан каталітичного наповнювача. Експериментальним шляхом визначено, що  $550^{\circ}\text{C}$  - це верхня температурна межа експлуатації каталізатора, перетин якої може призводити до руйнування наповнювача реактора, створювати аварійну ситуацію, знижувати якість продукції та енергоефективність виробництва, та змушує мати великий штаб персоналу та ремонтних служб. Хоча перетин верхньої межі призводить до більш серйозних та небезпечних наслідків, доцільно підтримувати

температуру продукту на виході з ректора якомога ближче до неї, оскільки збільшення температури напряду залежить від збільшення витрат сировини – тобто збільшення продуктивності виробництва. В нашому випадку функція знаходиться за межами регламенту (рисунок 4.1). Також, оскільки за рахунок введення рекуператора в конструкцію агрегату більша частина тепла з готового продукту витрачається на попередній підігрів сировини перед електричним нагрівачем, збільшення температури продукту на виході з реактора (за рахунок збільшення витрат сировини) дозволяє зменшити витрати електроенергії. Тобто, підтримання температури продукту на виході з реактора якомога ближче до  $550^{\circ}\text{C}$  підвищує продуктивність і енергоефективності виробництва в цілому.

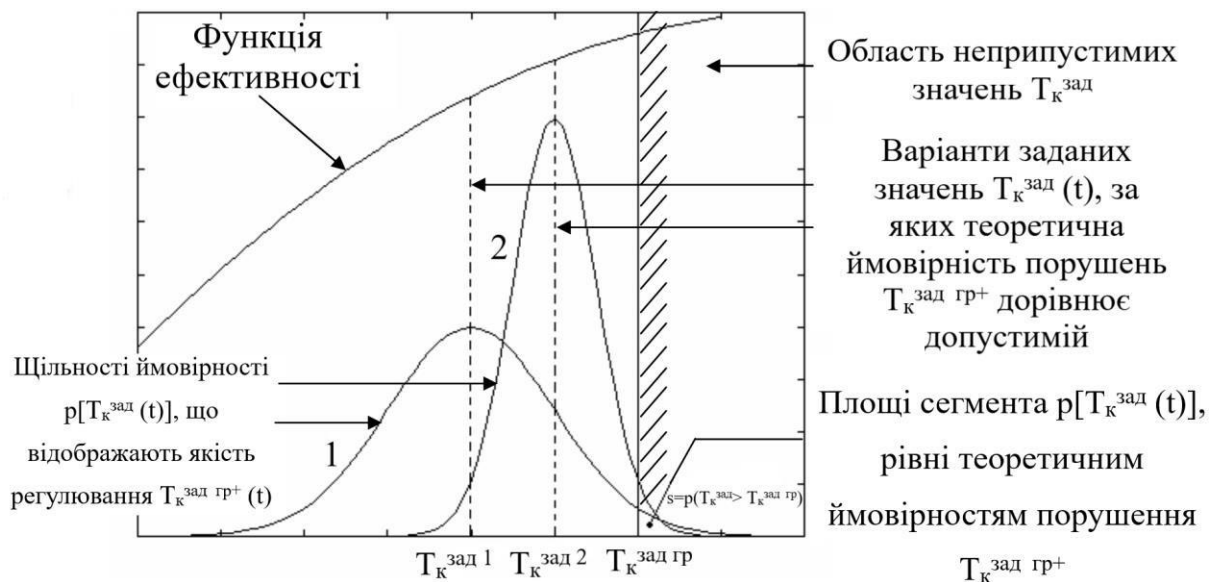


Рисунок 4.1 – Функція ефективності процесу каталітичної очистки інертних газів

Оскільки ОК є суттєво нелінійним, має запізнення в каналах керування, схильний до впливу різного типу збурень задане значення температури продукту на виході з реактора для САР базової структури необхідно встановлювати на рівні, суттєво віддаленому від верхньої межі  $550^{\circ}\text{C}$ . 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.

4.2. Вибір і опис принципу реалізації функції гарантування дотримання обмежень температури на виході з реактора.

Концепція побудови таких систем полягає у безперервному оцінюванні (на кожному 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  $\hat{P}_S(u^{rp\pm}, T, t)$ , тобто відсутності події  $S = S$  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:

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

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

$\tilde{y}$  - центрований випадковий процес, що володіє властивостями диференційності, нормальності та квазістаціонарності на  $T \gg T_{KCT}$ ;

$T_{KCT}$  - мінімальний інтервал часу, де виконується умова квазістаціонарності  $\tilde{y}(t)$ .

- потік подій  $S(t)$  є пуассонівським, тобто ймовірність події  $S$  (відсутності  $S$ ) визначається з виразу:

$$P_S(y^{gp\pm}, T) = \exp\{-n_S(y^{gp\pm})T\} = \exp\{N_S(y^{gp\pm}, T)\}, \quad (4.2)$$

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

$N_S(y^{gp\pm}, T)$  – 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 апіорі 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  $\hat{n}(y^{gp\pm}, T)$ . Вихідною інформацією цих розрахунків є результати оцінювання імовірнісних характеристик процесу  $y(t)$  і значення  $y^{gp\pm}$ . 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  $m_y(t) = m_y = \text{const} \forall t \in T_{\text{кст}}$  –

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

б)  $m_y(t)$  є сумою постійної та гармонійної (з випадковою початковою фазою) функцій часу квазістаціонарних на  $T_{\text{кст}}$ , тобто  $m_y(t) = m_y + A_y(\sin \omega_y t + \varphi_y)$ ,

$\varphi_y \in \{-\pi; \pi\}$  –

$$\hat{n}(y^{gp\pm}, t) = \frac{\hat{\Gamma}\omega_y}{2\hat{\pi}\hat{\sigma}_y} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi' \left( \frac{y^{gp\pm} - \hat{m}_y - \hat{A}_y \cos\psi_y}{\hat{\sigma}_1} \right) \times$$

$$\times \left\{ \Phi' \left( \frac{\hat{\omega}_y \Delta y}{\hat{\sigma}_y} \sin(\omega_y t + \hat{\varphi}_y) + \frac{\hat{\omega}_y \Delta y}{\hat{\sigma}_y} \sin \psi_y \right) \Phi \left( \frac{\hat{\omega}_y \Delta y}{\hat{\sigma}_y} \sin \psi_y \right) \right\} d\psi_y; \quad (4.4)$$

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

$$\hat{H}_s(y^{gp\pm}, t) = \frac{\hat{\sigma}_y}{2\sqrt{\pi}\hat{\sigma}_y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{sign} \Delta y^\pm \left[ \frac{y^{gp\pm} - \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right]^2 \right\} \times \\ \times \left\{ \exp \left( -\frac{\hat{m}_y(t)}{2\hat{\sigma}_y} \right) \mp \sqrt{\pi} \frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \Phi \left( \mp \frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right) \right\}, \quad (4.5)$$

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

ймовірності та його похідна;

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

$\hat{m}_y(t), \hat{m}_y'(t)$  – 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:

$$\hat{m}_y = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} y(t) dt, \quad \hat{m}_y' = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \dot{y}(t) dt, \quad \hat{m}_y(t) = \frac{1}{T_m} \int_{t+T}^{t+T+T_m} y(t) dt, \quad \hat{m}_y'(t) = \frac{1}{T_m} \int_{t+T}^{t+T+T_m} \dot{y}(t) dt; \\ \hat{\sigma}_y^2 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^2 dt, \quad \hat{\sigma}_y'^2 = \frac{1}{T_m} \int_{t+T}^{t+T+T_m} (\dot{y}(t) - \hat{m}_y')^2 dt, \quad (4.6) \\ \hat{\mu}_y^4 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^4 dt, \quad \hat{\mu}_y'^4 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_y')^4 dt.$$

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

$$\hat{\sigma}_{y1}^2 = \hat{\sigma}_y^2 - \sqrt{2} \left( \hat{\sigma}_y - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y \right) = \hat{\sigma}_y - \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{\mu}_y^2, \quad \hat{\sigma}_{y1}'^2 = \hat{\sigma}_y'^2 - \sqrt{2} \left( \hat{\sigma}_y' - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y' \right) = \hat{\sigma}_y'^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \hat{\mu}_y'^2; \\ \hat{A}_y = \sqrt{2} \sqrt{2} \left( \hat{\sigma}_y - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y \right); \quad \hat{A}_{y'} = \sqrt{2} \sqrt{2} \left( \hat{\sigma}_y' - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y' \right); \quad \hat{\varphi}_y = \hat{A}_{y'} / \hat{A}_y, \quad (4.7)$$

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

$\hat{\mu}_y, \hat{\mu}_y'$  – оцінки четвертих центральних моментів  $u_c(t)$  на інтервалі  $T_{кст}$ .

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

$$а) \quad y^{3ДД\pm}(t) = y^{rp\pm} \mp \hat{\sigma}_y \sqrt{2 \ln \left( \frac{T\sigma}{2\pi\hat{\sigma}_y} \ln \left( \frac{1}{P_S^\Gamma(y^{rp\pm}, T)} \right) \right)}; \quad (4.8)$$

$$б) \quad y^{3ДД\pm}(t) = y^{rp\pm} \mp \hat{\sigma}_{y1} \sqrt{2 \ln \left( \frac{T\hat{\sigma}_{y1}}{2\pi\hat{\sigma}_{y1}} \ln \left( \frac{1}{P_S^\Gamma(y^{rp\pm}, T)} \right) \right)} + \\ + \left( C_0 - C_1 \frac{\hat{\sigma}_{y1}}{\hat{\sigma}_{y1}} - C_2 \frac{\hat{\sigma}_{y1}}{\hat{\sigma}_{y1}} + C_3 \frac{2\pi}{\hat{\omega}T} \ln \left( \frac{1}{P_S^\Gamma(y^{rp\pm}, T)} \right) \right), \quad (4.9)$$

де  $C_0, C_1, C_2, C_3$  – константи, що визначаються в результаті вирішення задачі апроксимації (3.4);

$$y^{3ДД\pm}(t) = y^{rp\pm} \mp \hat{\sigma}_y \sqrt{2 \ln \left| \frac{T\hat{\sigma}_y}{2\pi\hat{\sigma}_y \ln P_S^\Gamma(y^{rp\pm}, T)} \exp \left\{ -\frac{\hat{m}_y^2(t)}{2\hat{\sigma}_y^2} \mp \frac{\sqrt{2\pi}\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \Phi \left( \frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right) \right\} \right|}, \quad (4.10)$$

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

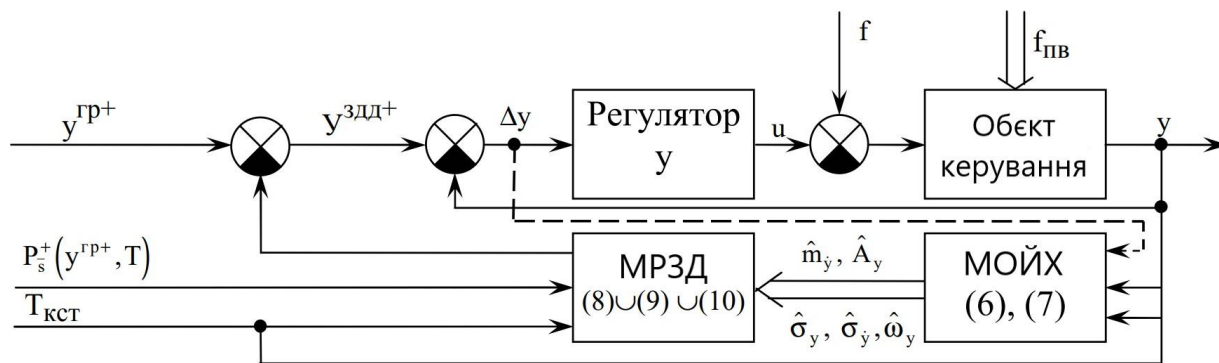


Рисунок 4.2. Структурна схема СГК з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту (МРЗД – модуль розрахунку допустимого заданого значення)

4.3. Розробка структурної схеми САК гарантування дотримання обмежень температури на виході з реактора.

Як зазначалося раніше, актуальність СГК для процесу каталітичної очистки інертних газів проявляється тоді, коли поставлено задачу максимальної продуктивності та енергоефективності при гарантованому унеможливленню виходу за температурні режими та створенні аварійної ситуації. Задача максимізації продуктивності та енергоефективності вимагає реалізації таких температурних режимів роботи ОК, коли фактичне значення температури продукту на виході з реактора  $T_k$  наближається до верхнього гранично-допустимого  $T_k^{gp+}$ . Варто зазначити що, хоча незначне перевищення межі не призводить до катастрофічних наслідків, воно все одно є небажаним, оскільки негативно впливає на експлуатаційний ресурс обладнання.

На рисунку 4.3 наведено структурну схему СГК, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної  $T_k$  до її верхнього гранично-допустимого значення  $T_k^{gp+}$ . В розробленій системі використана квазістаціонарна (майже постійна) модель зміни математичного очікування  $m_y(t)$  на  $T_{кст}$  (мінімальний інтервал часу, де виконується умова квазістаціонарності) функції часу та принцип побудови СГК з розрахунком допустимого заданого значення температури  $T_k^{gp+}$  безпосередньо за моделлю

порушення регламенту з використанням виразу 4.8. При реалізації алгоритму гарантування використовувались такі налаштування: гарантована вірогідність дотримання обмежень  $P_s^f = 0,99$  на інтервалі часу  $T = 1000$  сек., інтервал квазістаціонарності  $T_{кст} = 800$  сек.

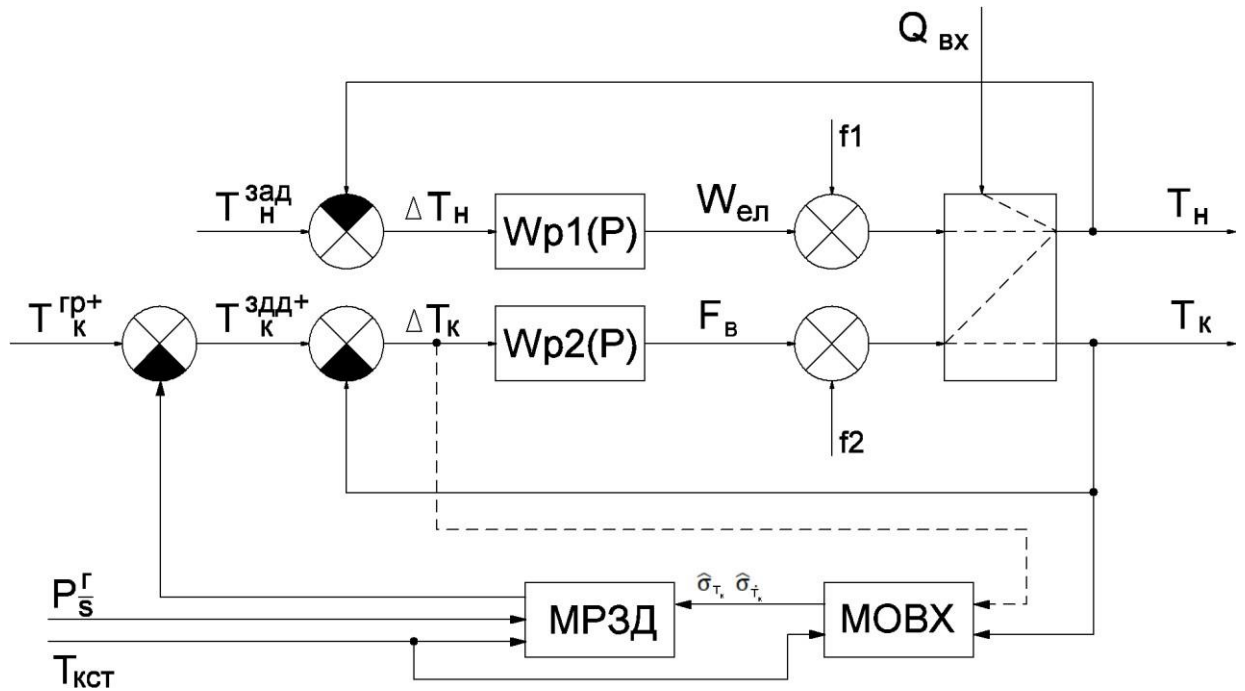


Рисунок 4.3 - Структурна схема СГК, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної  $T_K$  до її верхнього гранично-допустимого значення  $T_K^{гр+}$

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

Схема моделювання СГК процесом каталітичної очистки інертних газів представлена на рисунку 4.4. Вміст блоків розрахунку заданого значення (БРГЗД) та статистичних оцінок (БРСО) зображено на рисунках 4.5 та 4.6 відповідно.

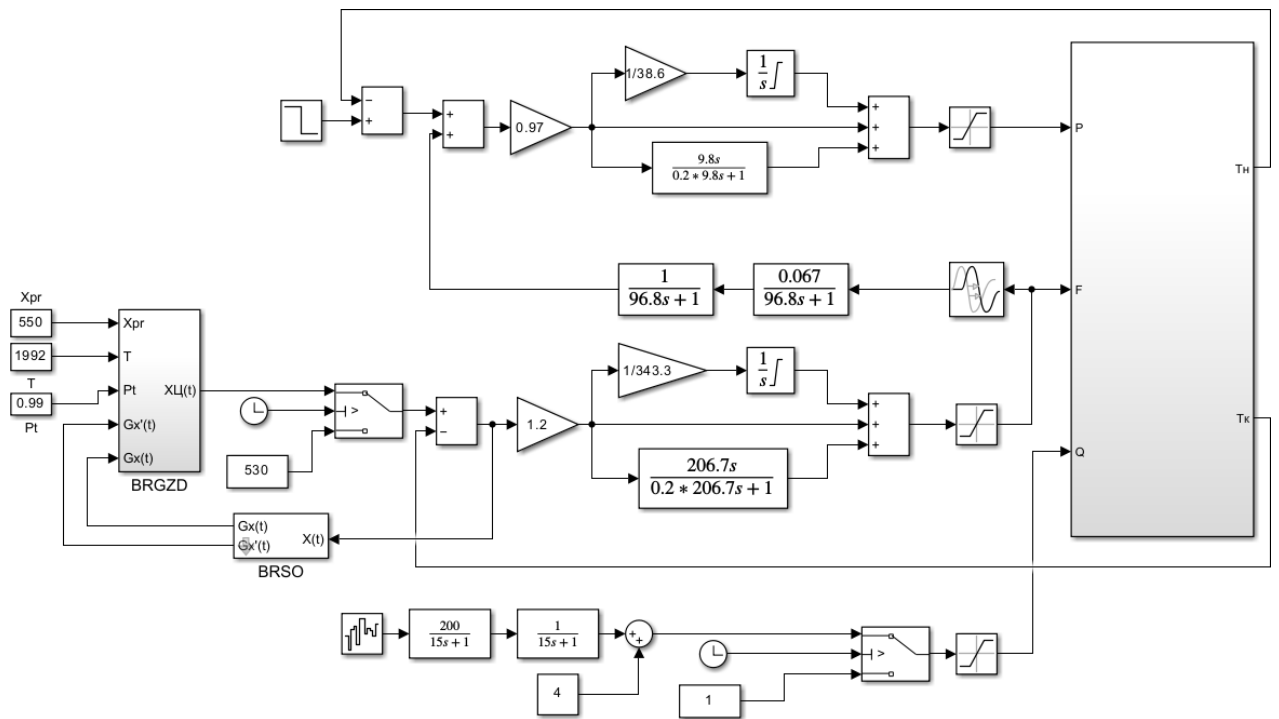


Рисунок 4.4 – Схема моделювання СГК, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної  $T_K$  до її верхнього гранично-допустимого значення  $T_K^{gr+}$  в середовищі Matlab Simulink

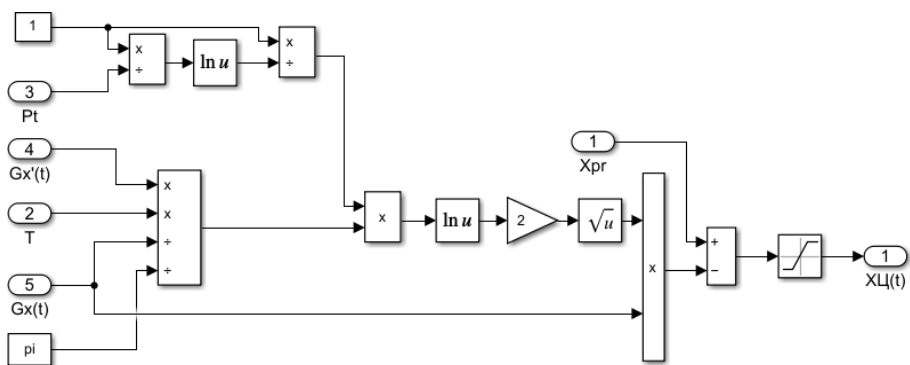


Рисунок 4.5 - Вміст БРГЗД

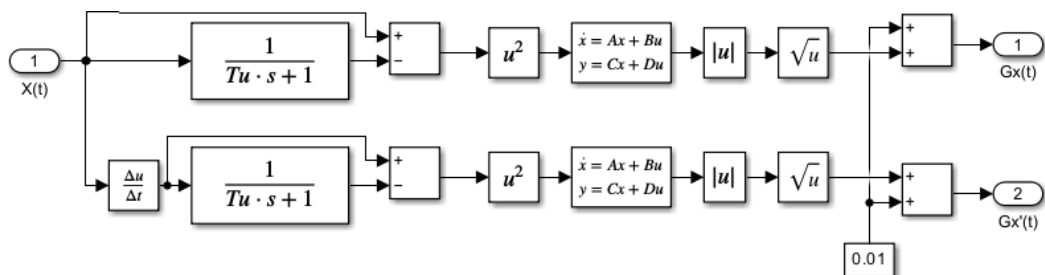


Рисунок 4.6 - Вміст БРСО

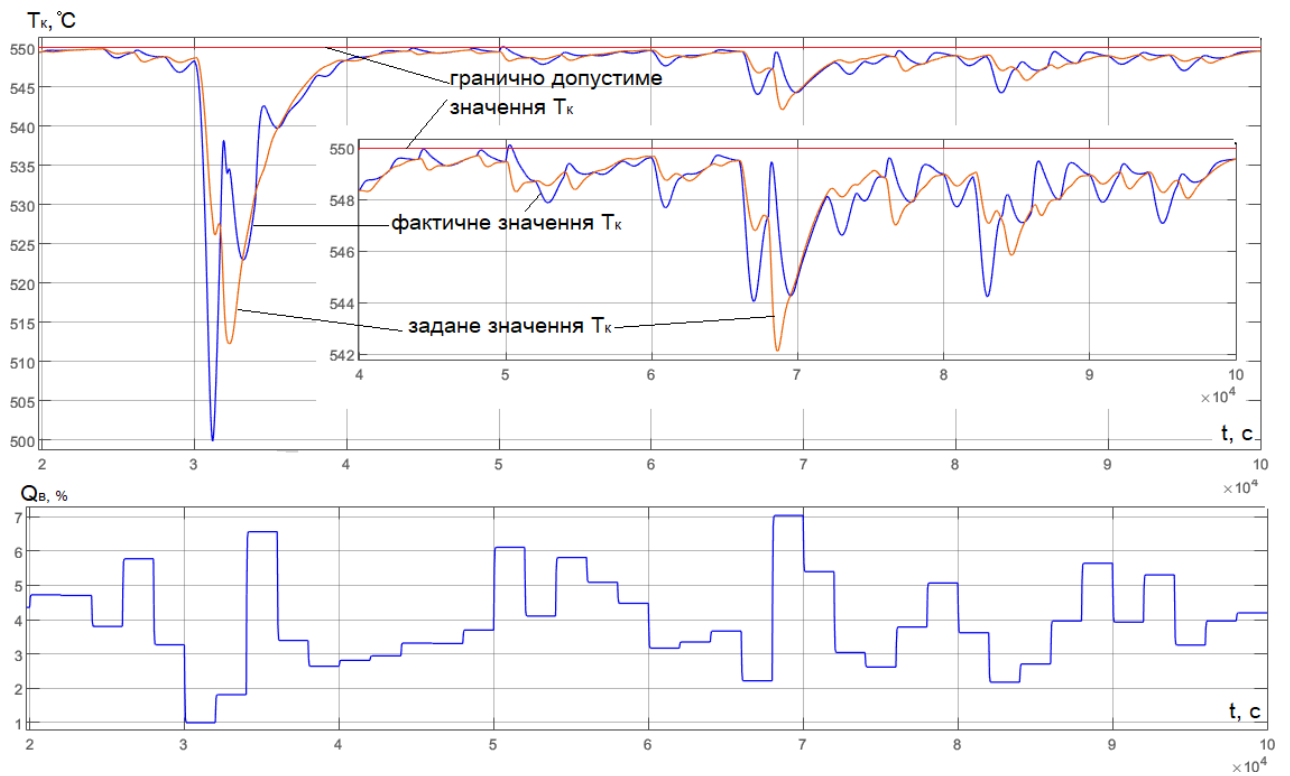


Рисунок 4.7 – Результати моделювання СГК процесом каталітичної очистки інертних газів до оптимізації налаштувань системи

З графіку видно що система працює з незначними викидами за межу, кількість викидів - 1. Для того щоб коректно налаштувати СГК було проведено оптимізацію деяких параметрів: інтервал часу на якому гарантована вірогідність дотримання обмежень  $T$ , інтервал квазістаціонарності  $T_{кст}$ .

