

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет

Кафедра Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА
на тему «Підвищення ефективності автоматичного керування охолодженням
гранульованих комбікормів»

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) Ільченко О.В.

(прізвище, ініціали)

_____ курсу _____ групи

Керівник к.т.н., доц. Гончаренко О.Є.

(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)

Одеса – 2023 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС
І.М. Світій

« _____ » _____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Ільченко Олександра Вікторовича

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування охолодженням гранульованих комбікормів»

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 охолодження гранульованих комбікормів і задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП охолодження гранульованих комбікормів.

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

Розділ 4. Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи.

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

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

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

7. Дата видачі завдання _____

Керівник

Гончаренко О.Є.

Завдання прийняв до виконання

Ільченко О.В.

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 Ільченко О.В. Керівник роботи Гончаренко О.Є.

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 Ільченко О.В.

ПІБ

Підпис

АНОТАЦІЯ

Ільченко О.В. «Підвищення ефективності автоматичного керування охолодженням гранульованих комбікормів».

Кваліфікаційна робота магістра. – Одеса: ОНТУ 2023. – 131с.
Бібліогр.: 21_. Іл.: 104_. Табл. 9_.

Основною метою роботи є підвищення ефективності процесу охолодження гранульованих комбікормів за рахунок вдосконалення існуючих алгоритмів автоматичного керування технологічним процесом. Удосконалення алгоритмів керування проводилося шляхом підвищення динамічної точності алгоритмів регулювання. В якості базового було використано пропорційно-інтегрально-диференціальний алгоритм регулювання. В даній роботі розроблена САР різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища з упереджувачем Сміта та інваріантністю до змін температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки.. Надалі підвищення ефективності САР проводилося шляхом дослідження доцільності використання нечіткого алгоритму регулювання. Надалі розроблену систему керування було реалізовано у цифровому вигляді.

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

Ключові слова: охолодження гранульованих комбікормів, САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання, САР інваріантністю відносно контрольованих збурень.

ЗМІСТ

	стор.
Перелік умовних позначень, символів і одиниць.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1 Технологічний процес охолодження гранульованих комбікормів і задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.....	13
1.1 Короткий опис технологічного процесу охолодження гранульованих комбікормів і основного обладнання.....	13
1.2 Аналіз впливу режимів ведення ТП і роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів і наслідків їх порушення	16
1.3 Аналіз існуючих САК технологічного процесу охолодження гранульованих комбікормів	19
1.4 Комплекс математичних моделей ТП охолодження гранульованих комбікормів як об'єкту регулювання, їх реалізація в формі імітаційних моделей і результати тестування моделей.....	20
1.5 Типові структури і алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, результати їх параметричної оптимізації і перевірка на робастність (грубість).....	27
1.6 Недоліки відомих САК ТП охолодження гранульованих комбікормів, обґрунтування напрямків удосконалення САК як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу	42
1.7 Висновки за розділом.....	42
Розділ 2 Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП охолодження гранульованих комбікормів	43
2.1 Специфічні особливості ОР і обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення їх динамічної точності	43
2.2 Доопрацювання математичної моделі ОР для розв'язання задачі додаткового застосування в САР принципу інваріантної до контрольованих збурень	43
2.3 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.....	45
2.4 Оптимальний параметричний синтез САР базової структури та аналіз результатів синтезу	49
2.5 Оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності та аналіз результатів синтезу	55
2.6 Висновки за розділом.....	58
Розділ 3 Вдосконалення алгоритмів, які реалізують функції регулювання САК технологічного процесу охолодження гранульованих комбікормів, на основі застосування логічного регулятора та штучних нейронних мереж	59
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління побудованих на базі апарата нечіткої логіки та штучної нейронної мережі для розглянутого об'єкта керування	59

	стор.
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB/Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійними статичними характеристиками	60
3.3 Синтез САР з нелінійною моделлю ОК і традиційним ПД-регулятором ...	06
3.4 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нечіткого регулятора.....	70
3.5 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нейронного регулятора.....	71
3.6 Аналіз результатів функціонування САУ з традиційним регулятором, з регулятором побудованим на базі апарату нечіткої логіки і з нейронним регулятором.....	98
3.7 Висновки за розділом.....	100
Розділ 4 Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи	102
4.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом охолодження гранульованих комбікормів і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок	102
4.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів управління	113
4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	126
4.4 Висновки за розділом.....	127
Висновки.....	128
Список використаної літератури.....	130

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

АК - алгоритм керування;

ВМ - виконавчий механізм;

ОК - об'єкт керування;

ОР - об'єкт регулювання;

ПЗО - пристрій зв'язку з об'єктом;

РО - регулюючий орган;

САК - система автоматичного керування;

САР – система автоматичного регулювання;

СКЗ - спрощений коригуючий зв'язок;

ТП - технологічний процес.