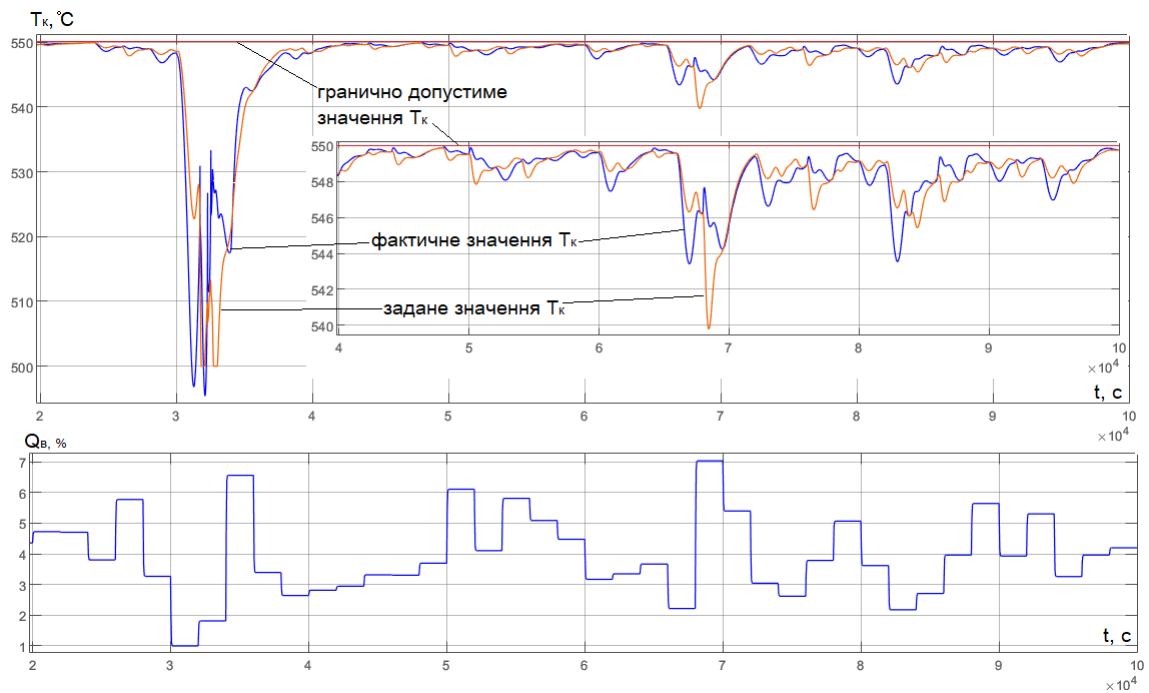


Рисунок 4.8 – Результати моделювання СГК процесом каталітичної очистки інертних газів після оптимізації налаштувань системи

Після оптимізації налаштувань СГК кількість викидів за межу - 0.

Для порівняння роботи різних систем були проведені експерименти з отримання основних показників продуктивності та енергоефективності САР базової структури, ПДТ та СГК процесом каталітичної очистки інертних газів в сталих режимах протягом 25 годин, схема моделювання наведена на рисунку 4.9, результати наведені в таблиці 4.1 та на рисунку 4.10.

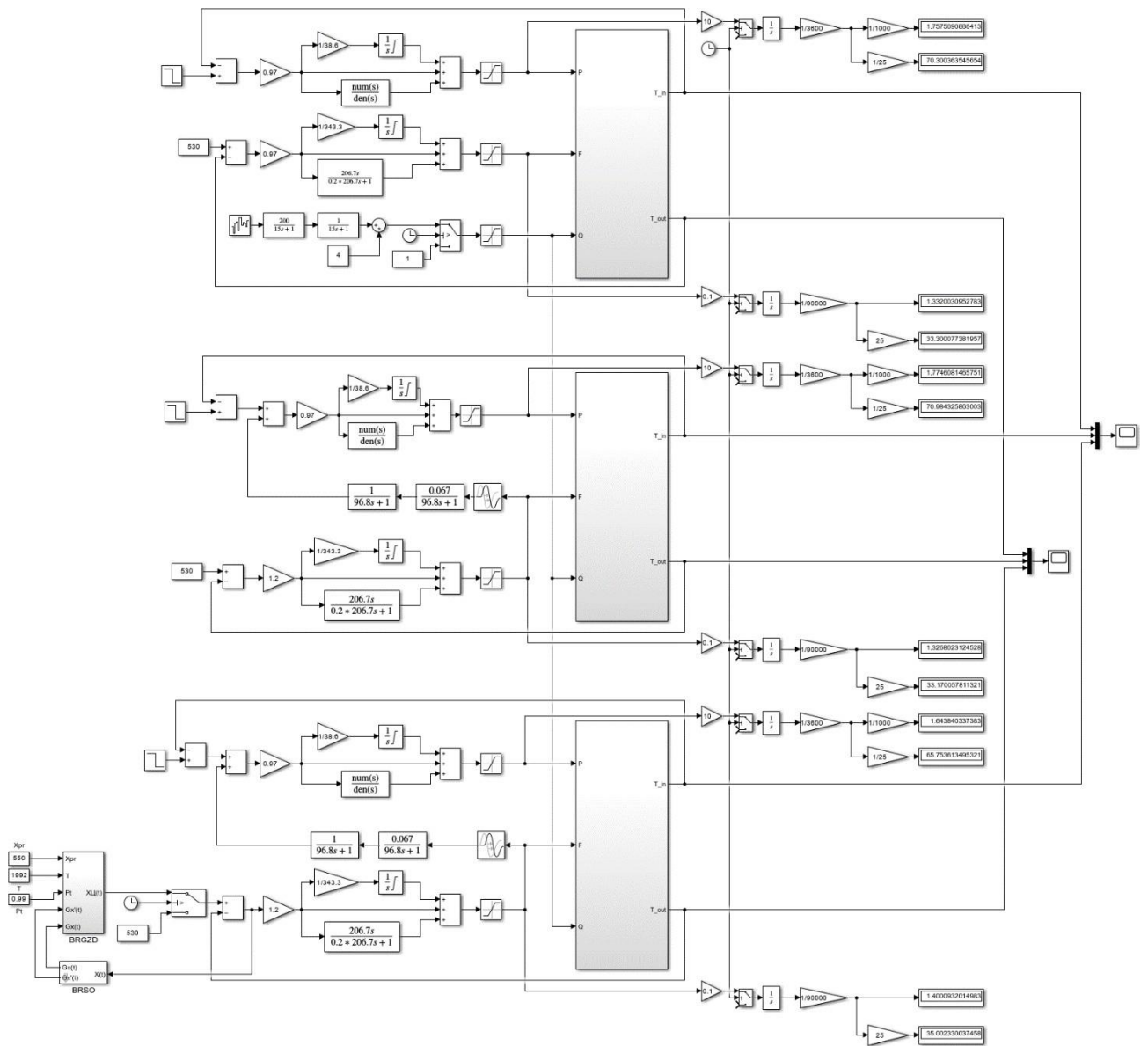


Рисунок 4.9 – Схема моделювання САР базової структури, ПДТ та СГК для оцінки основних показників продуктивності та енергоефективності процесом каталітичної очистки інертних газів в сталих режимах

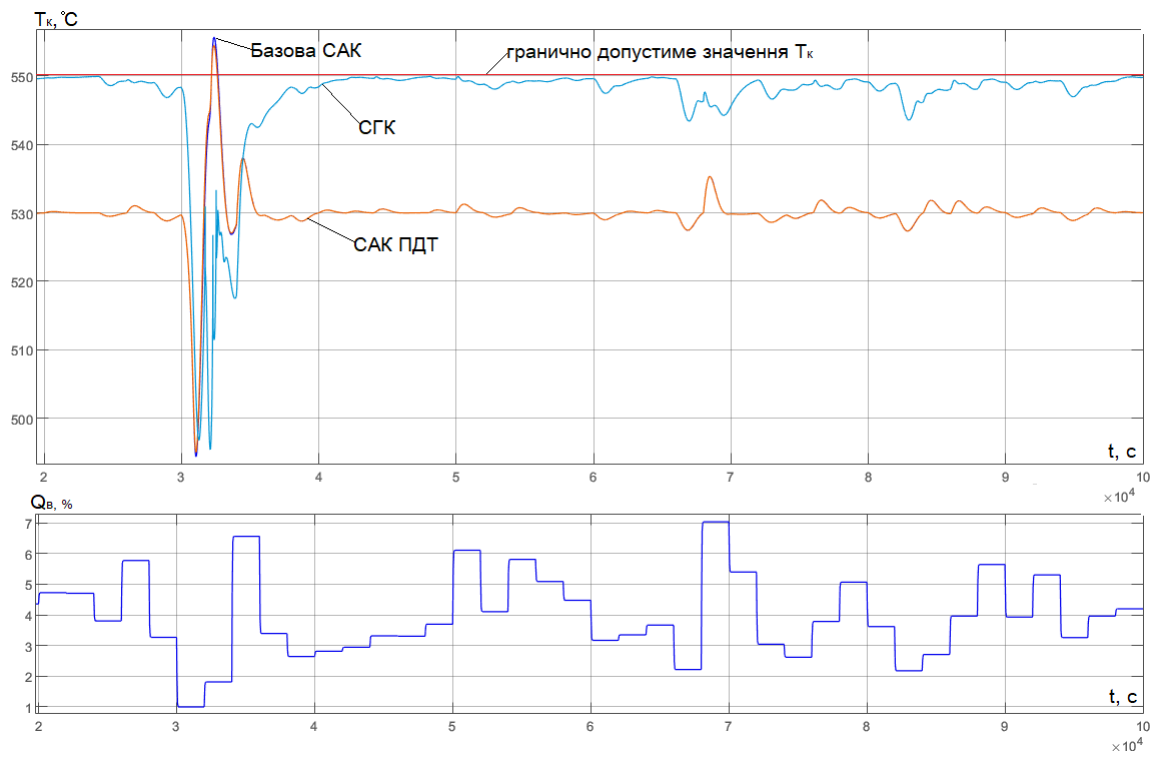


Рисунок 4.10 - Порівняльний аналіз САР базової структури, ПДТ та СГК процесом каталітичної очистки інертних газів

Таблиця 4.1 Порівняння продуктивності та енергоефективності різних систем

	САР		
	Базова	ПДТ	СГК
Загальна кількість спожитої електроенергії, кВт/год	1,76	1,77	1,64
Середнє споживання електроенергії, Вт/год	70,30	70,98	65,75
Загальна продуктивність, м <sup>3</sup>	33,3	33,17	35
Середня продуктивність, м <sup>3</sup> /год	1,33	1,32	1,4
Середня концентрація вуглеводнів у сировині, %	3,93		

#### 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 каталітичної очистки інертних газів 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:

- 1) Серед трьох запропонованих систем СГК є енергоефективнішою на 7.3% від САК базової структури і на 7.9% від САК ПДТ;
- 2) Серед трьох запропонованих систем СГК є продуктивнішою на 5.2% від САК базової структури і на 6% від САК ПДТ;
- 3) Зі збільшенням продуктивності та енергоефективності СГК в порівнянні з іншими системами якість її регулювання не зменшилася і значення регульованої змінної коливалося допустимих межах.

## РОЗДІЛ 5. Реалізація та підготовка до впровадження на підприємстві «Кріоін Інжиніринг» 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 каталітичної очистки інертних газів 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 контролером масової витрати (1),
- ШІМ вихід для керування нагрівачем (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.

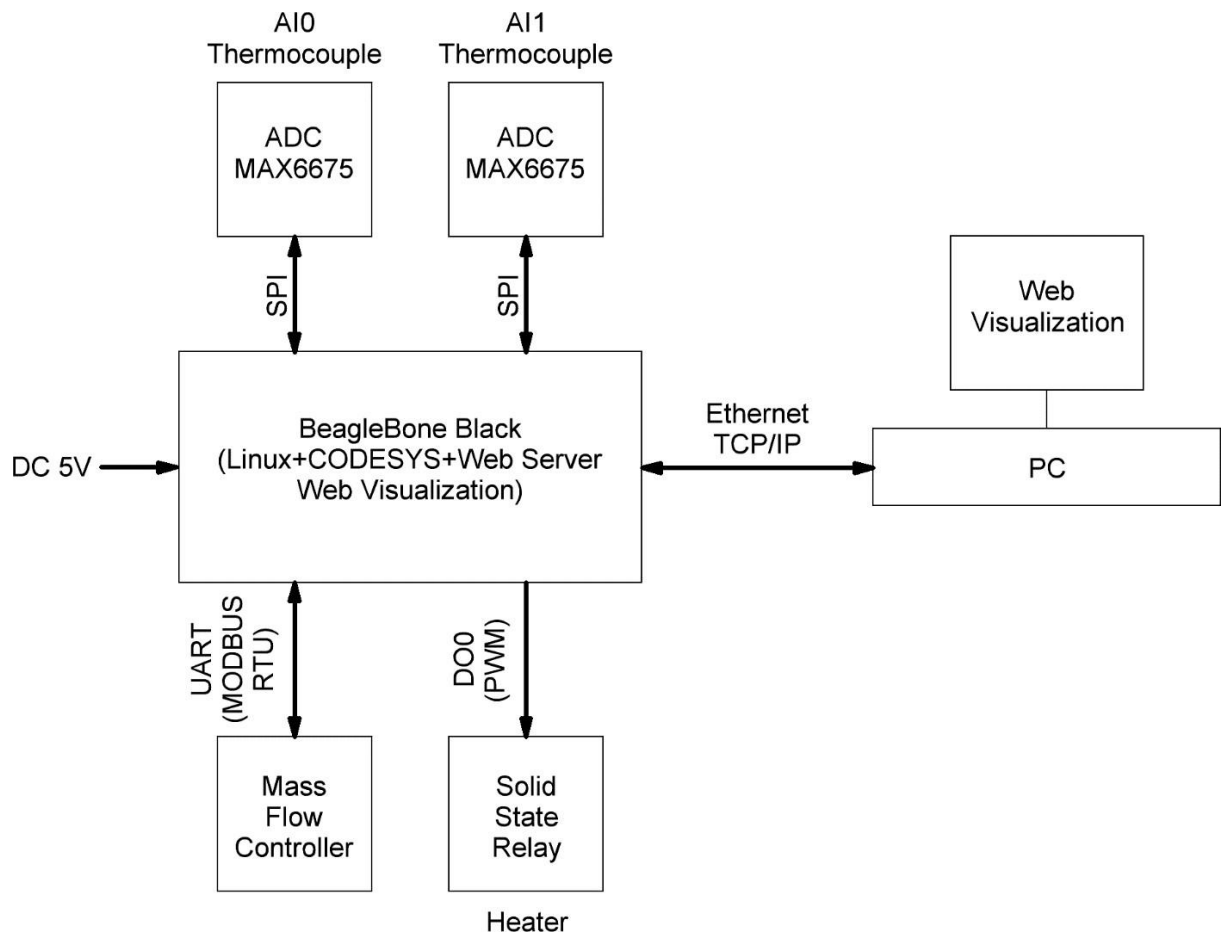


Рисунок 5.1 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом каталітичної очистки інертних газів

### 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 <sup>2</sup> 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) процесом каталітичної очистки інертних газів.

#### 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).

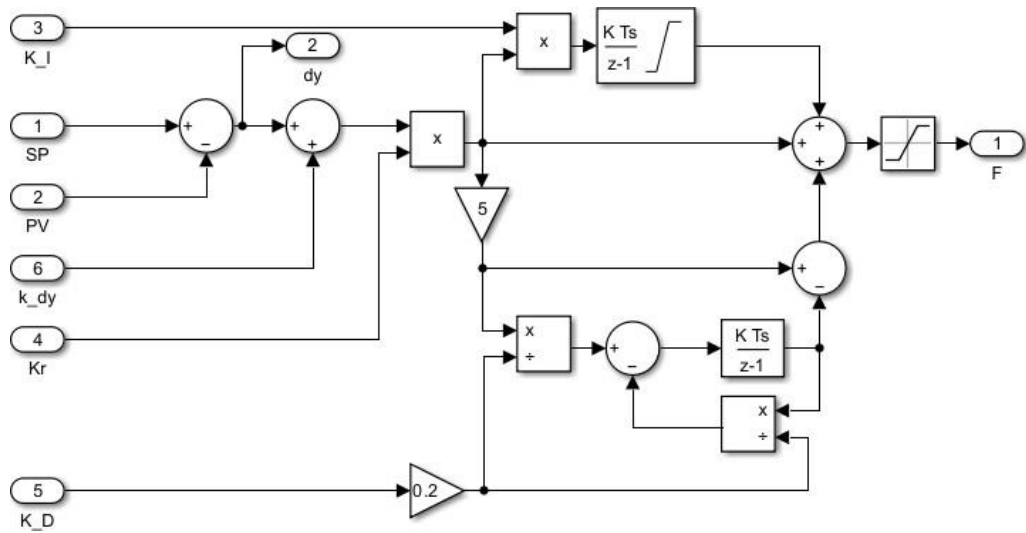


Рисунок 5.2 – Цифрова реалізація ПІД-регулятора в середовищі Simulink

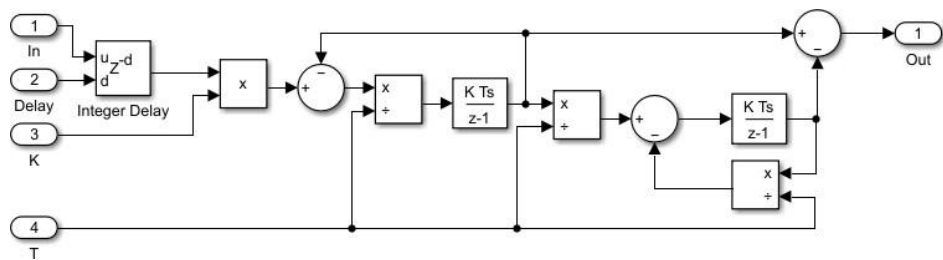


Рисунок 5.3 – Цифрова реалізація коригуючого міжрегуляторного зв'язку в середовищі Simulink

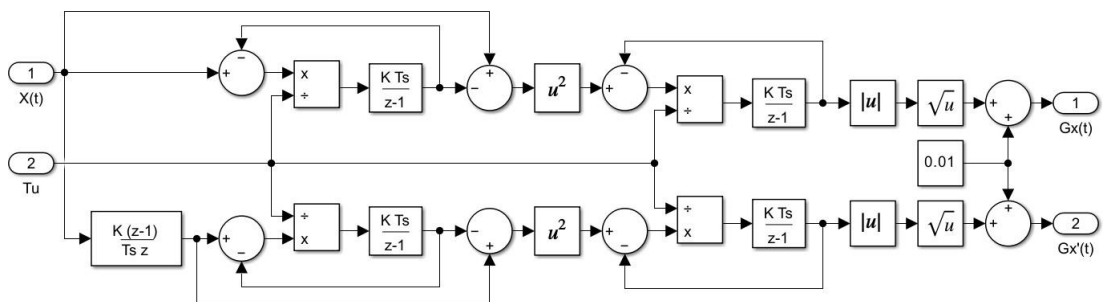


Рисунок 5.4 – Цифрова реалізація блоку розрахунку статистичних оцінок (БРСО) в середовищі Simulink

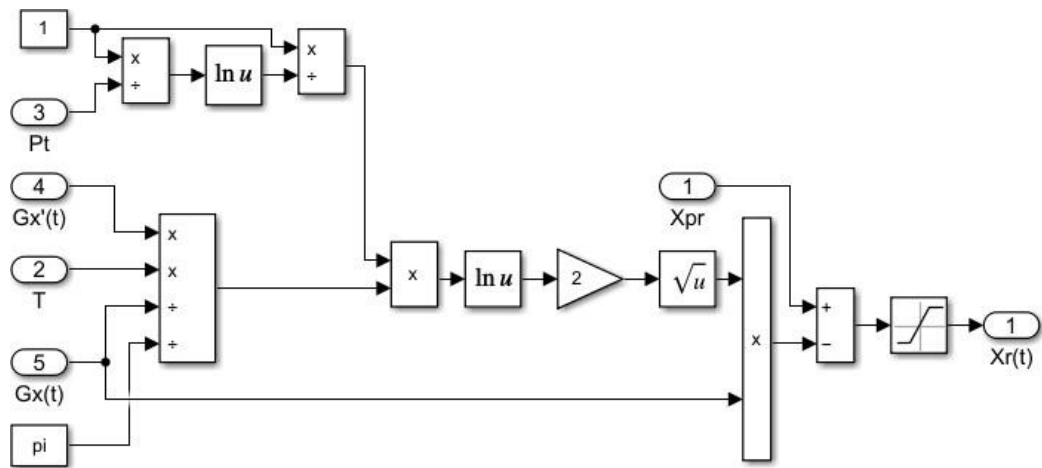


Рисунок 5.5 – Цифрова реалізація блоку розрахунку гарантованого заданого значення (БРГЗД) в середовищі Simulink

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.

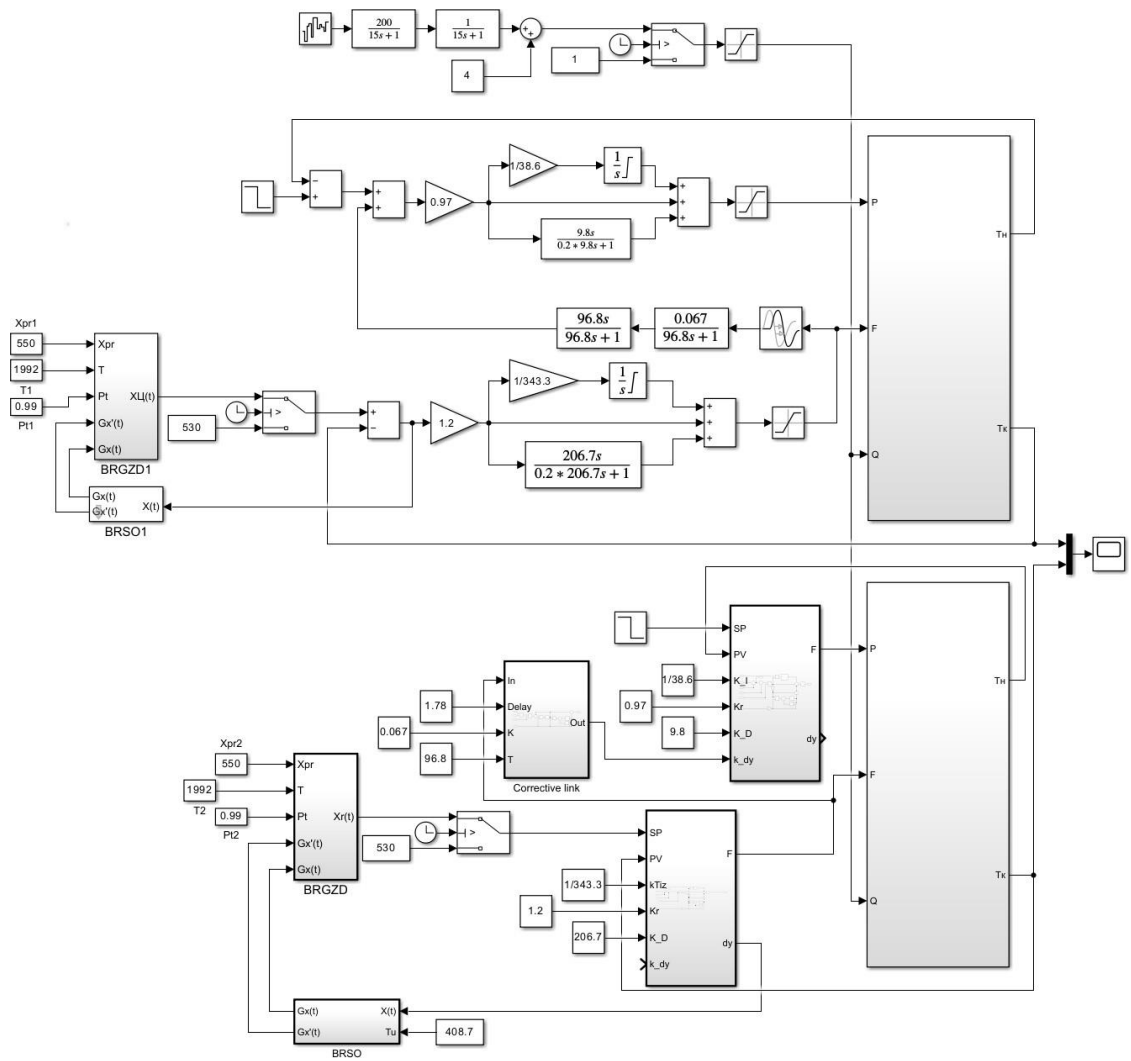


Рисунок 5.6 – Схема для порівняння роботи цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink

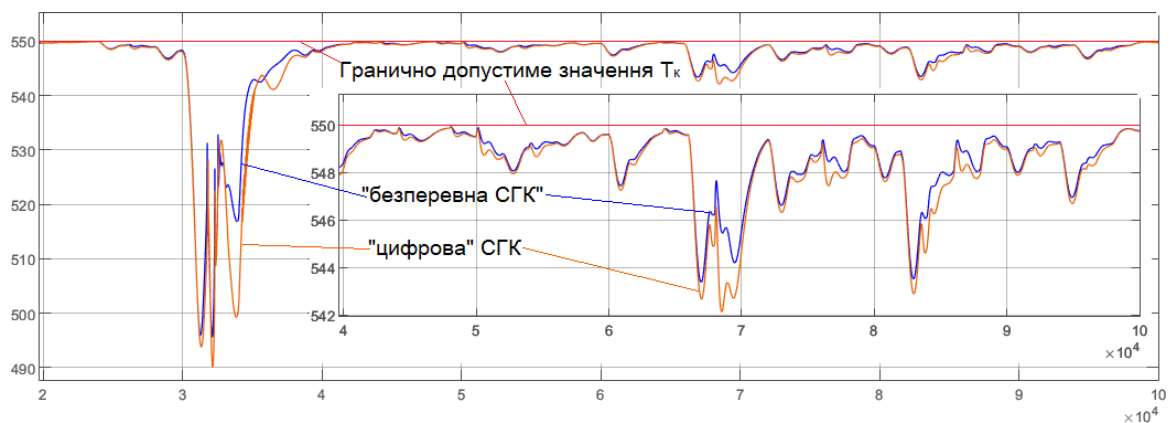


Рисунок 5.7 – Результати порівняльного моделювання цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink

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 каталітичної очистки інертних газів, 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.

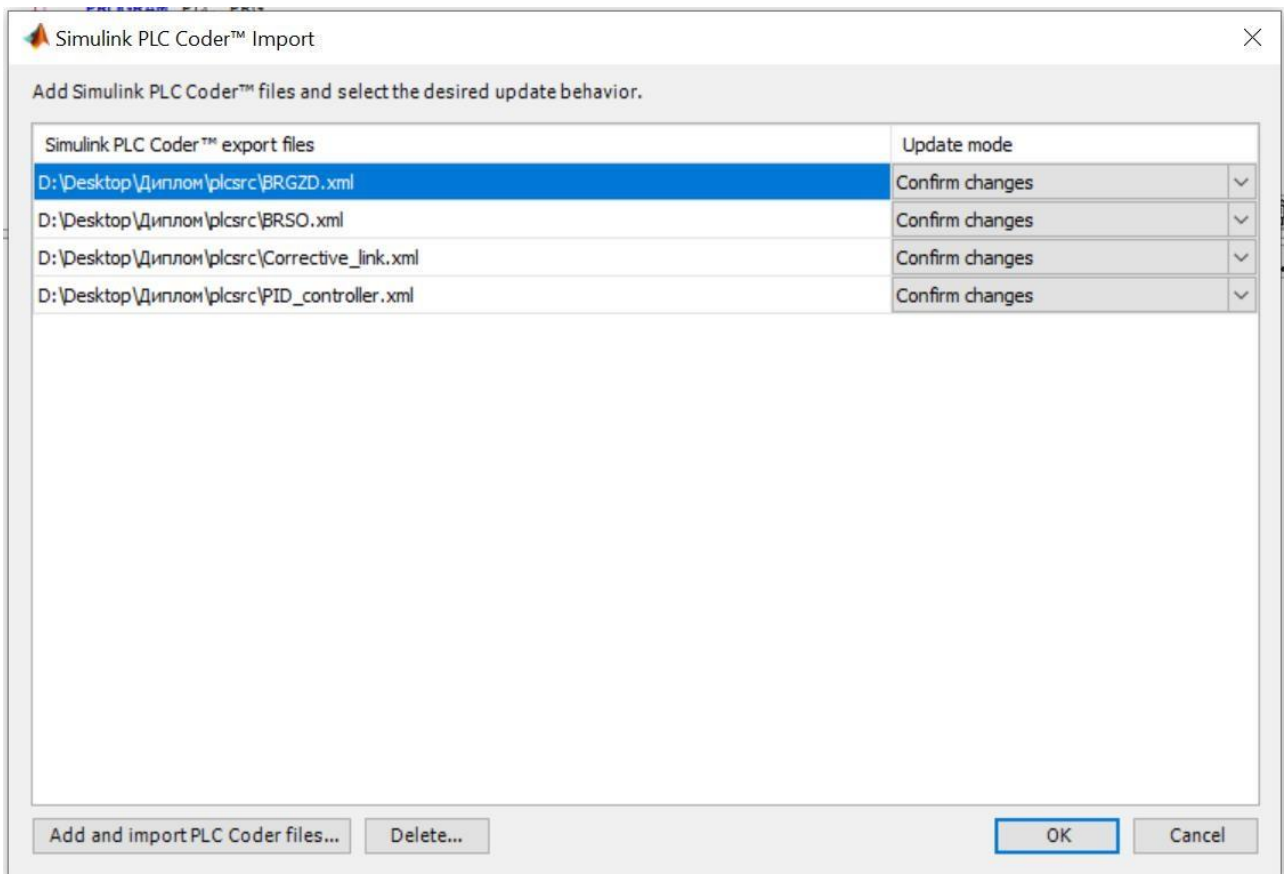


Рисунок 5.8 - Вікно «Simulink PLC Coder Import»

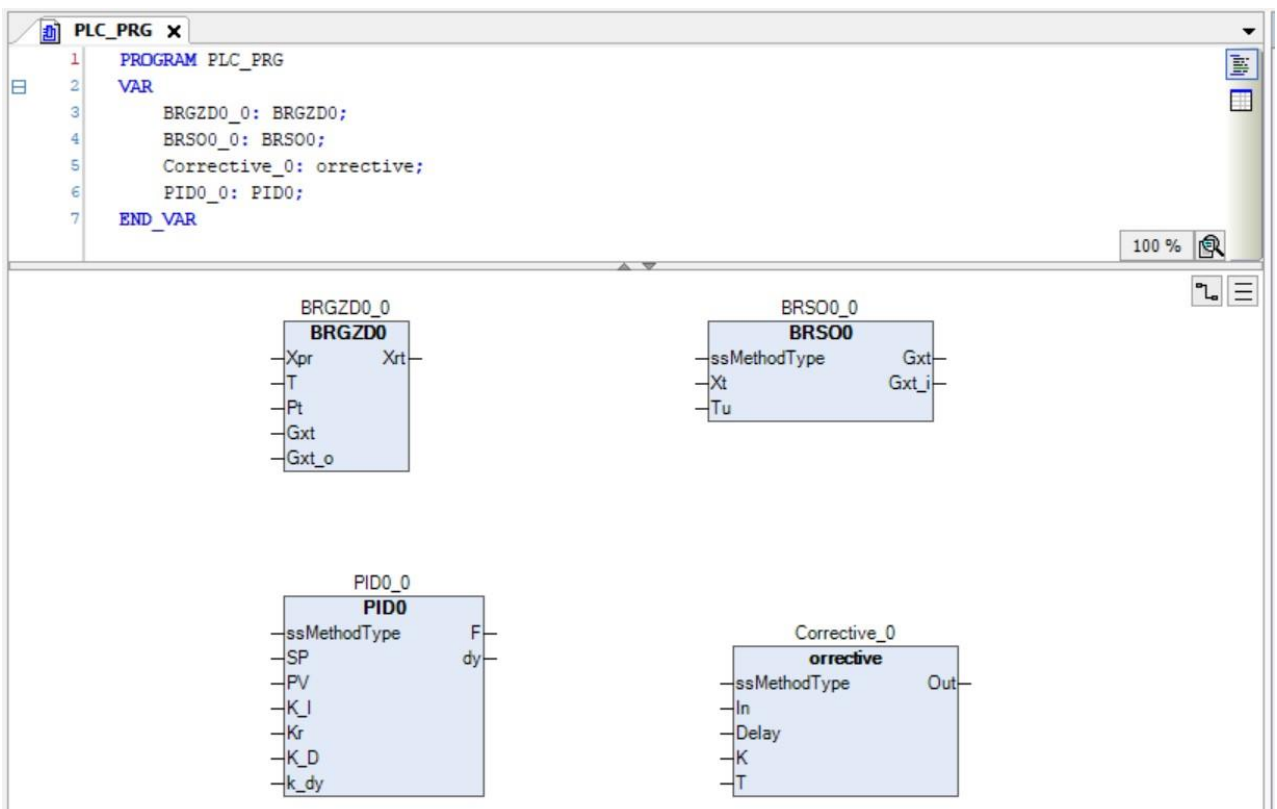


Рисунок 5.9 - Функціональні блоки ПІД-регулятора, коригуючого зв'язку, БРСО та БРГЗД у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5

```

1  FUNCTION_BLOCK PID0
2  VAR_INPUT
3      ssMethodType: SINT;
4      SP: LREAL;
5      PV: LREAL;
6      K_I: LREAL;
7      Kr: 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         (* Output: '<Root>/F' *)
37         F := 100.0;
38     ELSIF F < 0.0 THEN
39         (* Output: '<Root>/F' *)

```

Рисунок 5.10 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку ПІД-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;

```

Рисунок 5.11 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку коригуючого зв'язку

```

1  FUNCTION_BLOCK BR500
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 Integrator2' incorporates:
71      * Math: '<S1>/Math Function6'
72      * Product: '<S1>/Product3'
73      * Sum: '<S1>/Sum9' *)

```

Рисунок 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

```

Рисунок 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 каталітичної очистки інертних газів та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.

5.3.1 Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів.

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).

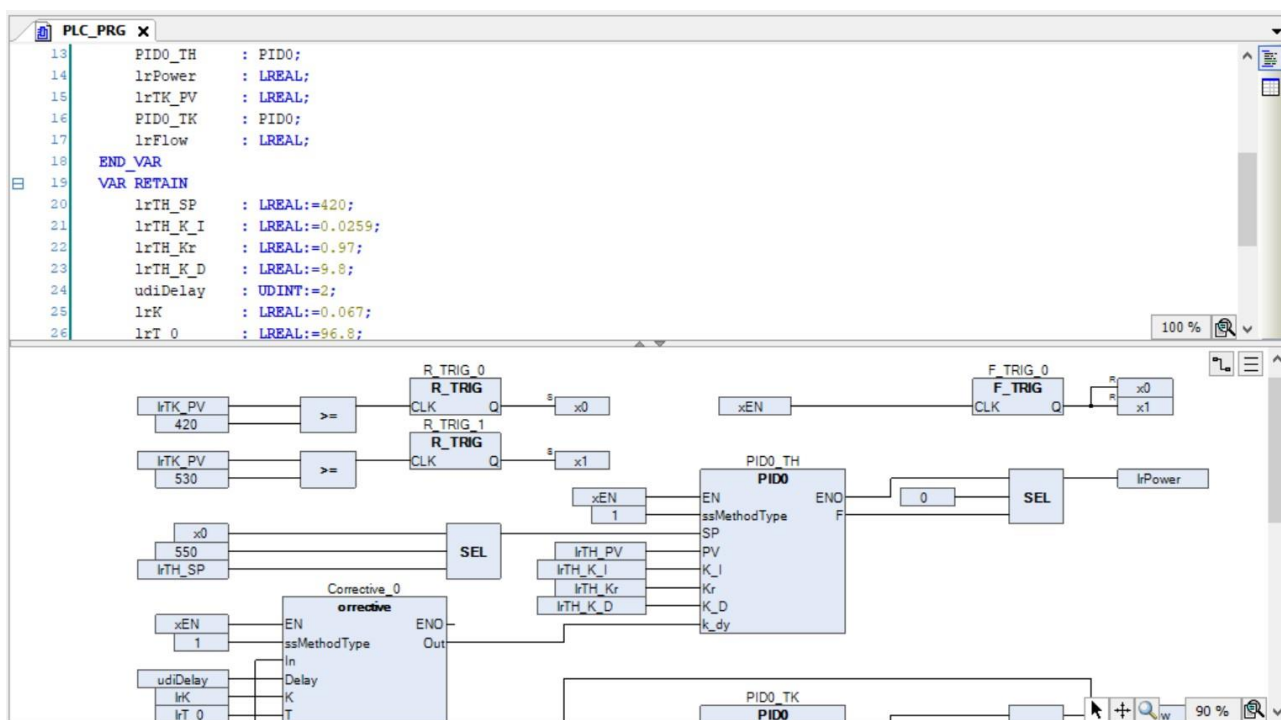


Рисунок 5.14 – Фрагменти списку змінних та програми алгоритму керування на мові CFC в середовищі CoDeSys V3.5

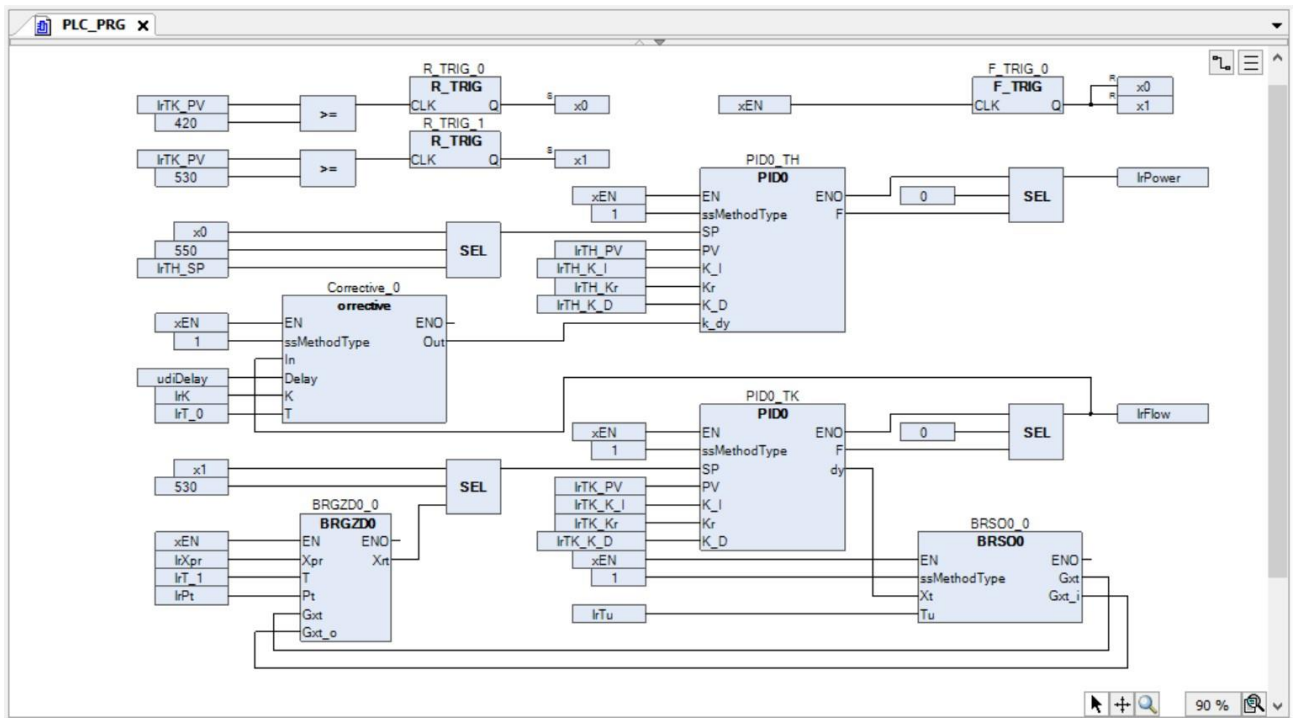


Рисунок 5.15 – Програма системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів реалізована мовою CFC в середовищі CoDeSys V3.5

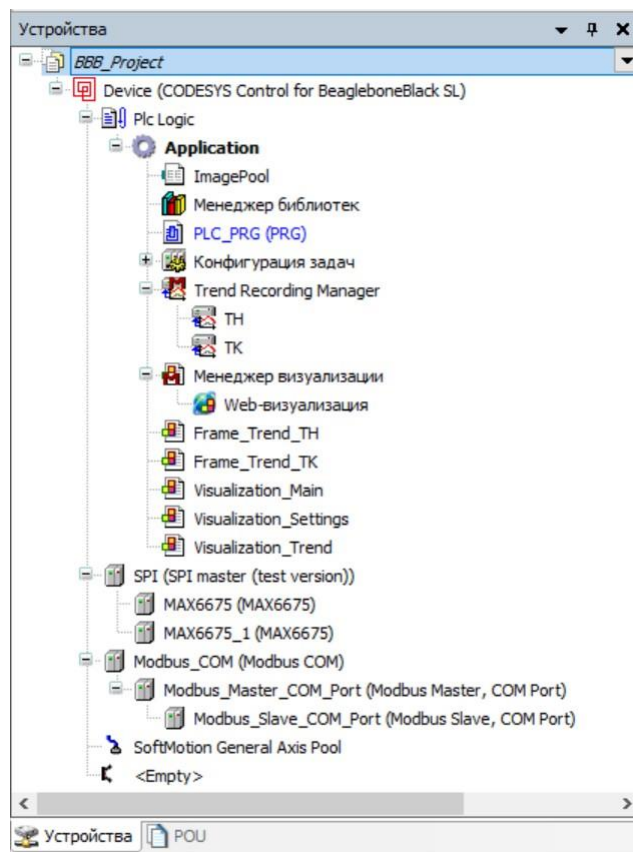


Рисунок 5.16 – Дерево програми в середовищі CoDeSys V3.5

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 каталітичної очистки інертних газів. Відповідні вікна веб-візуалізації представлені на рисунках 5.17 – 5.19.