ВСТУП

Актуальність теми. Технологічний процес охолодження гранульованих комбікормів є одним з ключових процесів виробництва гранульованих комбікормів. Підвищення ефективності саме цього процесу здатне дати суттєвий економічний ефект. Тому саме процес охолодження гранульованих комбікормів було обрано в якості об'єкту для модернізації системи керування. Провівши аналіз господарської діяльності підприємства і ходу технологічного процесу, можна зробити висновок, що саме на цій ділянці технологічної схеми, можна істотно змінити техніко-економічні показники виробництва в цілому, такі як зменшення втрат від браку готової продукції.

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

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

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

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу охолодження гранульованих комбікормів шляхом побудови вискоєфективної системи автоматичного керування.

Для досягнення цього необхідно вирішити наступні завдання:

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

Об'єкт дослідження – керований технологічний процес охолодження гранульованих комбікормів.

Предмет дослідження – системи автоматичного управління технологічним процесом охолодження гранульованих комбікормів, включаючи моделі процесу об'єкта управління.

Методи дослідження:

- методи активного та пасивного експерименту;
- метод типової статистичної ідентифікації та інженерні методики ідентифікації моделей ОК;

- метод оптимального параметричного синтезу;
- метод компенсації запізнення в контурі регулювання з використанням упереджувача Смітта;
- метод системного аналізу систем автоматичного керування;
- метод імітаційного моделювання;
- планування та проведення натурних експериментів, обробки їх результатів та ідентифікації моделей ОУ.
- теорії автоматичного управління та її підрозділів – статистичної теорії автоматичних систем, теорії систем із запізненням, теорії систем гарантуючого управління, теорії цифрових систем управління.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше обґрунтовано:

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

вперше розроблено:

- імітаційна ММ процесу охолодження гранульованих комбікормів, що адекватно описує динаміку каналів регулювання, яка дозволяє при розробці САУ охолодження гранульованих комбікормів проводити комп'ютерні експерименти з налагодження та параметричної оптимізації алгоритмів управління та порівняльного аналізу її варіантів;
- спеціальні САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання систем автоматичного регулювання технологічних параметрів охолодження гранульованих комбікормів, що дозволяють підвищити швидкодію при регулюванні розрідження в топці котла, підвищити точність управління;
- розробка алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК, на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж;

—отримав подальший розвиток алгоритм регулювання охолодження гранульованих комбікормів в напрямку підвищення динамічної точності управління, який дозволяє забезпечити стійке ведення процесу охолодження гранульованих комбікормів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

— підвищенні продуктивності та енергетичної ефективності процесів охолодження гранульованих комбікормів, підвищенні та стабілізації якості гранульованих комбікормів, гарантованому запобіганні аварійним ситуаціям, пов'язаним з порушенням обмежень на регламентовані змінні;

— можливості застосування розроблених підходів до створення САУ, включаючи їх функціональний склад, структури та алгоритми підсистем, для підвищення енергетичної ефективності;

— застосування розробленої імітаційної моделі для подальшого вдосконалення САУ охолодження гранульованих комбікормів, а також технології та досвіду розробки цієї моделі для створення моделей котлів інших типів.

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

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

Публікації. Підготовлено комплект документів для подачі патенту на корисну модель на тему «Спосіб автоматичного керування охолодженням гранульованих комбікормів».

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

РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ОХОЛОДЖЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ КОМБІКОРМІВ І ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Короткий опис технологічного процесу охолодження гранульованих комбікормів і основного обладнання

Технологічний процес охолодження гранульованих комбікормів є одним з ключових процесів виробництва гранульованих комбікормів. Тому саме цей процес було обрано в якості об'єкту для модернізації системи автоматизації.

Технологічна схема процесу охолодження гранульованих комбікормів зображена на рис. 1.1.