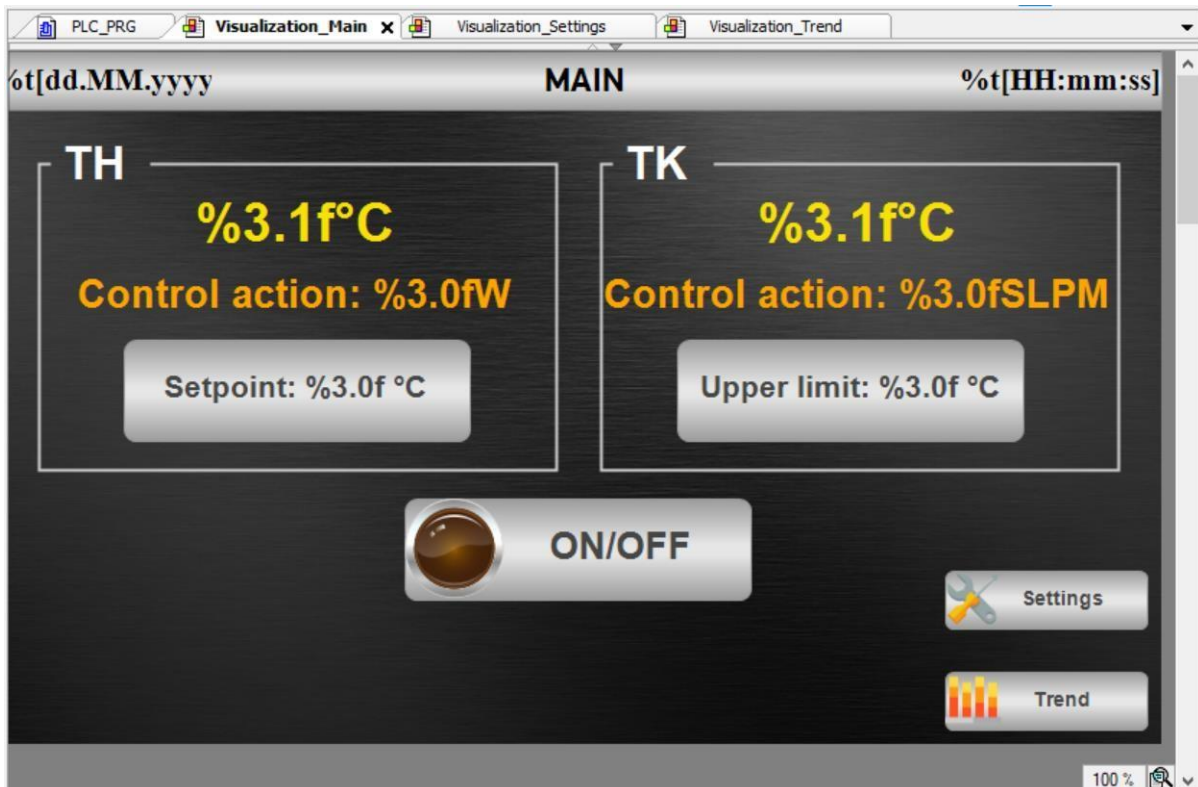


Рисунок 5.17 – Створення веб-візуалізації головного вікна, що надає можливість контролю основних параметрів процесу, запуску процесу та переходу на інші вікна

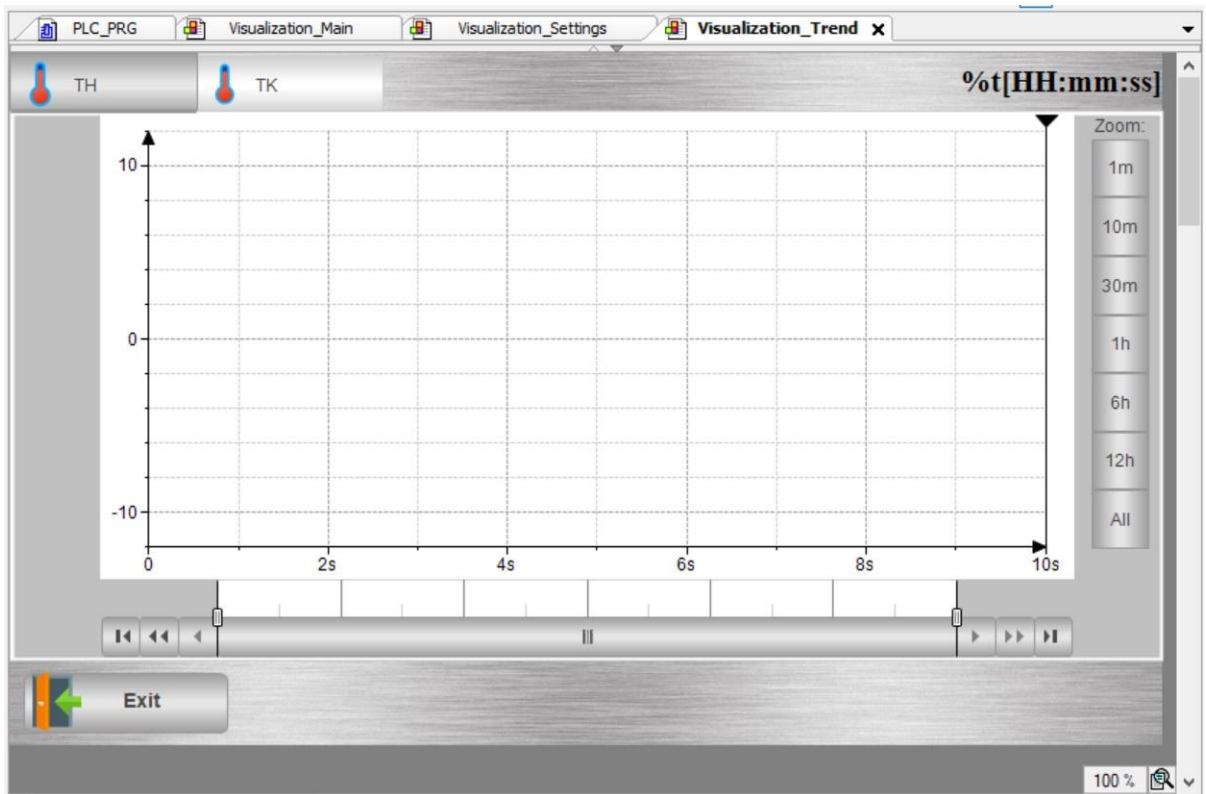


Рисунок 5.18 – Створення веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіків зміни основних параметрів процесу

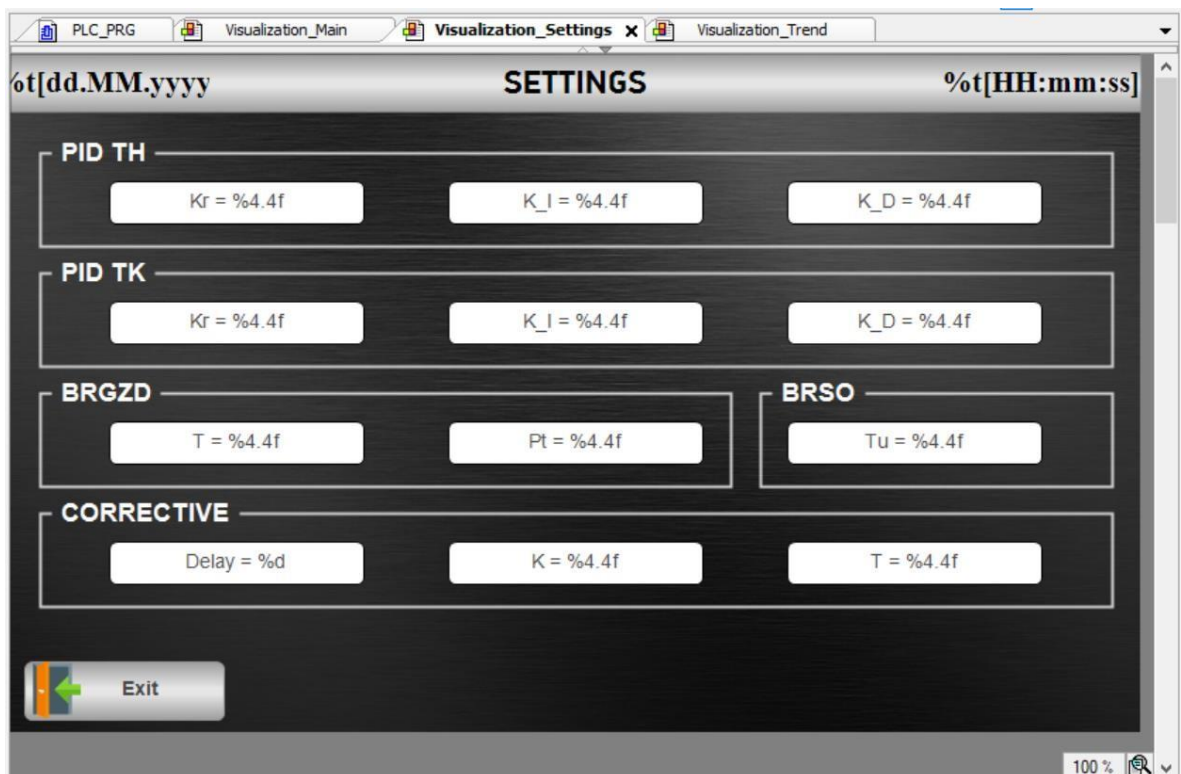


Рисунок 5.19 – Створення веб-візуалізації вікна, що надає можливість налаштування системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів

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 каталітичної очистки інертних газів 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.

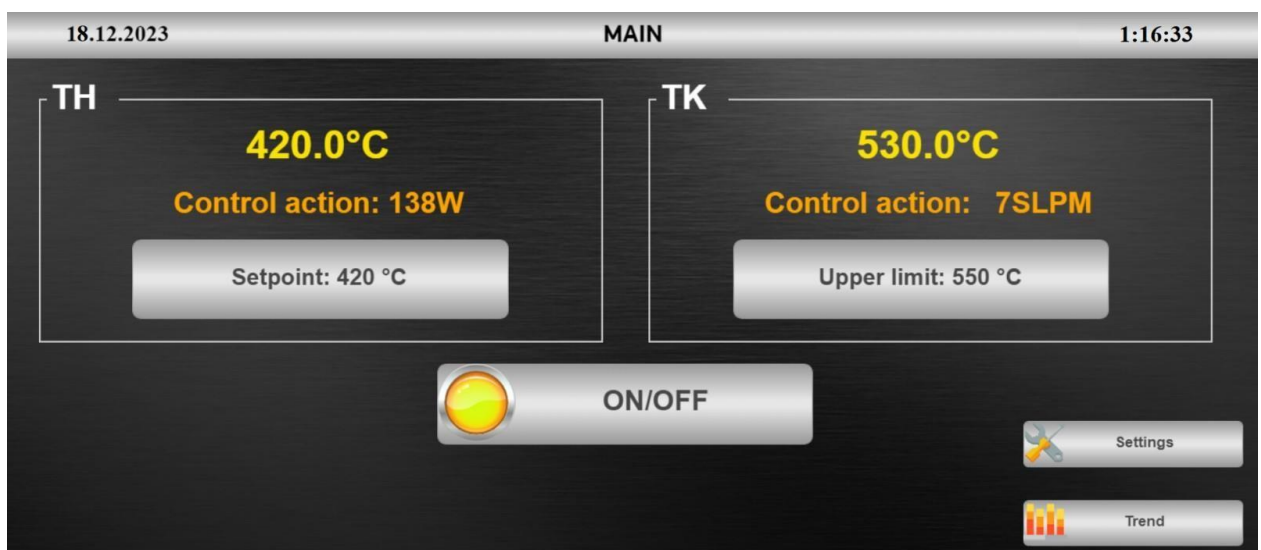


Рисунок 5.20 – Тестування веб-візуалізації головного вікна, що надає можливість контролю основних параметрів процесу, запуску процесу та переходу на інші вікна

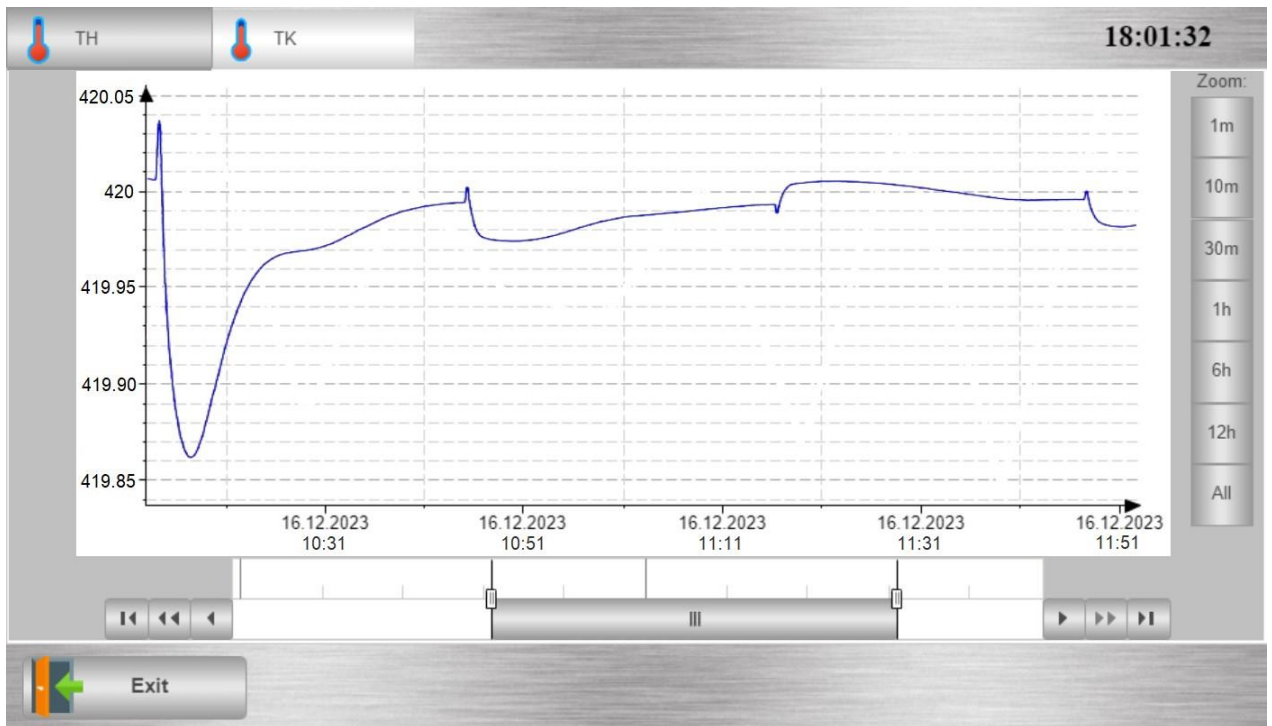


Рисунок 5.21 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіку зміни температури на виході з нагрівача

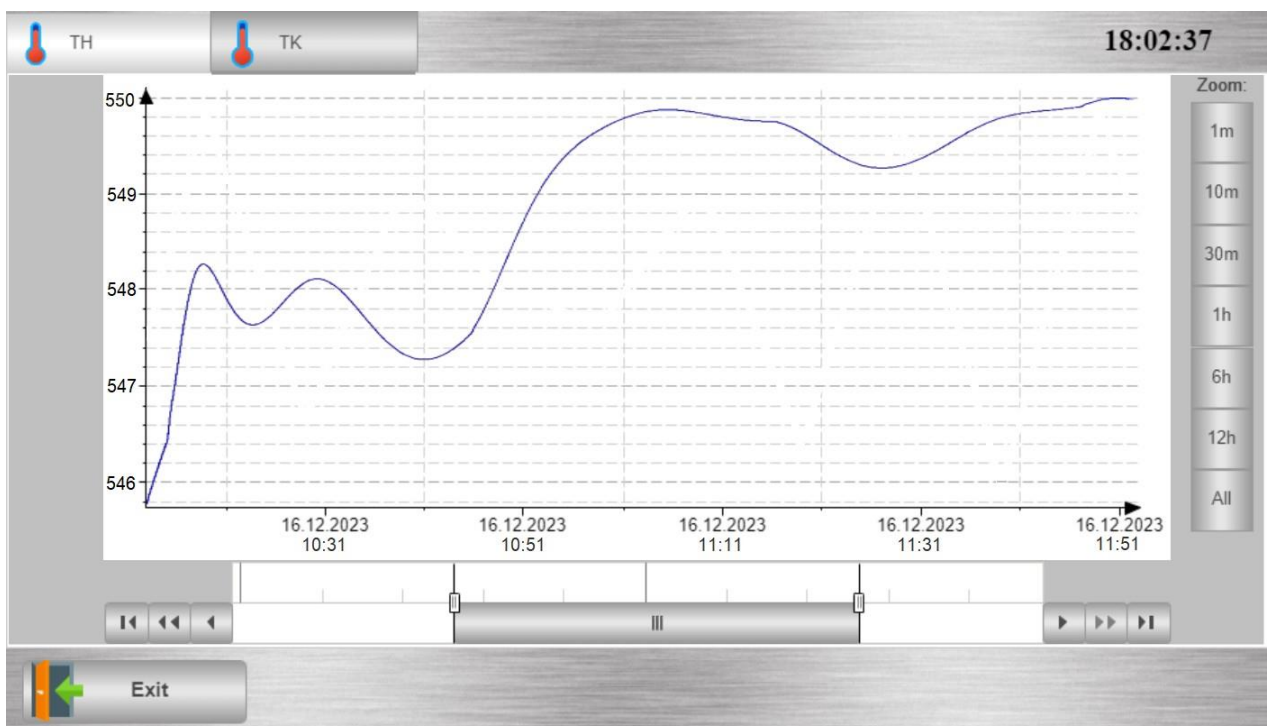


Рисунок 5.22 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіку зміни температури на виході з реактора



Рисунок 5.23 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість налаштування системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів

#### 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 програми автоматизації процесів каталітичної очистки інертних газів, яка забезпечить підприємству збільшення прибутків за рахунок зменшення витрат енергії на одиницю продукції, підвищення якості продукції та розширення асортименту.

Об'єкт дослідження.

Каталітичний реактор для проведення процесів каталітичної очистки інертних газів.

Предмет дослідження.

Підвищення ефективності керування процесом каталітичної очистки.

Стадія інноваційного проекту:

- формулювання концепції досліджень;
- техніко-економічне обґрунтування проекту;
- виконання проектно-конструкторської розробки пробного зразка;
- експериментальні дослідження у виробництві;
- доробка пробного зразка;
- сертифікація продукції;
- патентування новації (нової технології, нового засобу тощо).

Таблиця 5.1 – Опис інноваційної ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження автоматичного керування каталітичними процесами в реакторі	Очищення інертних газів від вуглеводнів	Отримання високоякісної та більш доступної продукції
Точне дотримання температурних режимів	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 20%;
- зменшення втрат продукції в результаті усунення можливості неоптимальних температурних режимів.

Зміст і методика визначення конкурентної позиції підприємства.

Таблиця 5.2 – Зважена рейтингова оцінка підприємств галузі

Характеристика	Вагомий коефіцієнт	Підприємство					
		№1 Кріоін		№2 Інгаз		№3 Linde	
		рейтинг	Зважений рейтинг	рейтинг	Зважений рейтинг	рейтинг	Зважений рейтинг
Низькі витрати	0.2	2	0,4	1	0,2	3	0,6
Рівень маркетингу	0.2	2	0,4	1	0,2	3	0,6
Якість продукції	0.3	3	0,9	1	0,3	2	0,6
Запропонований асортимент	0.3	2	0,6	1	0,3	3	0,9
	1.0	x	2,3	x	1,0	x	2,7

Таблиця 5.3 – Матриця SWOT- аналізу

<b>Сильні сторони (5-6)</b>	<b>Слабкі сторони (5-6)</b>
Кваліфікований персонал Сучасні технології виробництва Проектно-конструкторська база Якість і новизна продукції Науково-дослідна база Генерування ідей	Обсяг продажу Патентна захищеність Розуміння ринкової ситуації Наявність фінансових ресурсів Достатньо високий рівень витрат Достатньо вузька лінійка асортименту продукції
<b>Можливості (5-6)</b>	<b>Загрози (5-6)</b>
Зміна потреб ринку Нова технологія Нові продукти Зростання попиту на більш якісну продукцію різноманітного асортименту Широкий спектр інформаційних технологій, що дає можливість виходу компанії в онлайн	Велика конкуренція Складна економічна ситуація Сировинна база Поставка матеріалів Торговельні обмеження

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		2	
	1.2. Рівень прогресивності застосованих технологій		3	
	1.3. Ступінь гнучкості виробництва		1	
<b>Підсумкова оцінка</b>		0,2	6	1,2
2. Кадрові можливості	2.1. Рівень кваліфікації персоналу		3	
	2.2. Ступінь готовності персоналу до змін на підприємстві		2	
	2.3. Розвиненість системи мотивації персоналу		2	
	2.4. Ступінь творчої ініціативності персоналу		3	
<b>Підсумкова оцінка</b>		0,1	10	1,0
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	
<b>Підсумкова оцінка</b>		0,2	10	2
4.Маркетингові можливості	4.1. Раціональність використання каналів розподілу товарів		2	
	4.2. Гнучкість цінової політики		2	
	4.3. Рівень використання реклами		0	
	4.4. Ефективність системи збуту		1	
<b>Підсумкова оцінка</b>		0,2	5	1,0
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		2	
	5.4. Розвиненість системи інформаційного забезпечення		2	
<b>Підсумкова оцінка</b>		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	
<b>Підсумкова оцінка</b>		0,2	122062	24412,4

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 температурного режиму каталітичного реактору	Умовно постійна браку продукції: до автоматизації – 7% після автоматизації – 1%
Витрати електроенергії		Умовно постійна добова норма витрат електроенергії: до автоматизації – 0,1 кВт год/м <sup>3</sup> після автоматизації – 0,08 кВт год/м <sup>3</sup>

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, м<sup>3</sup>/добу;

$P_{обб}$  - продуктивність до модернізації, м<sup>3</sup>/добу;

$T$  - час роботи, діб/рік;

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

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

Розраховуємо додатковий прибуток за рахунок збільшення продуктивності:

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

де  $\Delta OV$  – додатковий обсяг реалізованої продукції, т;

$Ц$  - ціна реалізації продукції, грн./ м<sup>3</sup>;

$Р$  – рентабельність продукції (при умові заданого прийняттого рівня).

$$\Delta П = 777,6 \times 8584 \times 0,2 = 1334983,68 \text{ грн}$$

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.грн	Вс	36	28,8	-7,2
2	Витрати на поточний і капітальний ремонт, тис.грн	Вр	4,8	8,5	+3,7
3	Витрати на амортизацію, тис.грн	Ва	11,52	20,4	+8,88
4	Витрати на сировину, тис.грн	Вс	12441,6	15552	-3110,4
5	Всього поточних витрат, тис.грн	Вп	12493,92	15609,7	$\Delta B_{п}$ -3105,02

Розраховуємо повну собівартість виробленої продукції  $C^6$  до модернізації, тис. грн.

$$C^6 = OB^6 \times C^6 \times 100 / (100 + P)$$

де: P – рентабельність виробленої продукції

$$C^6 = 3110,4 \times 8,584 \times 100 / (100 + 20) = 22249,728$$

Повна собівартість виробленої продукції після модернізації розраховуємо за формулою:

$$C^н = C^6 + \Delta OB \times C^6 \times 100 / (100 + P) + \Delta B_{п}$$

де:  $\Delta B_{п}$  – зміна поточних витрат від модернізації обладнання, тис. грн.

$$C^н = 22249,728 + 777,6 \times 8,584 \times 100 / (100 + 20) + 3105,02 = 30917,18$$

Таблиця 5.7 – Розрахунок показників виробничої діяльності підприємства

№ п/п	Показник	Позначення	АСУТП		Зміна статей витрат (+) зростання; (-) зниження
			Базова	Модернізована	
1	Обсяг виробництва продукції, нат. од.	OB	3110,4	3888	+777,6
2	Дохід від реалізації, тис. грн.	ТП	26 699,6	33 374,59	+6 674,92
3	Повна собівартість продукції, тис. грн.	С	22249,72	30917,18	+8 667,46
4	Прибуток, тис. грн.	П	5 339,92	6 674,92	+1 335
5	Податок на прибуток, тис. грн.	Ппр	961,18	1 201,48	+240,3
6	Чистий прибуток, тис. грн.	ЧП	4 378,74	5 473,44	+1 094,7
7	Рентабельність %	Рп	16,4	16,4	

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	30
2. Паливо та енергія	14,2
3. Заробітна плата (основна і додаткова)	37,8
4. Відрахування на соціальні заходи	14,2
5. Амортизаційні відрахування	10,5
6. Інші витрати	10,7
7. Накладні витрати	21,4
Разом	138,8

Таблиця 5.9 – Розмір інноваційного бюджету

Стаття витрат	Сума, грн	Питома вага статті, %
Вартість проведення прикладних науково-дослідних робіт (Вндр)	138800	17,2
Прибуток (П)	27760	3,45
ПДВ	27760	3,45
Договірна ціна НДР (Цндр)	194320	24,1
Повна вартість роботи, виконаної власними силами	417788	51,8
Розмір інноваційного бюджету	806428	100

Таблиця 5.10 – Інвестиційні витрати на модернізацію системи управління технологічним процесом

№	Статті витрат	Сума, тис.грн.
1	Витрати для виконання робіт з проектування	806,428
2	Бюджет маркетингових заходів по просуванню	-
3	Вартість комплексів засобів автоматизації (ІСкап)	36,58
4	Витрати для модернізації діючої системи управління (ІС мод)	1,7
	Всього інвестиційні (ІС)	844,708

Розрахунки:

$$ІС \text{ мод} = ІС_{\text{первб}} \times Н_{\text{мод}} / 100 = 8500 \times 20\% / 100 = 1700$$

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.	845	676	507	338	169
Величина відсотків за кредитом, тис. грн.	211,25	169	126,75	84,5	42,25
Щорічна сума виплат за кредитом	380,25	338	295,75	253,5	211,25
Залишок кредиту на кінець року	676	507	338	169	0

Таблиця 5.12 - Оцінка інвестиційної привабливості інноваційного проекту.

Показники	Роки				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Виручка від реалізації	33 374,59	33 374,59	33 374,59	33 374,59	33 374,59
Поточні витрати	15609,7	15609,7	15609,7	15609,7	15609,7
Амортизаційні відрахування	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
Відсотки за кредит	211,25	169	126,75	84,5	42,25
Оподаткований прибуток	6 674,92	6 674,92	6 674,92	6 674,92	6 674,92
Податок на прибуток	1 201,48	1 201,48	1 201,48	1 201,48	1 201,48
Чистий прибуток	5 473,44	5 473,44	5 473,44	5 473,44	5 473,44
Чистий прибуток після виплат за кредит	5 093,19	5 135,44	5 177,69	5 219,94	5 262,19
Чисті грошові надходження	5 493,84	5 493,84	5 493,84	5 493,84	5 493,84
Коефіцієнт дисконтування	0,567426	0,635518	0,71178	0,797193	0,892857
Чистий приведенний дохід накопичуваним підсумком	4 649,132	10 142,97	15 636,81	21 130,65	26 624,49

## 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 каталітичної очистки інертних газів, 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

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

Індекс доходності

$$\text{ІД} = \text{IC} \text{ d ЧГН} n i i \sum_{i=1}^n (+) = 5\,493,84 / 844,708 = 6,5$$

Термін окупності

$$\text{ТОІ} = 844,708 / 5\,493,84 = 0,154$$

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 проекту є доцільною, строк окупності інвестицій буде у межах прийнятого терміну фінансової оцінки проекту ТОІ складає 0,154 періоду(року), ІД=6,5.

## ВИСНОВОК

Кваліфікаційна робота магістра на тему “Підвищення ефективності керування процесом каталітичної очистки інертних газів” присвячена підвищенню продуктивності, енергоефективності та економічної доцільності проведення технологічного процесу. Тема є актуальною, оскільки сучасний етап розвитку світового виробництва характеризується наявністю окремих галузей, в яких використовують високо очищені продукти, зокрема гази високої чистоти.

В першому розділі було розглянуто суть технологічного процесу каталітичної очистки інертних газів, його схема та конструкцію агрегату, що реалізує даний процес. Визначено регламенти ведення ТП та виділено регульовані координати, в якості яких доцільно обрати температуру на виході з газового нагрівача  $T_n$  і температуру на виході з реактору  $T_k$ . Необхідною умовою вирішення задач керування є наявність керуючих дій, що повинні бути вхідними змінними (координатами) ОК і їх кількість повинна бути рівною кількості регульованих змінних. Для процесу каталітичної очистки інертних газів до керуючих дій доцільно віднести потужність живлення електричного нагрівача  $W_{ел}$  та витрати сировини  $F_v$ . Всі інші вхідні дії, окрім керуючих, класифікуємо як некеровані збурення.

У ході виконання другого розділу була розроблена структурна схема процесу каталітичної очистки інертних газів та структурна схема його математичної моделі. Також в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink була відтворена математична модель об'єкту керування. В результаті моделювання математичної моделі ОК були отримані його динамічні та квазістатичні характеристики, а також доведена адекватність аналітичної математичної моделі процесу каталітичної очистки інертних газів як ОК. За всіма каналами ОК має статичні властивості, параметрична ідентифікація моделей каналів керування проводилася за методикою двох спільних точок першого порядку.

САР температури на виході з газового нагрівача  $T_n$  та САР температури на виході з реактору  $T_k$  були синтезовані на базі ПІД регуляторів. Синтез САР

проведено в два етапи. На першому етапі розрахунок налаштувань ПД регуляторів проводився за інженерними методиками Капеловича, на другому етапі було застосовано оптимальний параметричний синтез.

Хоча із налаштуваннями регуляторів, отриманими за інженерними методиками САР дає стійкі перехідні процеси, після оптимізації інтегральні показники якості суттєво зменшилися що свідчить про підвищення динамічної якості системи. Також варто зазначити, що попри вжиті заходи існує запас підвищення динамічної точності САР.

Як було зазначено у попередньому розділі двомірна САР температури  $T_n$  та  $T_k$  базової структури має запас підвищення динамічної точності.

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія перехресного зв'язку витрати сировини на температуру сировини після нагрівача. 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 третього розділу розглянуто не лінійність об'єкту, розроблено модель САК з традиційним та САК з нечітким регулятором,

синтез, тестування та налагодження САК проводилися на спрощеній моделі ОК. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Визначено функції приналежності до нечітких множин, сформовано бази правил функціонування регуляторів у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначено алгоритми нечіткого виводу – Сугено 0-порядку.

Встановлено, що за якістю регулювання такі САК функціонують приблизно однаково, а можливо трохи краще, ніж САК з традиційним ПІД-регулятором при об'єкті керування з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої реалізації параметричної оптимізації САК за характеристиками нечіткого регулятора виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може, виконувати роль нейрорегулятора. Тренування штучної нейронної мережі виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink. Розроблена модель САК з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САК з нейрорегулятором проведена при тих же умовах, що і САК з традиційним ПІД регулятором.

У результаті моделювання різних САК було встановлено, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САК, це за інтегральним показником якості регулювання відповідно 89135,716 у САК з нейрорегулятором і 90110,283 у САК з традиційним ПІД-регулятором. Середнє квадратичне відхилення регульованої зміни від заданого значення, при випадкових впливах, що збурюють, практично однаково як у САК з традиційним ПІД-регулятором 3,0, так і у САК з нейрорегулятором 2,9.

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора була сформована програма для промислового контролера.

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

регулювання, але для подальших досліджень, проведених в четвертому розділі, обрано автономну САК на базі традиційного ПІД-регулятора.

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 ОК близькі до гранично-допустимих, ОК є суттєво нестационарним, схильний до інтенсивних неконтрольованих збурень, має запізнення в каналах управління, а наслідки порушень тяжкі.

Для процесу каталітичної очистки інертних газів 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:

- 1) Серед трьох запропонованих систем СГК є енергоефективнішою на 7.3% від САК базової структури і на 7.9% від САК ПДТ;
- 2) Серед трьох запропонованих систем СГК є продуктивнішою на 5.2% від САК базової структури і на 6% від САК ПДТ;

Зі збільшенням продуктивності та енергоефективності СГК в порівнянні з іншими системами якість її регулювання не зменшилася і значення регульованої змінної коливалося допустимих межах.

В ході виконання п'ятого 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 переведення 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 каталітичної очистки інертних газів, а також людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога у вигляді веб-візуалізації.

Також, проведено оцінку економічної ефективності впровадження розробок. Основні результати:

Чистий приведений дохід

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

Індекс доходності

$$\text{ІД} = \text{IC id ЧГН}_i \sum_{i=1}^n (+) = 5\,493,84 / 844,708 = 6,5$$

Термін окупності

$$\text{ТОІ} = 844,708 / 5\,493,84 = 0,154$$

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 проекту є доцільною, строк окупності інвестицій буде у межах прийнятого терміну фінансової оцінки проекту ТОІ складає 0,154 періоду(року), ІД=6,5.

## Перелік використаних джерел

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 технологічних об'єктів», Одеса-2000 р.
3. Ужанський В. С. Автоматизація холодильних машин и установок, 1982р. – 304 с.
4. Конспект курсу лекцій з дисципліни “ Теорія автоматичного управління ” (частина I)– Хобін В.А. ОНАХТ. Одеса – 2012 р.
5. Конспект курсу лекцій з дисципліни “ Теорія автоматичного управління ” (частина II)– Хобін В.А. ОНАХТ. Одеса – 2012 р.
6. 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 р. – 15 с.
7. 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.Світий. – Одеса: ОНАХТ, 2013р. – 88 с.
8. 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, 2011р. – 13.с
9. Хобін В. А., Левінський М.В. Монографія «Адаптивне керування об'єктами технологічного типу: алгоритми пасивного самоналагодження коефіцієнта передачі регуляторів». Одеса, 2019р. – 227 с.
10. CODESYS Control for BeagleBone SL | CODESYS Store International - <https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html>
11. Терморегулятори BeagleBone Black, конфігурація штифтів, особливості та застосування (microcontrollerslab.com) -

<https://microcontrollerslab.com/beaglebone-black-pinout-pin-configuration-features-applications/>

12. PowerPoint-Präsentation (codesys.com)

<https://www.codesys.com/fileadmin/data/Images/Download/CODESYS-Features-Improvements-lv.pdf>

13. BeagleBone Black — BeagleBoard Documentation -  
<https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html>

14. Beagleboard:BeagleBoneBlack Debian - eLinux.org -  
[https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack\\_Debian#U-Boot\\_Overlays](https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays)

15. Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins (vadl.github.io) -  
<https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>

16. 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-orientirovanoe\\_proektirovanie\\_programmnogo\\_obespecenia\\_dla\\_vstraivaemyh\\_sistem\\_v\\_srede\\_MatlabSimulink](https://www.researchgate.net/publication/307758793_Modelno-orientirovanoe_proektirovanie_programmnogo_obespecenia_dla_vstraivaemyh_sistem_v_srede_MatlabSimulink).

17. Кодер ПЛК Simulink - MATLAB (mathworks.com)  
<https://www.mathworks.com/products/simulink-plc-coder.html>

18. Simulink PLC Coder(TM) Import (codesys.com)  
<https://us.store.codesys.com/simulink-plc-coder-import.html>

19. 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)

20. 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)

21. 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)

22. Обмеження на генерацію структурованого текстового коду - MATLAB і Simulink (mathworks.com) <https://www.mathworks.com/help/plccoder/ug/structured-text-code-generation-limitations.html>

23. Борин В. С., Головач І. Р., Ікалюк А. А Розробка автоматизованої системи управління технологічним процесом виробництва етилену / Методи та прилади контролю якості, 2022, № 2 (49). - С. 58-65.

24. Barranco J. P., Selma C. G. Automatic reactor for catalytic microactivity studies/ Patent US 8460606B2, IPC B01J19/0046, claimed 2005-06-02 №ES200401347, publication 2008-03-13.

25. Левчук І. Л., Тришкін В. Я., Ковбик А. А. Спосіб керування процесом каталітичного риформінгу. Патент України №57336 МПК G05D 27/00. Заявл 23 08 2002 №2002086958. Опубл 16 06 2003, Бюл. № 6, 2003 р.

26. Joe V. Pool Control system for a reactor/ Patent US 4272823A IPC B01J 8/001, claimed 1979-10-26 №US06/088,716, publication 1981-06-09.

27. Carr N., Kramer S., Stahlfeld D. Apparatus for controlling chemical processes/ Patent US 3725653A, IPC G06G7/58, claimed 1968-04-11 № US72064468A, publication 1973-04-03.

28. Крупник Л. І., Павлова Н. П., Федорченко А. Н. та ін. Газофазний каталітичний реактор/ Патент України № 11808, МПК: B01J 8/02, заявл 11.07.89 № 4717489/26, опубл. 25.12.1996.

29. Степанов А. В. Трубчастий каталітичний реактор/ Патент України №4573, МПК: B01J 8/02, заявл 07.02.91 №4929007/26, опубл. 28.12.94. Бюл № 7-1.

30. Зарді У., Пагані Д. Спосіб проведення екзотермічного гетерогенного синтезу та реактор для його здійснення/ Патент України №1854, МПК: B01J 8/04, заявл. 27.06.88 № 2457/80, опубл. 20.12.1994.

31. Хейгвейш Д. П., Брайн П. Ф., Трамбол С. Є. Спосіб каталітичного риформінгу вуглеводню та реакторна система для каталітичного риформінгу/ Патент України №51609, МПК: C10G 9/16, C10G 35/00, заявл. 06.03.1992 №93004174, опубл. 16.12.2002.

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ З ВИСОКИМ ВИДІЛЕННЯМ ТЕПЛОТИ В КАТАЛІТИЧНОМУ РЕАКТОРІ AUTOMATION OF PROCESSES WITH HIGH HEAT RELEASE IN A CATALYTIC REACTOR

Філярський В.І.<sup>1</sup>, Гурський О.О.<sup>2</sup>, Воїнова С.О.<sup>3</sup>

Filiarskyi V.I.<sup>1</sup>, Gurskiy O.O.<sup>2</sup>, Voynova S.O.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

<sup>1,2,3</sup>Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

ORCID: <sup>1</sup>0009-0000-3230-7814, <sup>2</sup>0000-0001-5158-2125, <sup>3</sup>0000-0003-0203-0599

E-mail: <sup>1</sup>filyarsky@gmail.com, <sup>2</sup>Gurskiya2017@gmail.com, <sup>3</sup>voynova\_s@yahoo.com

**Анотація.** Автоматизація процесів з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі є важливою задачею в хімічній промисловості. Ця задача стає все більш актуальною в умовах сучасного розвитку промисловості. Автоматизація процесу в каталітичному реакторі дозволяє забезпечити точний контроль над процесом і значно збільшити ефективність його роботи. Важливим елементом автоматизації каталітичних реакторів є автоматичне регулювання температури газу на виході з реактора. Ця система забезпечує збалансований рівень теплоти в реакторі шляхом автоматичної підтримки витрати, тиску і температури реагентів. Іншим елементом схеми автоматизації реактора є система автоматичного захисту від перевантаження шляхом автоматичного вимикання елементів, що припиняють подачу реагентів. Крім того, сучасні каталітичні реактори можуть мати вбудовані системи дистанційного моніторингу та діагностики стану реактора, що дозволяє вчасно реагувати на можливі неполадки та уникнути аварій. Каталітичний реактор описується нелінійними моделями, тому актуальним для нього є використання при побудові систем автоматичного керування (САК) інтелектуальних алгоритмів керування з використанням нечітких регуляторів та нейрорегуляторів. Порівняльний аналіз класичної САК та систем з нечітким регулятором та нейрорегулятором показав переваги застосування останніх перед класичною для керування об'єктами з нелінійними характеристиками. Для технічних систем з випадковим характером збурень, високим порядком їх динамічних моделей та з нелінійними характеристиками існує проблема керування в умовах невизначеності. Використання нечітких регуляторів та нейрорегуляторів забезпечує грубість і стабільну збіжність перехідних процесів у системі, тому такий підхід слід вважати доцільним.

**Ключові слова:** каталітичний реактор, автоматичне керування, інтелектуальні системи керування, нечіткий регулятор, нейрорегулятор.

**Abstract.** Automation of processes with high heat release in a catalytic reactor is an important task in the chemical industry. This task is becoming more and more relevant in the conditions of modern industrial development. Automation of the process in the catalytic reactor allows you to ensure precise control over the process and significantly increase the efficiency of its operation. An important element of the automation of catalytic reactors is the automatic regulation of the gas temperature at the outlet of the reactor. This system ensures a balanced level of heat in the reactor by automatically maintaining the flow rate, pressure and temperature of the reagents. Another element of the reactor automation scheme is a system of automatic protection against overload by automatically turning off elements that stop the supply of reagents. In addition, modern catalytic reactors can have built-in systems for remote monitoring and diagnostics of the reactor condition, which allows timely response to possible problems and avoid accidents. The catalytic reactor is described by nonlinear models; therefore, it is relevant to use intelligent control algorithms using fuzzy controllers and neuroregulators in the construction of automatic control systems (ACS).

A comparative analysis of the classic ACS and systems with a fuzzy controller and a neuron controller showed the advantages of using the latter over the classic one for controlling objects with nonlinear characteristics. For technical systems with a random nature of disturbances, a high order of their dynamic models, and with nonlinear characteristics, there is a problem of control under conditions of uncertainty. The use of fuzzy and neuroregulators ensures roughness and stable convergence of transient processes in the system, so this approach should be considered appropriate.

**Keywords:** catalytic reactor, automatic control, intelligent control systems, fuzzy controller, neuroregulator.

**Вступ.** Сучасний етап розвитку світового виробництва характеризується наявністю окремих галузей, в яких використовують високо очищені продукти, зокрема гази високої чистоти.

Інертними газами високої чистоти заповнюють джерела світла при виробництві швидко вдосконалюваної мікропроцесорної техніки. Також висока чистота інертних газів, які заповнюють детекторні прилади, є

вимогою при проведенні експериментальних наукових досліджень в сфері фундаментальної фізики, зокрема при проведенні ядерних досліджень. Вимога високої чистоти продукту є характерною також для діагностичного медичного обладнання, зокрема для магнітно-резонансних томографів. Ще вимога високої чистоти продукту висувається у військово-промисловому комплексі при виготовленні зброї та в деяких інших галузях.

Високоякісна очистка інертних газів здійснюється в очисному комплексі, в якому передбачено попередню підготовку продукту в реакторі для видалення зайвих сполук, адсорбцію та ректифікацію.

Для здійснення першого етапу очистки, який є найбільш відповідальним серед інших, використовують каталітичні реактори.

З метою забезпечення високої ефективності функціонування каталітичного реактора в ньому застосовують каталізatori, які мають високу активність та стійкість до високих температур. Їх використання дозволяє знизити кількість енергії, необхідної для здійснення реакції, і забезпечити високу якість продукту.