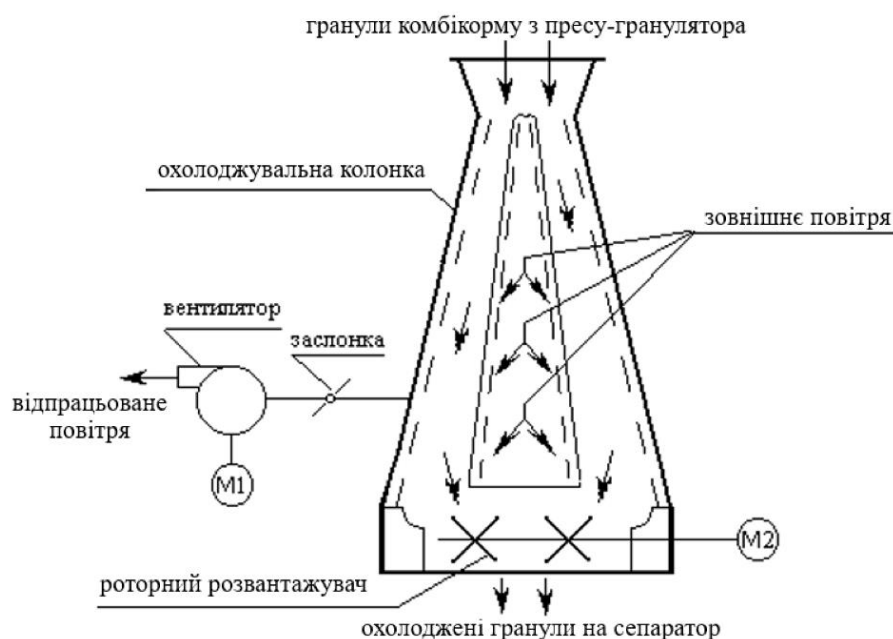


Рис. 1.1 – Технологічна схема процесу охолодження гранульованих комбікормів

Гранульований комбікорм з температурою близько 80...100 °С надходить із преса-гранулятора в охолоджувальну колонку. У колонці гранули охолоджуються до температури, що перевищує навколишню на 10 °С, потоком повітря, що засмоктується вентилятором. Продуктивність вентилятора

змінюють заслінкою, а охолоджувальної колонки – швидкістю обертання роторів розвантажувача. Процес охолодження йде найбільше ефективно при максимальному заповненні колонки гранулами.

Охолоджувальна колона Counterflow cooler призначений для охолодження гранульованого корму, деревини пелет, гранул соломи, гранул лушпиння соняшнику, гранул курячого посліду, торфу, біомаси, макухи і тд.

Охолоджувальна колона зображена на рис. 1.2.



Рис. 1.2 – Охолоджувальна колона

Охолоджувач гранул складаються з шахти охолодження з шлюзовим затвором вгорі, столу просіву, вентилятора. Автоматичні охолоджувачі мають планковий механізм вивантаження просушених гранул на просів по датчиках рівня. У блоці охолодження, окрім основної функції, відбувається очищення відпрацьованого повітря від пилу. Охолоджувачі гранул використовуються в лініях гранулювання комбікорму, висівок, макухи, шроту, вітамінного борошна, і інших продуктів.

Охолоджені гранули поступають на стіл розсівання, яке представляє похиле вібросито. Незгранульоровані частки обсіпаються вниз і віддаляються на повторну грануляцію. Очищені гранули вирушають на конвеєр для фасовки. Відпрацьоване повітря виводиться з колони через циклон-осаджувач, який під'єднується до шахти. У циклоні залишається увесь пил і волога, які виділилися в повітря з гранул.

Охолодження гранул відбувається наступним чином.

1. Продукт поступає до верхньої частини охолоджувальної колони по стрічково-скребковому конвеєру або по норії і висипається в приймальну частину. Ці види транспортерів дбайливо доставляють гранулят до охолоджувальної колони без механічної дії на них. Потік проходить через шлюзовий затвор всередину камери і там обпадає на дно.

2. Вентилятор безперервно подає потік повітря, яке проходить крізь усю масу гранул, як через фільтр, і виводиться з камери через циклон- осаджувач.

3. Гранули остигають до температури довкілля і втрачають декілька відсотків вологи. Вони твердіють і стають стійкими до механічних ушкоджень.

4. Коли температура понижена, і колона заповнена до певної межі, оператор або автоматичний датчик ініціює розвантаження і відкриває шиберную заслінку.

5. Незгранульоровані частинки віддають назад на повторне гранулювання.

Технічні характеристики охолоджувальної колони Counterflow cooler:

- продуктивність 3т/год;
- потужність електродвигунів – 2,2 кВт;
- час охолодження на порцію – від 15 до 20 хв.;
- розмір гранул – від 2 до 40мм.

Метою технологічного процесу охолодження гранульованих комбікормів є отримання гранульованого комбікорму із заданими показниками якості. І, звичайно, даний технологічний процес доцільно

реалізовувати в тому випадку, якщо в результаті його проведення підприємство отримує певний економічний прибуток. А для цього необхідно, щоб виконувалися деякі умови. Для процесу охолодження гранульованих комбікормів вони наступні:

- кількість охолоджених гранул комбікорму, вироблена за 1 годину, не повинна бути меншою, ніж 3000 кг;
- питомі, тобто на одиницю продукції, витрати енергії на процес не повинні перевищувати нормативних значень;
- режими роботи технологічного обладнання не повинні виходити за гранично-припустимі;
- шкідливий вплив технологічного процесу на людину й природу не повинне перевищувати нормативних значень.

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

Оснoву нормативів ведення технологічного процесу становлять три основних регламенти: технологічний, експлуатаційний, техніко-економічний і екологічний.

Технологічний регламент – визначає умови, при яких у результаті процесу охолодження гранульованих комбікормів отримують комбікорм із заданими властивостями. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналів технологічних параметрів. Для нашого процесу таких, як $\Delta\theta$ – різниця між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища °C.

Експлуатаційний регламент – визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від експлуатаційних параметрів даного

технологічного об'єкту. Для даного технологічного процесу експлуатаційний регламент відсутній.