Каталітичні реактори є важливими компонентами в хімічній та нафтопереробній промисловості, де вони використовуються для прискорення хімічних реакцій та підвищення виходу продукту. При функціонуванні таких реакторів здійснюється активне виділення теплоти. За певних умов збільшення виділення теплоти може призвести до перегріву реактора і, в кінцевому рахунку, до зниження ефективності процесу. Тому технологічним процесом підтримки температурного режиму в каталітичному реакторі необхідно керувати. Причому лише автоматичне керування забезпечить високоточне додержання технологічного регламенту. Тому автоматизація процесів з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі є актуальною.

**Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** Чимало дослідників присвятили свої роботи питанню автоматизації технологічного процесу в каталітичних реакторах. Так Борин В. С., Головач І. Р., Ікалюк А. А. запропонували автоматизовану систему керування технологічним процесом піролізу етилену, програму керування, яка включає математичне моделювання процесу запуску печі при змінних технологічних параметрах [1]. Барранко Х. П., Сельма К. Г. розробили автоматичний реактор для вивчення каталітичної активності рідких реагентів, який містить регулятор масової витрати для подачі потоку газів в реактор [2]. Левчук І. Л., Тришкін В. Я., Ковбик А. А. запропонували спосіб керування процесом каталітичного риформінгу шляхом регулювання температури газосировинної суміші на входах у реактори зміною подачі палива в нагрівачі, в залежності від зміни концентрації ароматичних вуглеводнів у парогазовій суміші на виході реакторів, складу та витрати вихідної сировини і водневмісного газу [3]. Пул Д. В. розробив систему керування реактором, яка містить регулювання температури потоку живлення, що вводиться в перший шар каталізатора в реакторі та регулювання температури в другому шарі каталізатора введенням потоку живлення в нього для охолодження потоку, що витікає з першого шару каталізатора [4]. Карр Н, Крамер С, Штальфельд Д запропонували спосіб і пристрій для керування складними хімічними процесами, що включає контроль та регулювання вихідної змінної реакції хімічного процесу в режимі реального часу з використанням динамічного моделювання [5]. Крупник Л. И, Павлова Н. П., Федорченко А. Н. розробили газофазний каталітичний реактор, який забезпечує високу продуктивність процесу каталізу шляхом інтенсифікації перенесення теплоти реакції [6]. Степанов А. В. запропонував трубчастий каталітичний реактор, який забезпечує високу ефективність каталітичних процесів, шляхом формування регулярного шару каталізатора [7]. Зарді У., Пагані Д. розробили спосіб проведення екзотермічного гетерогенного синтезу та реактор для його здійснення, який з метою збільшення продуктивності реактора передбачає перерозподілення сировинно-енергетичних потоків в ньому [8]. Хейгвейш Д. П., Брайн П. Ф., Грамбол С. Є. запропонували спосіб каталітичного риформінгу вуглеводню та реакторну систему для нього, що забезпечує стійкість до накопичення вуглеводню частини реакторної системи шляхом модифікації стадій каталізу [9]. Мілбергер Е. С. розробив автоматичну установку каталітичного скринінгу, яка забезпечує аналіз продукту в кожній камері реактора [10]. Однак всі розглянуті рішення характеризуються спільним недоліком, а саме низькою якістю готового продукту, що має неприпустиму концентрацію домішок, які не прореагували в реакторі внаслідок низької точності стабілізації температури в ньому.

В одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів та робото-технічних систем в рамках науково-дослідної роботи магістра започатковано створення ефективної системи автоматичного керування (САК) технологічним процесом в каталітичному реакторі з високим виділенням теплоти.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності керування процесом в каталітичному реакторі з високим виділенням теплоти шляхом пошуку та впровадження оптимальних режимів роботи реактора.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- конкретизація задачі дотримання регламентів керування технологічним процесом, розробка і реалізація комплексу його моделей як об'єкта керування (ОК) в імітаційному середовищі Matlab;
- параметрична ідентифікація моделей ОК;
- удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САУ на основі застосування апарату нечіткої логіки та нейронних мереж;
- розробка і параметричний синтез традиційної САУ, оптимізація алгоритмів регулювання, САУ нечіткої логіки, САУ на базі нейронної мережі та їх порівняльний аналіз.

**Методи і матеріали досліджень.** При проведенні теоретичних досліджень основним використаним методом був метод системного аналізу. Основним експериментальним методом було обрано імітаційне

модельовання. Для ідентифікації моделей було використано методи активного та пасивного експерименту, та типові інженерні методи ідентифікації моделей ОК. При синтезі САР було використано методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методи параметричного синтезу САР, оптимальний параметричний синтез, методи нечітких множин та нейронних мереж.

Однією з основних проблем при автоматичному керуванні технологічними процесами є нелінійність контурів регулювання. В таких випадках зазвичай використовують такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація, за яких не завжди отримують бажаний результат. Інший варіант САК, який забезпечує більшу ефективність, це системи керування з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Найбільш вигідне, в порівнянні з традиційними САК, використання нечіткого керування за умов невизначеності інформації про динамічну поведінку ОК. Нечіткі регулятори - більш грубі, оскільки цей підхід забезпечує можливість формування числа правил керування, в залежності від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурень.

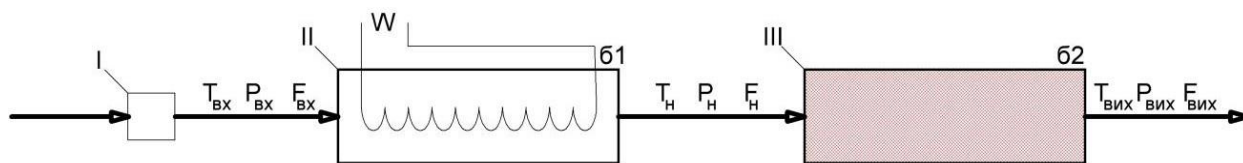
Нечіткі регулятори забезпечують грубість і стабільну збіжність процесів в умовах невизначеності, що виникає через ряд факторів таких як: збурюючі випадкові впливи, складність розробки динамічної моделі, її високий порядок та нелінійний характер.

Істотні невизначеності у статичних і динамічних характеристиках процесу з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі як ОК представляють труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи керування. У зв'язку з цим є актуальним застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

Наявність в сучасних системах програмування контролерів вбудованих бібліотек нечіткого керування, що мають добрий графічний інтерфейс, у якому дуже легко і наочно представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку, що дуже спрощують налаштування системи автоматичного регулювання, є перевагою нечіткого регулювання.

**Результати досліджень** Першим етапом дослідження був аналіз технологічного процесу в каталітичному реакторі (рис. 1). Газ через регулятор витрат газу I надходить з витратами  $10 \text{ м}^3/\text{год}$  в електричний нагрівач II потужністю  $1000 \text{ W}$ , де попередньо підігрівається і одразу надходить до каталітичного реактора III. Проходячи через каталітичний реактор, газ вступає в хімічну реакцію з каталізатором з виділенням теплоти. Потужність електричного нагрівача впливає на температуру газу на виході реактора. При температурі газу на виході реактора  $T_{\text{вих}} = 500 \pm 10^\circ\text{C}$  всі зайві вуглеводні згорають, і газ стає готовим до подальшої обробки та використання.

Було побудовано параметризовану схему технологічного процесу в каталітичному реакторі (рис. 1). На її підставі було складено параметричну схему (рис. 2) та концептуальну модель ОК (рис. 3). Проведено ідентифікацію моделей динаміки та статички ОК, розроблено повну модель ОК.

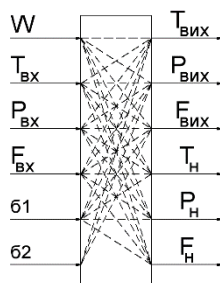


- I – регулятор витрат газу
- II – електричний нагрівач
- III - каталізатор
- W – потужність електричного нагрівача
- 61– конструкційні особливості електричного нагрівача

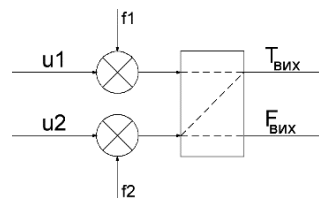
- 62 - конструкційні особливості каталізатора
- $T_{\text{вх}}$ – температура вхідного газу
- $P_{\text{вх}}$ – тиск вхідного газу
- $F_{\text{вх}}$ – витрати вхідного газу
- $T_{\text{н}}$ – температура нагрітого газу

- $P_{\text{н}}$ – тиск нагрітого газу
- $F_{\text{н}}$ – витрати нагрітого газу
- $T_{\text{вих}}$ – температура газу на виході реактора
- $P_{\text{вих}}$ – тиск газу на виході
- $F_{\text{вих}}$ – витрати газу на виході

**Рисунок 1. - Параметризована технологічна схема процесу в каталітичному реакторі**



**Рисунок 2. - Параметрична схема ОК**



- $u_1$  – потужність електричного нагрівача
- $u_2$  – % х.р.о. подачі газу у каталізатор

**Рисунок 3. - Концептуальна модель ОК**

Наступним етапом був параметричний синтез САУ з традиційним – лінійним ПІД регулятором для ОК з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання « $u_1 - T_{\text{вих}}$ ». Настроювальні параметри регуляторів були визначені на основі параметрів лінійної моделі ОК.

Для параметричної оптимізації регуляторів системи керування в програмному середовищі Matlab/Simulink 5.2 у відповідності з рис. 4 була розроблена схема моделювання системи керування з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів за наступним компромісним критерієм якості роботи системи: 
$$J = \int_0^t (e_1(t) + \beta \cdot |e_2(t)|) dt \rightarrow \min$$
, де  $e_1(t)$  – різниця між фактичним і заданим значеннями тиску в ресивері;  $e_2(t)$  – різниця між фактичним і заданим значенням температури повітря в сушильній камері;  $\beta$  – ваговий коефіцієнт.

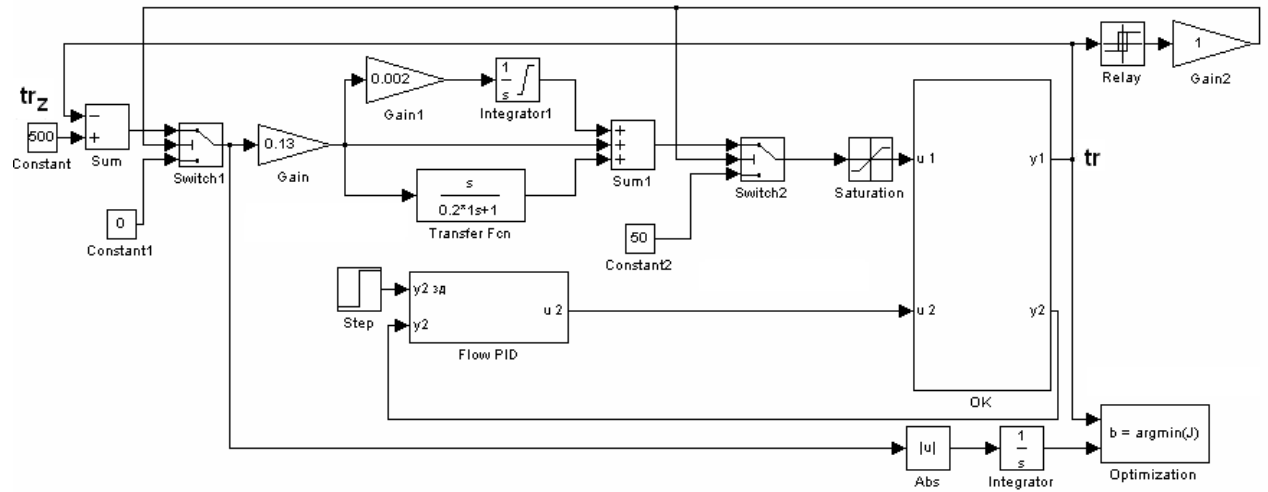


Рисунок 4. – Структурна схема моделі САК з традиційним ПІД-регулятором

У результаті параметричної оптимізації за обраним інтегральним показником якості роботи системи та за допомогою відповідного модуля – додатка MATLAB/Simulink 5.2 були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації і відповідні настроювальні параметри регуляторів. Якість регулювання температури покращилася після оптимізації САК. Однак при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можливі лише при певних режимах роботи чи початкових умовах системи керування. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальними в іншому випадку, що визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

З урахуванням особливостей процесу з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі, як у нелінійному ОК, доцільно застосувати в контурі регулювання температури газу на виході з реактору нечіткий регулятор (НР). Застосування НР (Fuzzy – регулятора) обумовлено складністю опису його статичних режимів роботи.

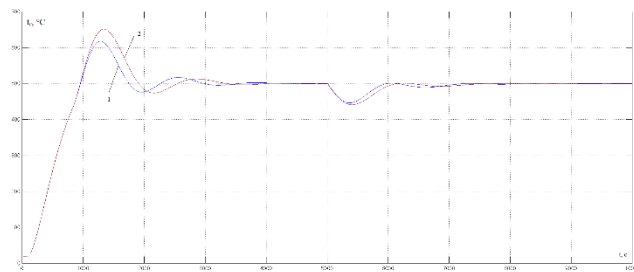
Складність опису статичних режимів роботи процесу з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними. Таким чином, у роботі була реалізована модель САК із Fuzzy – регулятором.

Розроблений НР є об'єднанням трьох блоків фазікерування: фазіфікації, логічного висновку і дефазіфікації. Щодо структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних НР і будується за класичними зразками.

Було складено п'ять правил функціонування регулятора та таблицю баз знань для НР температури на виході реактора.

У результаті моделювання САУ з НР були отримані графіки перехідних процесів виходу системи на

номінальний режим функціонування (рис. 5) і також перехідні процеси при детермінованому і випадковому збурюючому впливі (рис. 6), що був



введений на 200 секунд. Для порівняльного аналізу також були представлені відповідні графіки перехідних процесів у САУ з традиційним ПІД-регулятором.

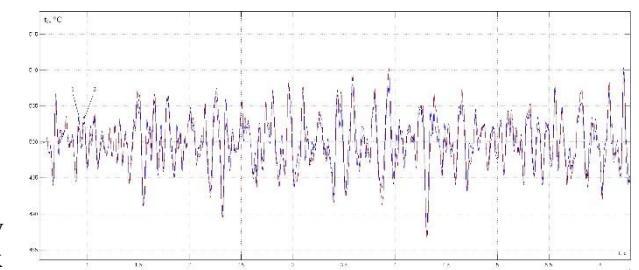


Рис. 5 - Графіки моделювання перехідних процесів Рис. 6 - Графіки моделювання перехідних процесів

в САК при виході на номінальний режим:

в САК при випадкових збурюючих впливах:

1 – САК з традиційним ПІД-регулятором; 2 – САК з НР Сугено 0-порядку

**Обговорення результатів.** З рисунків можна побачити, що за якістю регулювання різні САК функціонують ідентично – як з традиційним, так і з НР. Графіки перехідних процесів різні САК зливаються в один. Це отримано завдяки корегуванню параметрів НР.

Для нелінійних ОК можна використовувати нейромереві алгоритми керування.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) застосовуються в областях, де людський інтелект малоєфективний, а традиційні обчислення трудомісткі або фізично неадекватні. Застосування ШНМ актуалізується з необхідністю розв'язку погано формалізованих задач. Основні області застосування ШНМ: автоматизація процесів класифікації, прогнозування, розпізнавання, прийняття рішень, керування, кодування і декодування інформації та ін.

ШНМ як нейрорегулятор здійснює нелінійне перетворення вхідного сигналу і формування керуючого впливу. Великою перевагою цього регулятора є те що він може мати достатню кількість оптимізованих параметрів (коефіцієнтів міжнейронних зв'язків), що дає можливість використовувати його для різних ОК з нелінійними статичними характеристиками. У даній роботі нейронна мережа – це математична модель з параметрами, що оптимізуються, яка буде виконувати функції розробленого раніше НР.

Нейрорегулятор у нашому випадку – це ШНМ, що характеризується нелінійними характеристиками. Завдяки цьому застосування нейрорегулятора на базі ШНМ дозволяє досягти більш високих результатів в керуванні. Нейронна мережа – це послідовність нейронів (нейронелементів), з'єднаних між собою синапсами. Структура нейронної мережі прийшла в світ програмування з біології. Найбільш поширена структура – багат шарова, що застосовується в якості регуляторів нейромеревих алгоритмів керування.

У зв'язку з тим, що приріст керуючої дії нейрорегулятора може приймати як позитивне значення, так і негативне, при його синтезі необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку використано гіперболічну тангенціальну функцію (*tansig*), яка дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1).

У командному вікні Command Window середовища Matlab були прописані команди для створення і навчання штучної нейронної мережі, що повинна виконувати функції нейрорегулятора. Вектори вхідних *P* і вихідних *t* значень нейрорегулятора були отримані на основі характеристик НР, що був синтезований у відповідному *fis*- редакторі середовища Matlab (рис. 7). Для визначення векторів *P* і *t* були визначені відповідні значення відхилень між заданими та фактичними значеннями температур  $\Delta t$  і відповідні значення приростів керуючих впливів у САУ з НР.

```
» P=[-1000 -750 -500 -200 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 200 500 750 1000];
» t=[-0.1 -0.075 -0.05 -0.02 -0.0025 -0.002 -0.0015 -0.001 -0.0005 0 0.0005 0.001 0.0015 0.002 0.0025 0.02 0.05 0.075 0.1];
» net=newff([-1000 1000], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.596177/0, Gradient 259.49/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 4.51954e-005/0, Gradient 0.0758553/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 5.82849e-006/0, Gradient 0.011765/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 2.34042e-006/0, Gradient 0.00663727/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 1.39982e-006/0, Gradient 0.00385997/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 9.91536e-007/0, Gradient 0.0024712/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 7.67967e-007/0, Gradient 0.0017099/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 6.27883e-007/0, Gradient 0.00125349/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 5.32109e-007/0, Gradient 0.000959648/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 2.19521e-007/0, Gradient 0.00851435/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 1.41392e-007/0, Gradient 0.00361818/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 1.05187e-007/0, Gradient 0.00201157/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 8.39543e-008/0, Gradient 0.00128573/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a=sim(net, P)
a =
Columns 1 through 7
-0.0992 -0.0758 -0.0498 -0.0196 -0.0025 -0.0020 -0.0015
Columns 8 through 14
-0.0010 -0.0005 -0.0000 0.0005 0.0010 0.0015 0.0019
Columns 15 through 19
0.0024 0.0198 0.0498 0.0750 0.1004
» gensim(net)
```

**Рисунок 7. – Команди для генерації нейромереві, що відтворює складову нейрорегулятора**

Сформовані штучні нейронні мережі були визначені у схемі моделювання замість НР, як показано на рис. 8. У такій спосіб була синтезована модель САК з нейрорегулятором засобами середовища Matlab/Simulink.

У результаті моделювання САК з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САК з НР та традиційним ПІД-регулятором (рис. 9, 10).

З графіків бачимо, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором працює гірше, ніж САК з традиційним регулятором. Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування в складає 2000 секунд для САК з традиційним регулятором, 2500 секунд для САК з нейрорегулятором та НР.

Але при детермінованому збурюючому впливі у САК з нейрорегулятором час регулювання є більшим, ніж в САК з традиційним регулятором. Максимальне динамічне відхилення з нейрорегулятором є більшим, ніж в

інших САК. При цьому регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має вісім ваг міжнейронних з'єднань та шість зміщень, які можна оптимізувати для покращення якості регулювання.

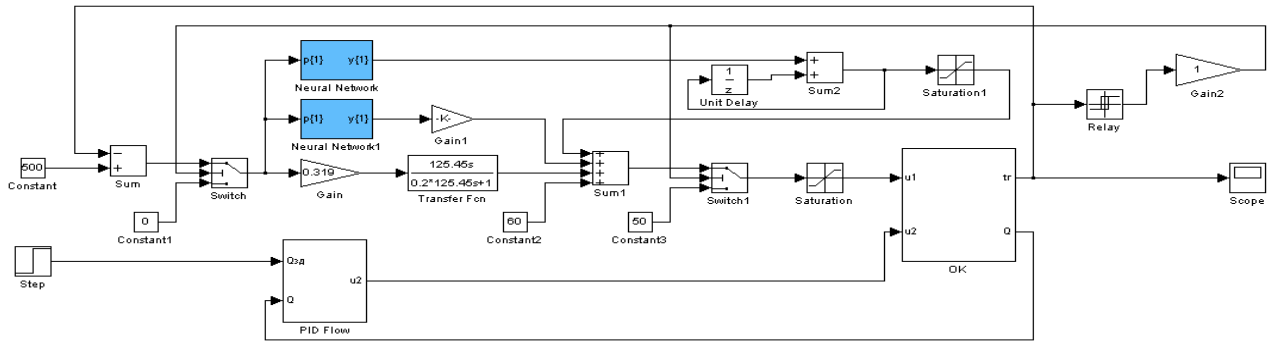


Рисунок 8. – Схема моделювання САК температури в реакторі з нейрорегулятором

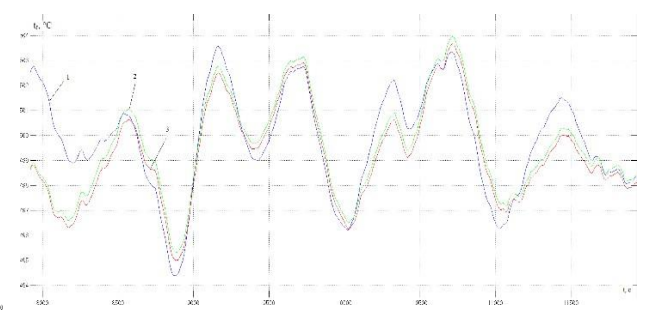
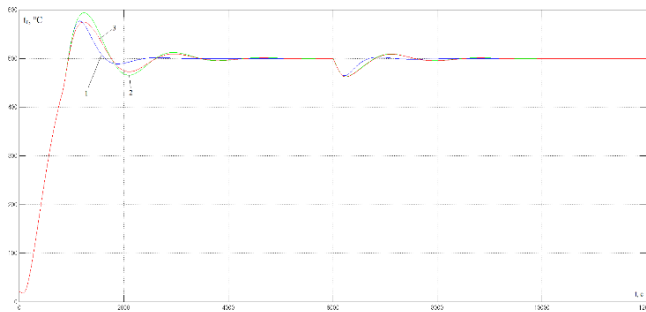


Рис. 9. - Графіки моделювання перехідних процесів у САК при виході на номінальний режим:

Рис. 10. - Графіки моделювання перехідних процесів у САК при випадкових збурюючих впливах:

1 – з традиційним ПІД-регулятором; 2 – з НР; 3 – з нейронним регулятором

Виходячи з якості регулювання різних САК, необхідно оптимізувати нейрорегулятор за тих же умов, що і попередній традиційний ПІД-регулятор для визначення остаточного висновку про доцільність застосування різних САК.

Для покращення якості регулювання проведена параметрична оптимізація САК з нейронним регулятором. Оптимізувались чотири вагових коефіцієнти нейронних з'єднань першого входного шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась за таких же умов і за тим же інтегральним показником якості, які були при оптимізації САК з традиційним ПІД регулятором. У програмному середовищі Matlab/Simulink 5.2 побудовано структурну схему моделі САК з нейронним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором для визначення оптимальних налаштувань системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання, що зображена на рис. 11.

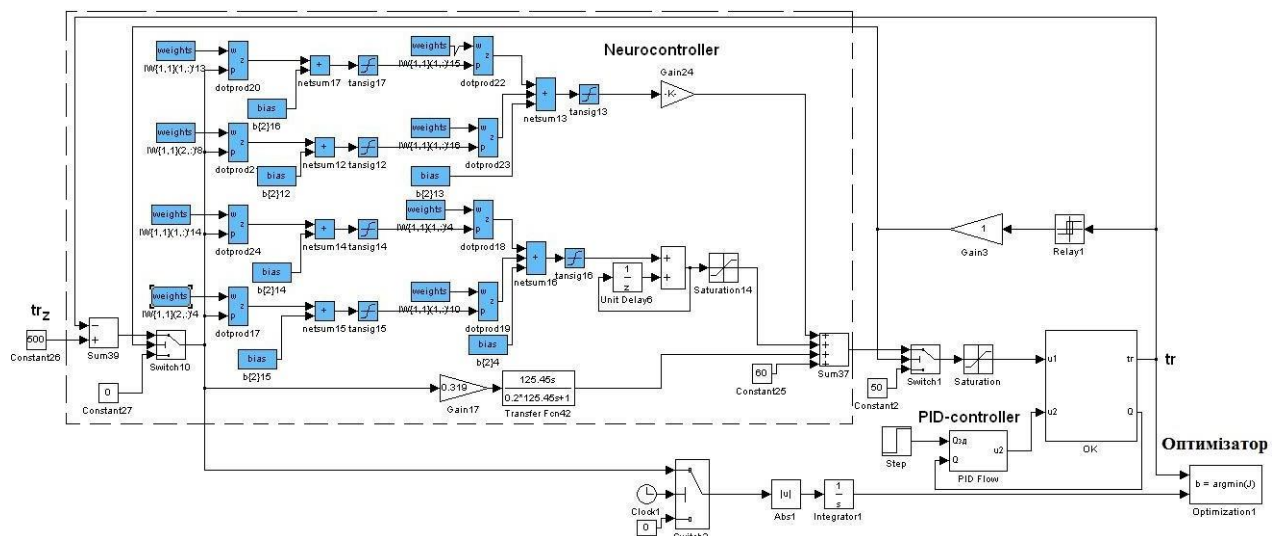
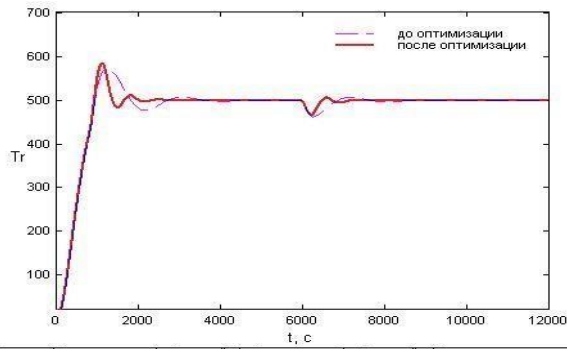


Рисунок 11. – Структурна схема моделі САК з нейронним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі та результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації при визначеному інтегральному критерії якості роботи системи, що зображені на рис. 12.



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
w1	-0.0010598	-1	-0.00021	1	до - 25877.3363
w2	4.8334e-006	-1	0.00023	1	после - 13469.3087
w3	0.0091777	-1	-0.009	1	
w4	8.318e-005	-1	0.00005	1	
					Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1500
					фактическое - 230

Після параметричної оптимізації система була перевірена на грубість за допомогою програмного середовища Matlab/Simulink для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора забезпечити стійкість САК при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні +/- 20 %.

Система не втрачає стійкості при різних параметрах у діапазоні +/- 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.

На заключному етапі розробки САК виконаний

порівняльний аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання.

**Рисунок 12. – Результати параметричної оптимізації нейронного регулятора САК з нелінійним каналом ви-регулювання**

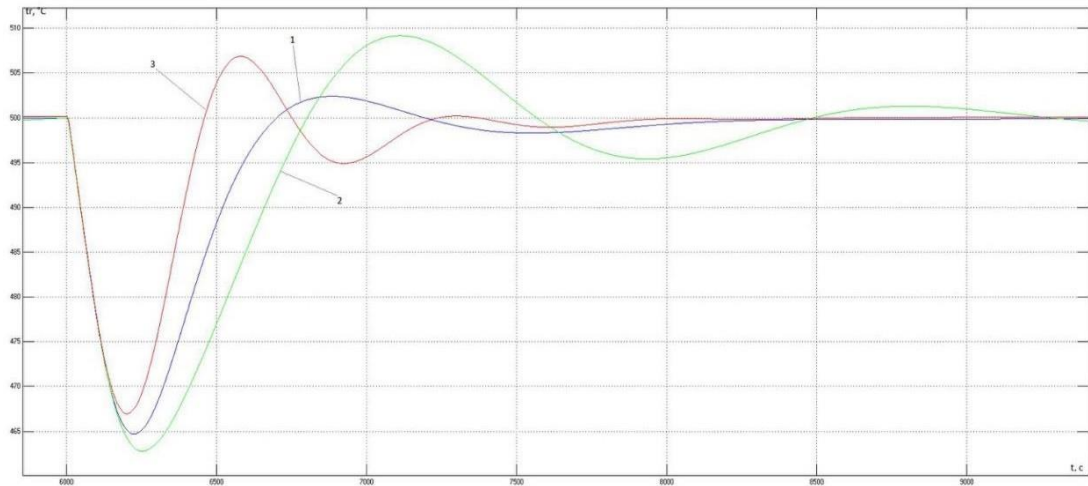
13).

отримані графіки перехідних процесів при випадкових збурюючих впливах (рис. 14).

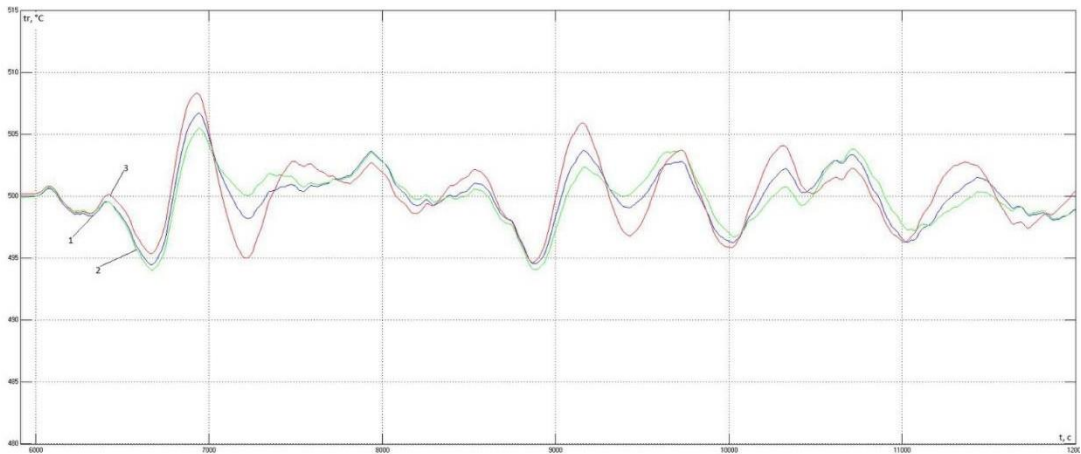
У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САК за

ходом на номінальний режим роботи (рис.

Також у результаті моделювання були



**Рисунок 13. - Графіки перехідних процесів у САК: 1 – з традиційним ПД-регулятором; 2 – з НР Сугено 0-порядку; 3 – з нейронним регулятором**



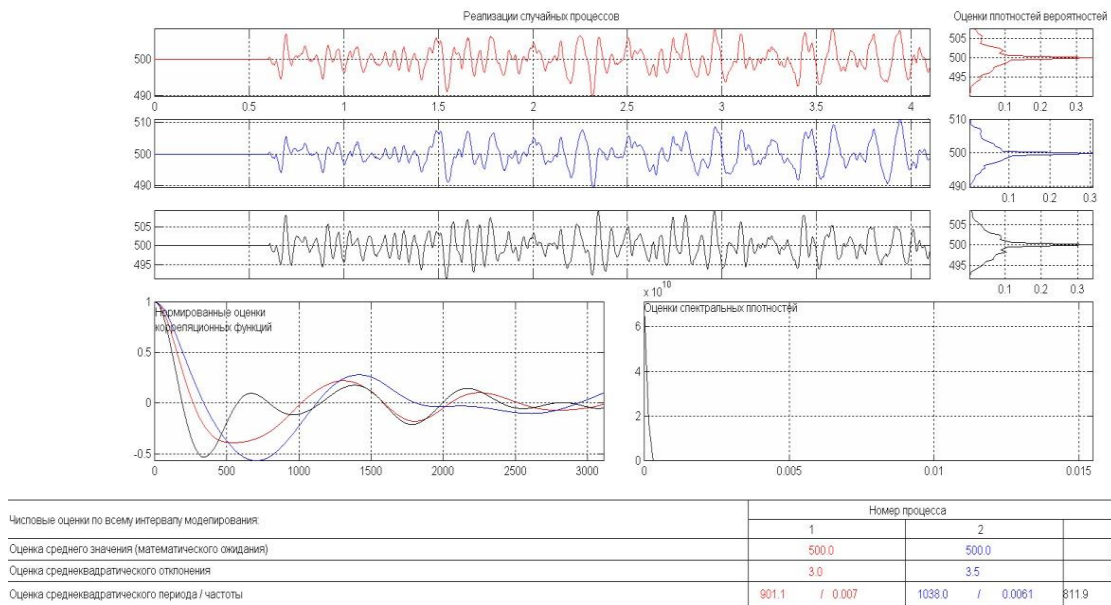
**Рисунок 14. - Графіки перехідних процесів при випадкових збуреннях у САК:  
1 – з традиційним ПІД-регулятором; 2 – з НР Сугено 0-порядку; 3 – з нейронним регулятором**

З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування менший при САК з традиційним та нейрорегулятором, ніж при САК з НР, але при випадкових збурюючих впливах, різниця в якості регулювання різних САК практично непомітна.

За допомогою аналізатора ймовірнісних характеристик, що вбудований у середовище Matlab/Simulink, визначена якість регулювання різних САК при випадкових збурюючих впливах. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання САК з традиційним ПІД-регулятором, з НР та САК з нейронним регулятором при випадкових збурюючих впливах.

Результати представлені на рис. 14, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання різних САК.

З рис. 15 можна побачити, що за середньоквадратичним відхиленням САК з традиційним ПІД-регулятором, САК з нейронним регулятором і САК з НР функціонують практично ідентично. В кінцевому випадку показники функціонування різних САК за якістю регулювання були зведені до табл. 1.



**Рисунок 15. - Результати аналізу аналізатора ймовірнісних характеристик**

**Таблиця 1. – Показники якості регулювання різних САК**

Критерій	САК		
	з традиційним ПІД регулятором	з нечітким регулятором	з нейрорегулятором
Час регулювання	519	659	389
Максимальне динамічне відхилення	35,32	37,22	33
Інтегральний показник	90110,283	105588,088	89135,716
Середньоквадратичне відхилення	3,0	3,5	2,9

З табл. 1 можливо зробити висновок, що за якістю регулювання САК з нейронним регулятором функціонує

краще, ніж САК з традиційним регулятором і ще краще, ніж САК з НР.

### Висновки

У науковій роботі було вирішено завдання, пов'язане з удосконаленням алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК процесом виділенням теплоти в каталітичному реакторі, на основі застосування апарату нечіткої логіки та нейронних мереж. У програмному середовищі Matlab/Simulink 5.2 були розроблені відповідні моделі різних САК та виконані їх порівняльні дослідження. Таким чином, набула подальшого розвитку методика синтезу САК з нейрорегуляторами, на основі середовища Matlab, з використанням характеристик нечітких регуляторів САК процесом виділенням теплоти в каталітичному реакторі

Порівняльний аналіз класичної САК і систем з нечітким регулятором та нейрорегулятором показав переваги застосування останніх перед класичною для керування об'єктами з нелінійними характеристиками. Відповідні дослідження мають практичне значення, оскільки започатковано створення ефективної САК технологічним процесом в каталітичному реакторі з високим виділенням теплоти, яка забезпечує високу якість готового продукту.

### Список використаних джерел

- [1] Борин В. С., Головач І. Р., Ікалюк А. А Розробка автоматизованої системи управління технологічним процесом виробництва етилену / Методи та прилади контролю якості, 2022, № 2 (49). - С. 58-65.
  - [2] Barranco J. P., Selma C. G. Automatic reactor for catalytic microactivity studies/ Patent US 8460606B2, IPC B01J19/0046, claimed 2005-06-02 №ES200401347, **publication** 2008-03-13.
  - [3] Левчук І. Л., Тришкін В. Я., Ковбик А. А. Спосіб керування процесом каталітичного риформінгу. Патент України №57336 МПК G05D 27/00. Заявл 23 08 2002 №2002086958. Опубл 16 06 2003, Бюл. № 6, 2003 р.
  - [4] Joe V. Pool Control system for a reactor/ Patent US 4272823A IPC B01J 8/001, claimed 1979-10-26 №US06/088,716, **publication** 1981-06-09.
  - [5] Carr N., Kramer S., Stahlfeld D. Apparatus for controlling chemical processes/ Patent US 3725653A, IPC G06G7/58, claimed 1968-04-11 № US72064468A, **publication** 1973-04-03.
  - [6] Крупник Л. І., Павлова Н. П., Федорченко А. Н. та ін. Газофазний каталітичний реактор/ Патент України № 11808, МПК: B01J 8/02, заявл 11.07.89 № 4717489/26, опубл. 25.12.1996.
  - [7] Степанов А. В. Трубчастий каталітичний реактор/ Патент України №4573, МПК: B01J 8/02, заявл 07.02.91 №4929007/26, опубл. 28.12.94. Бюл № 7-1.
  - [8] Зарді У., Пагані Д. Спосіб проведення екзотермічного гетерогенного синтезу та реактор для його здійснення/ Патент України №1854, МПК: B01J 8/04, заявл. 27.06.88 № 2457/80, опубл. 20.12.1994.
  - [9] Хейгвейш Д. П., Брайн П. Ф., Трамбол С. С. Спосіб каталітичного риформінгу вуглеводню та реакторна система для каталітичного риформінгу/ Патент України №51609, МПК: C10G 9/16, C10G 35/00, заявл. 06.03.1992 №93004174, опубл. 16.12.2002.
  - [10] Milberger E. C. Automatic catalytic screening unit/ Patent US 4099923A IPC G01N31/10, claimed 1977-01-17 №US05/760,198, **publication** 1978-07-11.
- References
- [1] Boryn V. S., Holovach I. R., Ikaliuk A. A Rozrobka avtomatyzovanoi systemy upravlinnia tekhnolohichnym protsesom vyrobnytstva etylenu/ Metody ta prylady kontroliu yakosti, 2022, № 2 (49). - S. 58-65.
  - [2] Barranco J. P., Selma C. G. Automatic reactor for catalytic microactivity studies/ Patent US 8460606B2, IPC B01J19/0046, claimed 2005-06-02 №ES200401347, publication 2008-03-13.
  - [3] Levchuk I. L., Tryshkin V. Ya., Kovbyk A. A. Sposib keruvannya protsesom katalitychnoho ryforminhu/ Patent Ukrainy №57336 MPK G05D 27/00, zaiavl. 23 08 2002 №2002086958, opubl. 16 06 2003, Biul. № 6, 2003r.
  - [4] Joe V. Pool Control system for a reactor/ Patent US 4272823A IPC B01J 8/001, claimed 1979-10-26 №US06/088,716, publication 1981-06-09.
  - [5] Carr N., Kramer S., Stahlfeld D. Apparatus for controlling chemical processes/ Patent US 3725653A, IPC G06G7/58, claimed 1968-04-11 № US72064468A, publication 1973-04-03.
  - [6] Krupnyk L. I., Pavlova N. P., Fedorchenko A. N. ta in. Hazofaznyi katalitychnyi reactor/ Patent Ukrainy № 11808, MPK: B01J 8/02, zaiavl 11.07.89 № 4717489/26, opubl. 25.12.1996.
  - [7] Stepanov A. V. Trubchastyi katalitychnyi reactor/ Patent Ukrainy №4573, MPK: B01J 8/02, zaiavl 07.02.91 №4929007/26, opubl. 28.12.94. Biul № 7-1.
  - [8] Zardi U., Pahani D. Sposib provedennia ekzotermichnoho heterohennoho syntezu ta reaktor dlia yoho zdiisnennia/ Patent Ukrainy №1854, MPK: B01J 8/04, zaiavl. 27.06.88 № 2457/80, opubl. 20.12.1994.
  - [9] Kheihveish D. P., Brain P. F., Trambol S. Ye. Sposib katalitychnoho ryforminhu vuhlevodniu ta reaktorna systema dlia katalitychnoho ryforminhu/ Patent Ukrainy №51609, MPK: C10G 9/16, C10G 35/00, zaiavl. 06.03.1992 № 93004174, opubl 16.12.2002.
  - [10] Milberger E. C. Automatic catalytic screening unit/ Patent US 4099923A IPC G01N31/10, claimed 1977-01-17 №US05/760,198, publication 1978-07-11.

ДОДАТОК Б



УКРАЇНА (19) **UA** (11) **153699** (13) **U**(51)

МПК

**F25B 49/02** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ  
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: **u 2022 04403** (72) Винахідник(и):

(22) Дата подання заявки: **24.11.2022** **Філярський Володимир Іванович (UA),**  
**Воїнова Світлана Олександрівна**

(UA) (24) Дата, з якої є чинними **17.08.2023**  
права інтелектуальної

(73) Володілець (володільці):

власності.

**Філярський Володимир Іванович,**

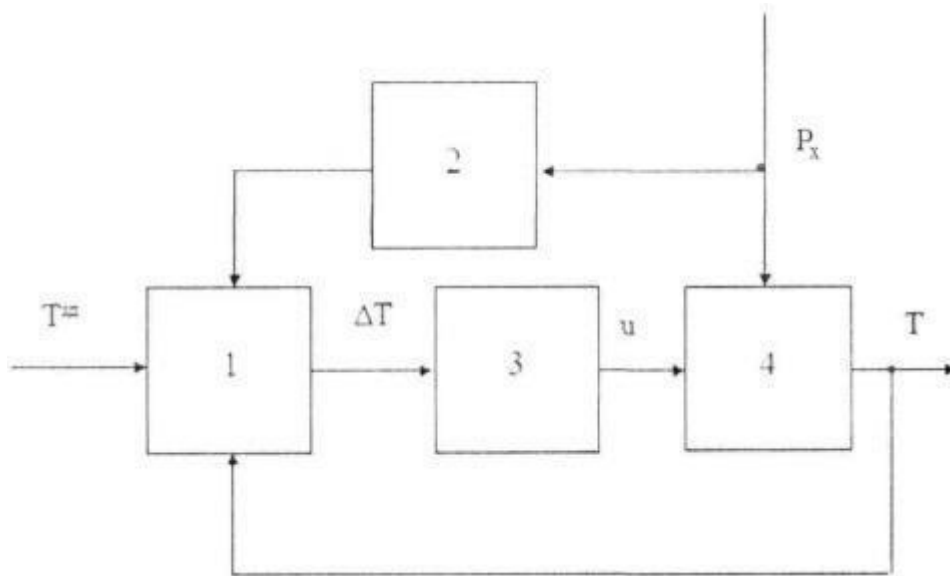
(46) Публікація відомостей **16.08.2023, Бюл.№ 33** вул. Корольова, 8, кв. 25, м. Червоноград, про  
державну Львівська обл., 80100 (UA), реєстрацію: **Воїнова Світлана Олександрівна,**

вул. Транспортна, 8, кв. 17, м. Одеса,  
65039 (UA)

**(54) СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОХОЛОДЖЕННЯМ ПРОДУКТУ В ХОЛОДИЛЬНІЙ  
КАМЕРІ**

(57) Реферат:

Спосіб автоматичного керування охолодженням продукту в холодильній камері холодильної установки, у якому виконують регулювання температури середовища в холодильній камері шляхом зміни витрат холодоагенту на вході в повітроохолоджувач холодильної установки. Додатково тиск холодоагенту на вході в повітроохолоджувач вимірюють, корегують та подають на вхід регулятора температури. Корегування здійснюють таким чином, щоб зміни тиску холодоагенту не впливали на температуру в холодильній камері.



UA 153699 U UA 153699 U

Корисна модель належить до автоматичного керування температурним режимом в холодильній камері і може бути використана в м'ясопереробній, рибній, молочній, плодоовочевій, кондитерській та багатьох інших галузях харчової промисловості, медицині, хімічній промисловості при зберіганні хімікатів, біологічних, медичних проб та в інших сферах, де використовується охолодження продукту або технологічних матеріалів.

Відомі різноманітні способи керування температурним режимом при охолодженні продукту в холодильній камері, які відрізняються технічними засобами, регульованими параметрами та способами керування.