Техніко-економічний і екологічний регламент – визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір номінальних або гранично-припустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів. Для процесу охолодження гранульованих комбікормів

до цієї групи параметрів відносять, $T_{гро}$ – температура гранул комбікорму на виході з колони охолодження, $F_{гро}$ – витрата гранул комбікорму на виході з колони охолодження, $T_{во}$ – температура навколишнього повітря на виході з колони охолодження, $F_{во}$ – витрата відпрацьованого повітря на виході з колони охолодження.

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

Допуски на відхилення поточних значень регламентованих параметрів діляться на тривалі та короткочасні. Припустимі відхилення визначають зону незначних відхилень, середнє значення параметру якої можна вважати близьким до нормативного, тому ці відхилення не ліквідують. Короткочасні припустимі відхилення параметрів перевищують зону незначних відхилень і призводять до зниження ефективності процесу, тому вони припустимі тільки протягом обмеженого часу, що задається й входить у регламент. Вихід параметрів за зону короткочасно припустимих відхилень свідчить про відхилення технологічного процесу або експлуатації обладнання, що можуть

призвести до аварії. Для аналізу нормативів ведення процесу охолодження гранульованих комбікормів складемо таблицю регламентів (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

№	Найменування параметрів	Позначення	Одиниця вимірювання	Ном. значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
					Тривалі ($t \rightarrow \infty$)	Короткочасні ($0 < t < \infty$)	
					Велич.	Велич.	t, сек
1	Різниця між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища	$\Delta\theta$	$^{\circ}\text{C}$	10	$\pm 0,5$	± 1	240 с

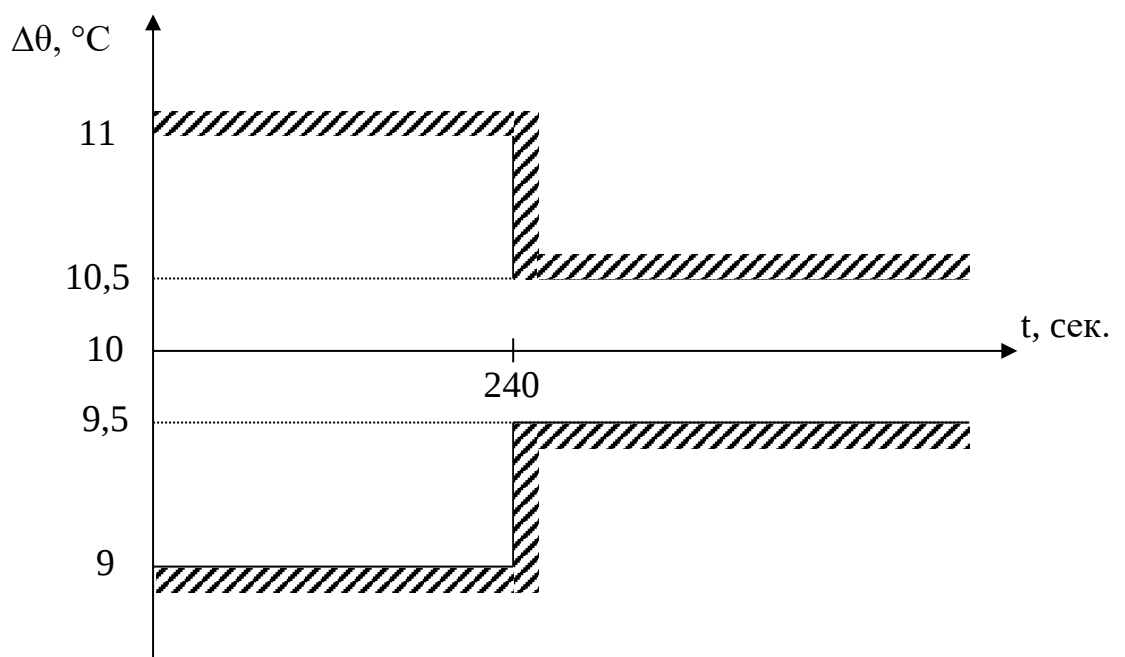


Рис. 1.3 – Регламентна зона для різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища

Внаслідок порушень технологічного регламенту підтримки різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної

колонки та температурою навколишнього середовища виникає високий відсоток браку через недоохолодження комбікорму.

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

Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. Для даного процесу до них відносять $T_{гр}$ (температура гранул комбікорму на вході в колону охолодження), $F_{гр}$ (витрата гранул комбікорму на вході в колону охолодження).

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного обладнання зовні та витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів відносять $T_{нв}$ (температура навколишнього повітря на вході в колону охолодження), $F_{нв}$ (витрата навколишнього повітря на вході в колону охолодження).

Механічні параметри технологічного обладнання характеризують стан його робочих органів. До них віднесемо, U_1 (положення регулюючого органу зміни частоти електроприводу вентилятору) і b_1 (наліт у охолоджувальній колоні).