Відомий спосіб автоматичного керування температурою в холодильній камері холодильної

- 10 установки, який містить регулювання температури повітря в камері, шляхом зміни продуктивності компресора [Патент на корисну модель UA 53005 Спосіб автоматичного керування температурою в холодильній камері холодильної установки / Левінський В.М., Васильченко М.В. МПК F25B 49/02. Заявл. 08.02.2010 № u201001273. Опубл. 27.09.2010, Бюл.

№ 18. - URL: <https://uapatents.com/3-53005-sposib-avtomatichnogo-keruvannya-temperaturoyu-v15-kholodilnijj-kameri-kholodilno-ustanovki.html>].

Недоліком даного способу є низька якість охолодження продукту в холодильній камері в результаті низької ефективності підтримання температури в камері внаслідок вузького діапазону зміни холодопродуктивності компресора.

Також відомий спосіб підтримання температури в холодильнику, який містить контроль та

- 20 регулювання температури в морозильній камері, шляхом змінення подачі холодоагенту в випарник [Патент на изобретение RU 2133930 C1 Способ поддержания температуры в холодильнике / Абрамов Н.И. и др. МПК F25B 49/02, F25D 29/00. Заявл.: 04.02.1998 № 98103135/06. Опубл.: 27.07.1999. - URL: <https://findpatent.ru/patent/213/2133930.html>].

Недоліком даного способу є низька якість охолодження продукту в холодильній камері в

25 результаті низької динамічної точності керування температурним режимом внаслідок неврахування інтенсивної шкідливої дії змін тиску в трубопроводі подачі холодоагенту в випарник.

Також відомий спосіб регулювання температури в холодильних камерах, який містить регулювання температури в камерах шляхом релейного керування компресорами [А. С. СРСР

30 568941 А1 Устройство для регулирования температуры в холодильных камерах / Гладченко В.А. и др. МПК G05D 23/20, F25B 5/00, F25D 13/04. Заявл.: 03.01.75 № 2093358/06. Опубл. 15.08.77, Бюл. № 30. URL: <https://findpatent.ru/patent/56/568941.html>].

Недоліком даного способу є низька якість охолодження продукту в холодильній камері в результаті використання релейного керування компресором, яке характеризується дискретністю 35 регулювання, шумом, "залипанням" контактів.

Також відомий спосіб керування холодильним апаратом який містить регулювання температури в холодильній камері шляхом впливу на компресор [Патент на винахід UA 76962 С2 Спосіб керування холодильним апаратом / Ялчін Г. та ін. МПК F25D 11/02, F25D 29/00. Заявл.: 04.10.2001 № 2003043239. Опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10. - URL: [https://uapatents.com/540\\_76962-sposib-keruvannya-kholodilnim-aparatom-varianti.html](https://uapatents.com/540_76962-sposib-keruvannya-kholodilnim-aparatom-varianti.html)].

Недоліком даного способу є низька якість охолодження продукту в холодильній камері в результаті низької ефективності керування через відсутність урахування тиску холодоагенту в трубопроводі, який змінюється.

Найбільш близьким аналогом до запропонованої корисної моделі є спосіб автоматичного 45 керування охолодженням продукту в холодильній камері холодної установки, який містить регулювання температури середовища в холодильній камері шляхом зміни витрат холодоагенту на вході в повітроохолоджувач холодної установки [А. С. СРСР 1739174 Холодильная камера для хранения фруктов и овощей с автоматическим регулированием температуры / Гузев О.Е. и др. МПК F25D 29/00 Заявл.: 13.04.90 № 4813888/13. Опубл. 50 07.06.92, Бюл. № 21. URL: <https://findpatent.ru/patent/173/1739174.html>].

Недоліком даного способу є низька якість охолодження продукту в холодильній камері в результаті низької динамічної точності керування температурним режимом внаслідок неврахування інтенсивної шкідливої дії тиску холодоагенту на вході в повітроохолоджувач.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення якості охолодження продукту в 55 холодильній камері шляхом підвищення динамічної точності керування температурним режимом за рахунок компенсації шкідливої дії тиску холодоагенту на вході в повітроохолоджувач.

Поставлена задача вирішується в способі автоматичного керування охолодженням продукту в холодильній камері холодної установки, який містить регулювання температури 60 середовища в холодильній камері шляхом зміни витрат холодоагенту на вході в

1

UA 153699 U

повітроохолоджувач холодної установки, згідно з корисною моделлю, додатково тиск холодоагенту на вході в повітроохолоджувач вимірюють, корегують та подають на вхід регулятора температури, причому корегування здійснюють таким чином, щоб зміни тиску холодоагенту не впливали на температуру в холодильній камері.

5 На кресленні приведено приклад реалізації запропонованого способу, який здійснюють наступним чином.

Поточне значення температури середовища в холодильній камері  $T$  надходить на перший вхід суматора 1, на другий вхід якого подають її задане значення  $T^{зд}$ . Сигнал розузгодженості

$\Delta T = T^{зд} - T$  надходить на вхід регулятора 3, в якому виробляється керуюча дія  $u$  - положення 10 вентиля подачі холодоагенту в повітроохолоджувач. Сигнал  $u$  надходить на вхід об'єкта керування 4 - холодної камери, на виході якого формується сигнал  $T$ .

Також на вхід об'єкта керування 4 діє шкідливе контрольоване збурення - тиск холодоагенту на вході в повітроохолоджувач  $P_x$ , яке вимірюють, перетворюють у коригуючий

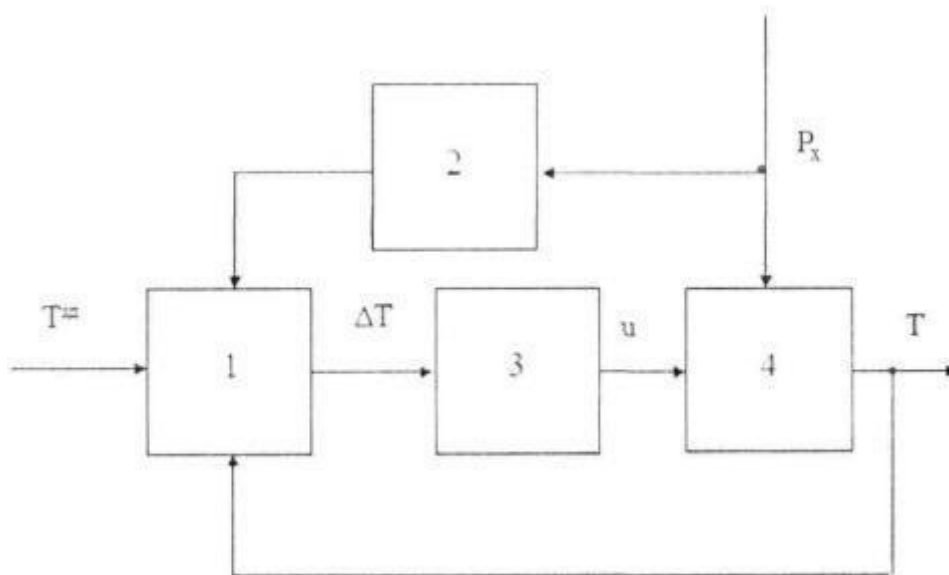
ланці 2 та подають на третій вхід суматора 1, причому перетворення здійснюють таким чином, щоб

15 температура середовища в холодильній камері не залежала від шкідливої дії тиску холодоагенту на вході в повітроохолоджувач.

#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

20 Спосіб автоматичного керування охолодженням продукту в холодильній камері холодильної установки, при якому виконують регулювання температури середовища в холодильній камері шляхом зміни витрат холодоагенту на вході в повітроохолоджувач холодильної установки, який **відрізняється** тим, що додатково тиск холодоагенту на вході в повітроохолоджувач вимірюють, корегують та подають на вхід регулятора температури, причому корегування здійснюють таким

25 чином, щоб зміни тиску холодоагенту не впливали на температуру в холодильній камері.



---

Комп'ютерна верстка О. Гергіль

---

ДО "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01601

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 ТЕПЛООВОГО НАСОСУ

Філярський В. І., Петренко Д. С., Пашков С. О., Мазур О. В.  
 ([mazur.a.v.ua@gmail.com](mailto:mazur.a.v.ua@gmail.com), [filyarsky@gmail.com](mailto:filyarsky@gmail.com), [dmytropetrenko00@gmail.com](mailto:dmytropetrenko00@gmail.com),  
[sergypashkov2001@gmail.com](mailto: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), керуваного джерела струму (0-10A, 45V max), керуваного 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.

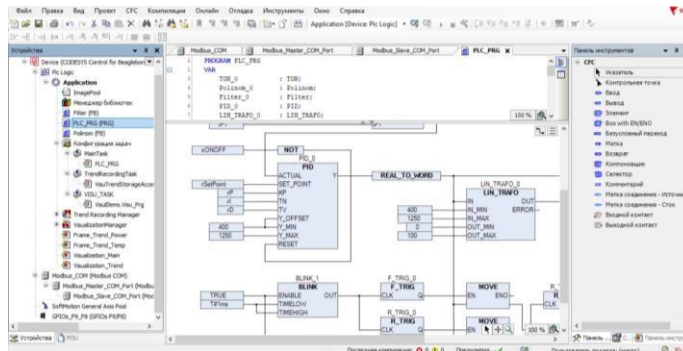


Рисунок 3 - Фрагмент програми у виконавчому середовищі CoDeSys.

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 терміналу, 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).

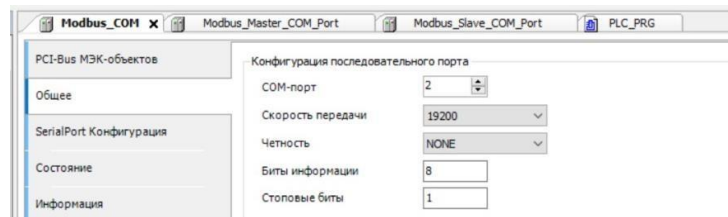


Рисунок 4 – налаштування Modbus в проекті.

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).

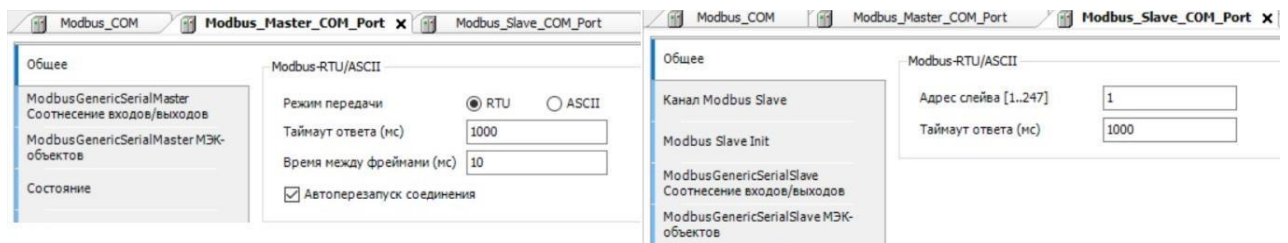


Рисунок 5 – налаштування Modbus Master та Modbus Slave у виконавчому середовищі CoDeSys.

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_UJOUT	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_IJOUT	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	Соотношение	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.USET2		W_USET[0]	%QW1	WORD		0x0000
Application.PLC_PRG.xReadUJOUT2		R_UJOUT	%IX4-0	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.UJOUT2		R_UJOUT	%IW0	ARRAY [0..0] OF WORD		Read Holding Registers
Application.PLC_PRG.UJOUT2		R_UJOUT[0]	%IW0	WORD		0x0002
Application.PLC_PRG.xWriteISET2		W_ISET	%QX4-1	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.xWriteISET2		W_ISET	%QW3	ARRAY [0..0] OF WORD		Write Single Register

Рисунок 7 – співвідношення регістрів до змінних проекту

Використовуючи органи керування DC-DC перетворювача налаштуємо 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 балансуючі резистори.

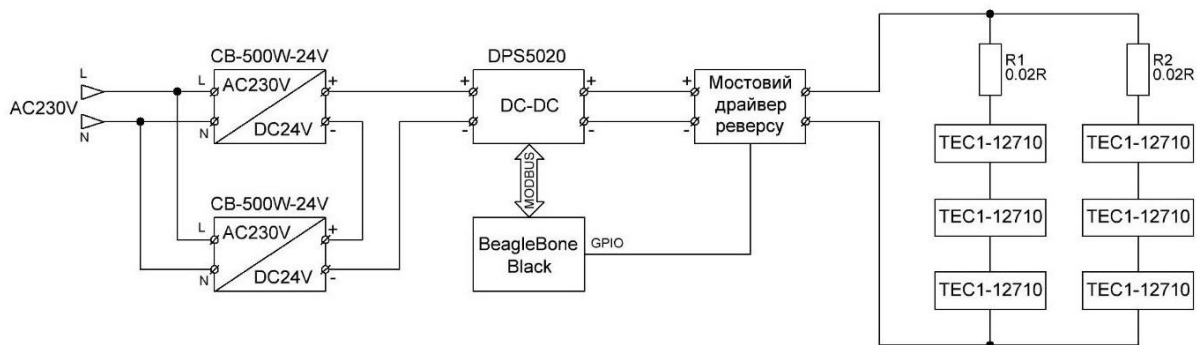


Рисунок 8 – схема електричних з'єднань.

**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](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](https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays)
- [5]. Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins (vadt.github.io) - <https://vadt.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>

*В дослідженні розглянуто методика 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 закрити 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 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).

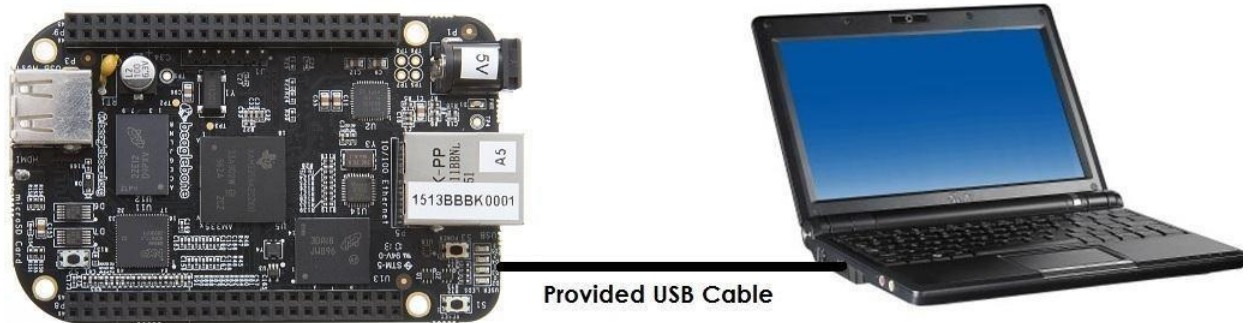


Рисунок 1 – підключення beaglebone black до ПК через USB-кабель

Тип завантажуваного образу 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 із 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.

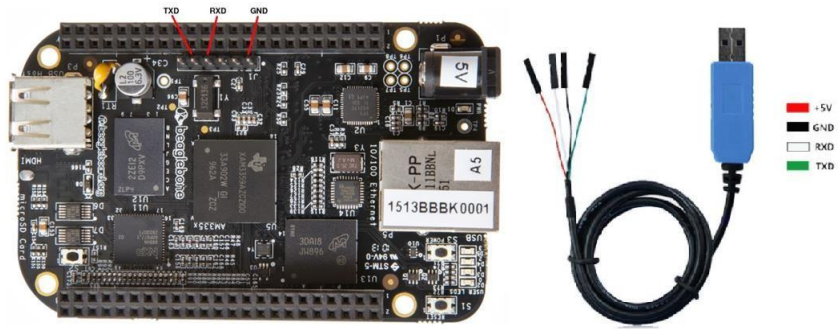


Рисунок 2 - beaglebone black зовнішній UART/USB конвертер  
 Після вдалої інсталяції ОС Linux, на beaglebone black встановлюємо виконавчу систему codesys (рис 2).

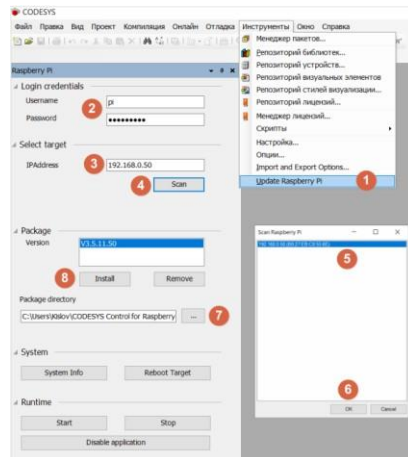


Рисунок 2 – Встановлення виконавчої системи codesys на beaglebone black  
 Особливістю beaglebone black є те, що більшість контактів GPIO плати може мати декілька призначень (рис 3), які ми конфігуруємо в залежності від поставленої задачі.

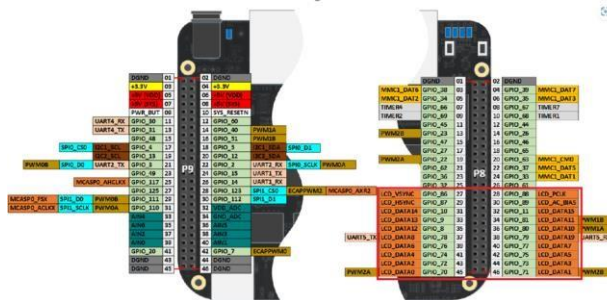


Рисунок 3 – Призначення контактів beaglebone black  
 Налаштування функцій пінів плати здійснюється шляхом редагування конфігураційних файлів beaglebone black через Putty - термінальну програму ПК(рис 5).

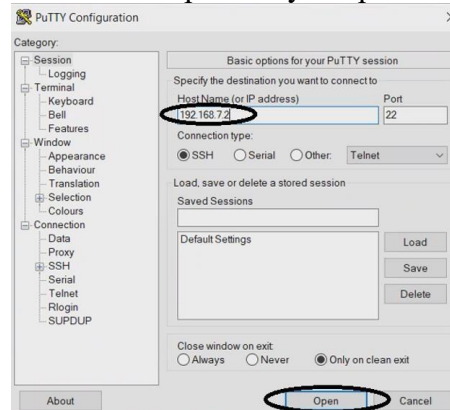


Рисунок 5 – вікно термінальної програми

```
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:tempwd]

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: tempwd). 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>

[2]. Терморегулятори BeagleBone Black, конфігурація штифтів, особливості та застосування (microcontrollerslab.com) - <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>

[4]. BeagleBone Black — BeagleBoard Documentation - <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>

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](mailto:sergypashkov2001@gmail.com),  
[filyarsky@gmail.com](mailto:filyarsky@gmail.com), [dmytropetrenko00@gmail.com](mailto: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 ІЕС 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  $T_k = 0.1c$ . 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.

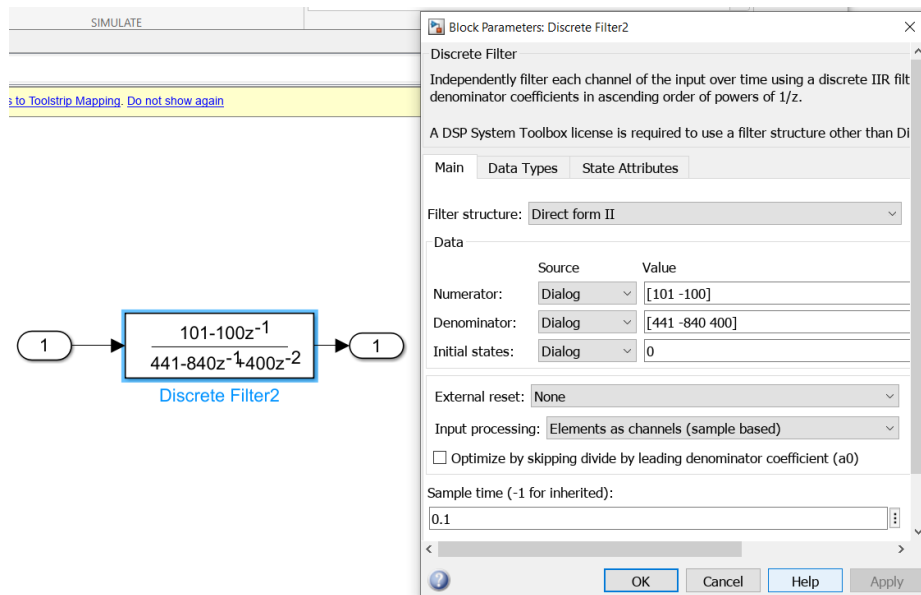


Рисунок 1 – Реалізація фільтру низьких частот у цифровій формі в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink

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.

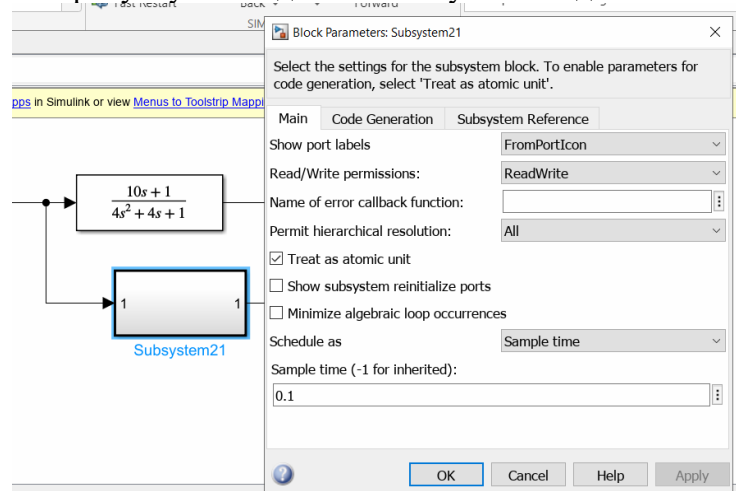


Рисунок 2 – Налаштування підсистеми алгоритму

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 фільтра 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\\_sred\\_e\\_MatlabSimulink](https://www.researchgate.net/publication/307758793_Modelno-orientirovannoe_proektirovanie_programmnogo_obespecenia_dla_vstraivaemyh_sistem_v_sred_e_MatlabSimulink).

[2]. Кодер ПЛК Simulink - MATLAB (mathworks.com)

<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>

[4]. Simulink PLC Coder(TM) Import (codesys.com) <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>