1.3 Аналіз існуючих САК технологічного процесу охолодження гранульованих комбікормів

Після гранулювання комбікорм охолоджується в охолоджувальній колонці до температури, що на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ перевищує температуру навколишнього середовища, та просіюється. Дрібна фракція (прохід через сито) повертається на повторне гранулювання, що призводить до додаткових витрат електроенергії.

На підприємстві реалізована САР з різницею температури та рівня гранул в охолоджувальній колонці найпростішої структури, що використовує

регулятор P25 та K15. Ці системи забезпечують низьку динамічну та статичну точність. В умовах координатних збурень вони не дозволяють підтримувати параметри в границях регламенту. Це призводить до збільшення браку і дрібної фракції яка повторно повертається на гранулювання, що додатково збільшує витрати електроенергії.

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

1.4 Комплекс математичних моделей ТП охолодження гранульованих комбікормів як об'єкту регулювання, їх реалізація в формі імітаційних моделей і результати тестування моделей

Для процесу охолодження гранульованих комбікормів в якості регульованих координат доцільно обрати різницю між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджу-вальної колонки та температурою навколишнього середовища $\Delta\theta$. Всі інші вхідні дії, крім управляючої дії і контрольованого збурення, віднесемо до неконтрольованих збурень f_1 . Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до управляючих дій.

Структурна схема ОК (рис. 1.4) є останнім етапом формалізації представлення ТА як ОК. Вона є найбільш загальною (концептуальною) моделлю ТА як ОК. Внутрішня частина структури ОК указує на те, що канали перетворення змінних мають певну самостійність по відношенню до його зовнішньої структури.

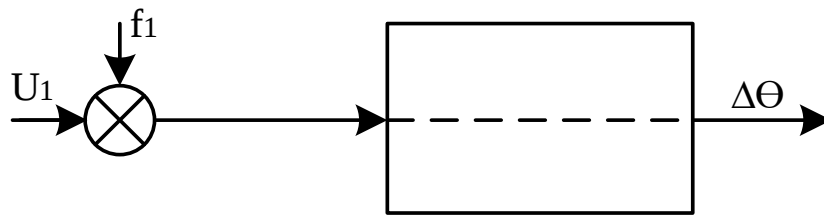


Рис. 1.4 – Координатна схема ОК

$\Delta\theta$ – різниця між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджу-вальної колонки та температурою навколишнього середовища, °C;

$U1$ – положення регулюючого органу зміни частоти електроприводу вентилятору, %;

f_1 – неконтрольоване збурення.

Проведемо ідентифікацію моделей каналів перетворення об'єкта регулювання. Виходячи з фізичної суті ТП, апріорним шляхом, попередньо оцінимо властивості каналів, моделі яких в подальшому ми будемо ідентифікувати. У нашому випадку ми маємо справу з каналами керування ($U1 - \Delta\theta$). Цей канал має статичні властивості. Збільшення керуючої дії призводить до зменшення регульованих координат.

Сплануємо активний експеримент для отримання експериментальних даних, за якими будемо проводити ідентифікацію математичної моделі.

План активного експерименту:

1) за допомогою зміни керуючої дії ($U1$) слід домогтися таких значень керованих змінних ($\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$) які перебували б в околиці їх номінальних значень (тобто де припустима лінеаризація властивостей каналів) Дані значення керованих змінних відповідають керуючим діям, рівним 50% х.р.о;

2) дочекатися закінчення перехідних процесів в каналах і настання встановленого режиму, при якому для каналів зі статичними властивостями вихідні змінні перестануть змінюватися;

3) змінимо вхідну змінну ступінчастим чином до 60%, при цьому зазначивши момент початку її зміни ;

4) реєструємо зміни всіх вихідних змінних до настання нового сталого режиму.

Результати активного експерименту наведені на рис. 1.5.

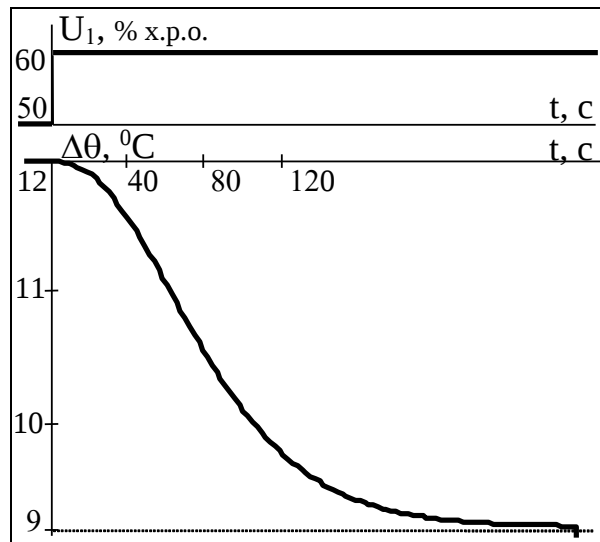


Рис. 1.5 – Результати активного експерименту

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

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

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

Канал «U1 – ΔΘ »:

Визначаємо коефіцієнт передачі:

$$K_0 = \frac{\Delta\theta}{\Delta U} = \frac{9-12}{60-50} = -0,3 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{ x. p. o.}$$

Модель 1-го порядку:

За графіком знаходимо час досягнення вихідною змінною значень

$$\Delta\theta_{0,7} = 11,15^{\circ}\text{C} \text{ і } \Delta\theta_{0,33} = 12,25^{\circ}\text{C}$$

Знаходимо

$$t_{0,33} = 60 \text{ с}; t_{0,7} = 107 \text{ (с)}$$

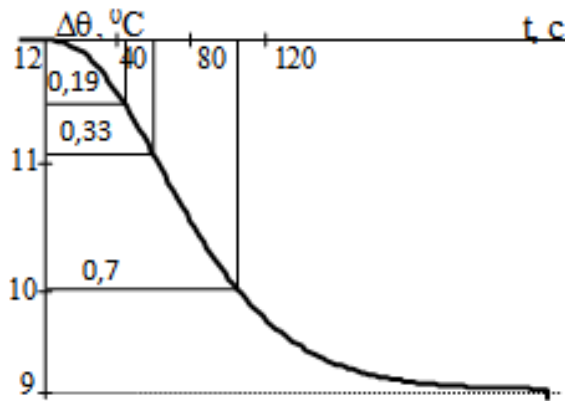


Рис. 1.6 – Параметрична ідентифікація моделі каналу «U1–Δθ»

Знаходимо значення параметрів моделі каналу:

$$\tau = (3 \cdot 60 - 107) / 2 = 38 \text{ с};$$

$$T = (107 - 38) / 1,2 = 57,5 \text{ с.}$$

Тоді

$$W(p) = \frac{-0,3 \cdot e^{-38p}}{57,5p+1}$$

Модель 2-го порядку:

За графіком знаходимо час досягнення вихідною змінною значення

$$\theta_{\text{ШП } 0,19} = 11,5^{\circ}\text{C}: t_{0,19} = 45 \text{ с}$$

Знаходимо значення параметрів моделі каналу:

$$\tau = (3 \cdot 45 - 107) / 2 = 14 \text{ с}$$

$$T = (107 - 14) / 2,4 = 38,8 \text{ с}$$

$$W(p) = \frac{-0,3 \cdot e^{-14p}}{(38,8p+1)^2}$$

Наступним етапом роботи є отримання моделі статички для побудови моделі динаміки в абсолютних величинах.

Для отримання моделей статички у нашому випадку будемо використовувати активний експеримент.

Суть планування експерименту полягає у виборі діапазонів зміни факторів, кроку збільшення факторів, послідовності їх зміни та числа повторів цих змін.

А. Діапазони зміни факторів в експерименті фактично визначає діапазон, де отримана модель може коректно використовуватися. Тому вони повинні відповідати реальним діапазонам зміни змінними, обумовлених факторами.

Б. Крок факторів повинен бути такими, щоб при перекритті необхідного діапазону їх зміни кількість дослідів не була б занадто великою або малою – найчастіше рекомендується 3...6 дослідів.

В. Кількість повторів (для компенсації випадкової складової) визначається інтенсивністю випадкових складових у вхідних і вихідних змінних ОК, кількістю факторів (цілеспрямовано змінюваних вхідних змінних) витратами часу та інших обставин. Кількість повторів приймається рівною 3...5. У деяких випадках повторів можна не робити взагалі.

Г. Послідовність зміни факторів особливо при їх великій кількості доцільно вибрати такою, щоб рандомизувати експеримент, тобто додати випадкові властивості ходу експерименту. Це можна зробити за рахунок запланованої заздалегідь випадкової зміни послідовності зміни факторів і, можливо, величин їх збільшень. Така організація експерименту дозволить “не пропустити” особливостей властивостей об'єкту, що при однакових з'єднаннях факторів при повторах можуть не виявитися. У найпростіших випадках можна використовувати і регулярні плани.

Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК зведені в таблицю 1.2 і на рис. 1.7.

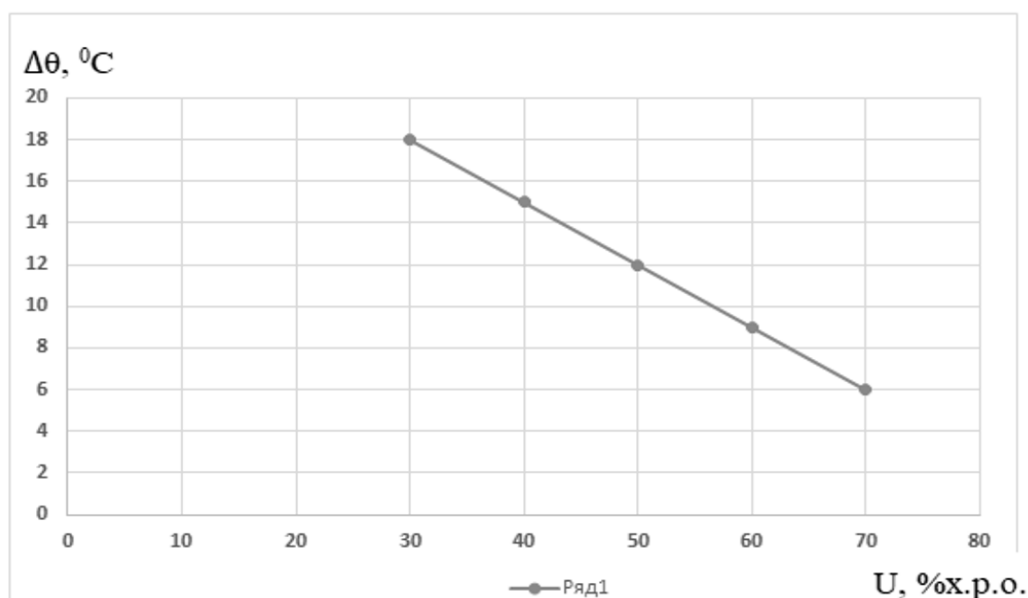


Рис. 1.7 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК

Таблиця 1.2 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК

№ експерименту	U1, %x.p.o.	Δθ, °C
1	30	18
2	40	15
3	50	12
4	60	9
5	70	6

Структурна ідентифікація моделей статички зводиться до вибору виду рівняння регресії $y = \Phi(\vec{x})$. Структурна ідентифікація є вихідним пунктом загального завдання ідентифікації моделей статички. Але, як показує практика, вибрати вид моделі відразу, як правило, не вдається. Причому недоліки вибраної моделі стають очевидними тільки після етапу її параметричної ідентифікації. Усунення недоліків моделі вимагає повернення до процедури структурної ідентифікації. Таких поверів може бути кілька, тобто процедура ідентифікації носить ітераційний характер.

Для проведення параметричної ідентифікації моделі статичної ОК доцільно використовувати метод найменших квадратів. Суть методу полягає в пошуку такого вектора параметрів $\vec{a}^*$ вибраної моделі, що забезпечував би мінімальну суму квадратів розходження між значеннями вихідної змінної об'єкта y , отриманих у результаті експерименту y_i , $i = \overline{1, n}$ при значеннях вхідних змінних $\vec{x}_i$, і вихідної змінної моделі об'єкта y_m , обчисленої при тих же значеннях $\vec{x}$, тобто

$$\vec{a}^* = \arg \min_{\vec{a}} \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2$$

Для досліджуваного ОК, як видно з рис. 2.4, статична характеристика може бути описана лінійною залежністю виду :

$$\Delta\theta = a_1 \cdot U_1 + a_0$$

Параметр a_1 був нами визначен в процесі ідентифікації вище. При цьому $a_1 = -0,3 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{х.р.о.}$

Параметр a_0 можна визначити з залежності:

$$a_0 = \Delta\theta - a_1 \cdot U_1 = 10 - (-0,3) \cdot 50 = 10 + 15 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перевіримо правильність розрахунків:

$$\Delta\theta = a_1 \cdot U_1 + a_0 = (-0,3) \cdot 50 + 25 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отже, статична характеристика досліджуваного ОК буде описана залежністю:

$$\Delta\theta = -0,3 \cdot U_1 + 25.$$

Для реалізації повної моделі ОК сумістимо моделі динаміки і статичної каналів ОК. Схема моделювання в середовищі Матлаб, що відображає повну модель ОК, наведена на рис. 1.8, а результати моделювання – на рис. 1.9.

Як видно з результатів моделювання, модель ОК досить точно відображає експериментальні дані. Це означає, що отримана модель ОК є адекватною .

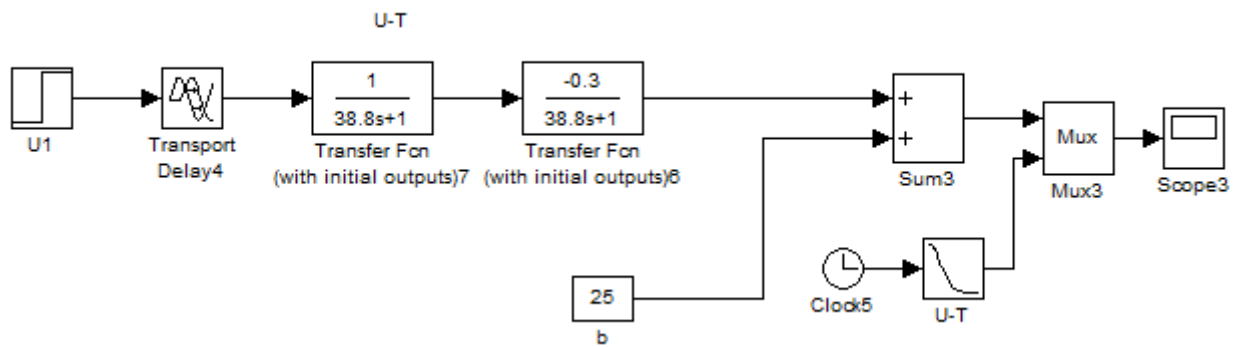


Рис. 1.8 – Схема моделювання повної моделі ОК

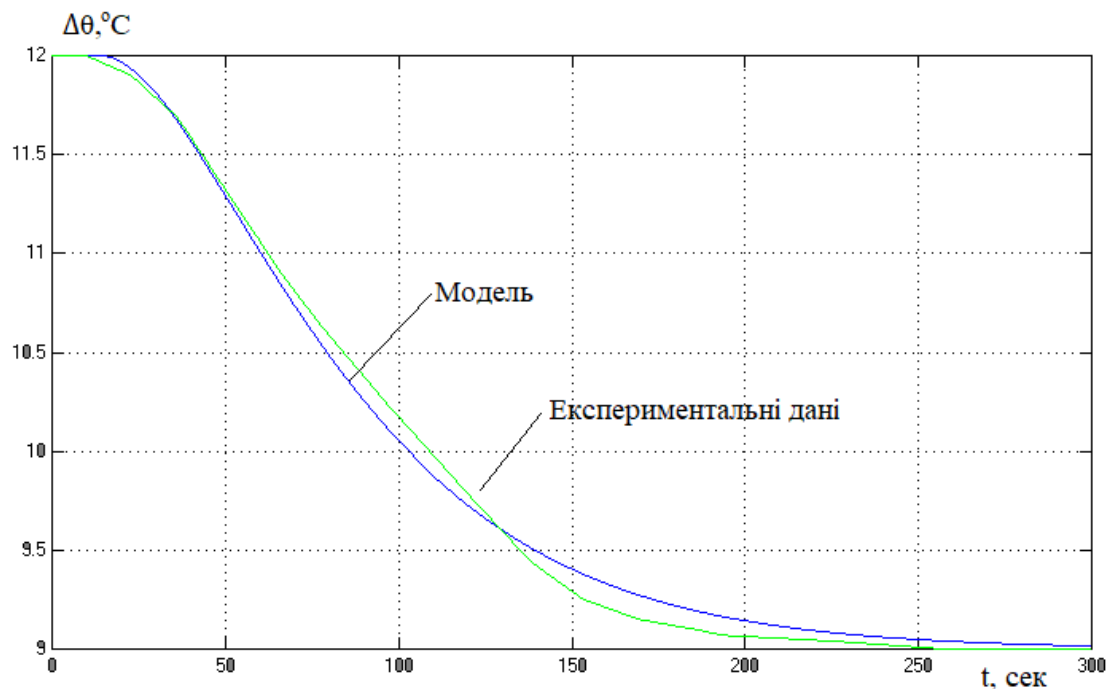


Рис. 1.9 – Результати реалізації повної моделі ОК в середовищі Матлаб

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

Координатна схема процесу охолодження гранульованих комбікормів наведена на рис. 1.4. У відповідності до замкненого принципу керування представимо схему САР базової (найпростішої) структури. Структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 1.10.

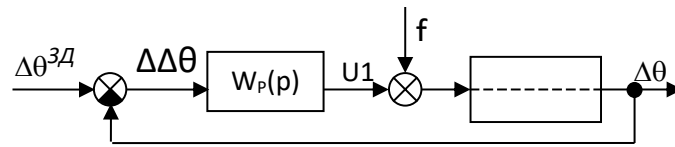


Рис. 1.10 – Структурна схема САР базової структури

Позначення на схемі:

$U1$ – положення регулюючого органу зміни частоти електроприводу вентилятору;

$\Delta\theta$ – різниця між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища;

f – вектор неконтрольованих збурень;

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

$\Delta\theta^{3Д}$ – задане значення регульованої координати;

$\Delta\Delta\theta$ – помилка регулювання.

Процес охолодження гранульованих комбікормів як ОК має статичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритми регулювання.

Передаточна функція ПІ-регулятора

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

Передаточна функція ПІД-регулятора

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

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

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК:

$$W(p) = \frac{-0,3 \cdot e^{-38p}}{57,5p + 1}$$

За методикою Копеловича розрахуємо початкові наближення параметрів ПІ- та ПІД-регулятора:

ПІ-регулятор:

$$k_p = 1,1 \cdot T_0 / (k_0 \cdot \tau_0) = (1,1 \cdot 57,5) / ((-0,3) \cdot 38) = -5,5 \% \text{х.р.о.} / ^\circ\text{C}$$

$$T_{из} = 2 \cdot 38 = 76 \text{ с}$$

ПІД-регулятор:

$$k_p = 1,2 \cdot T_0 / (k_0 \cdot \tau_0) = (1,2 \cdot 57,5) / ((-0,3) \cdot 38) = -6 \% \text{х.р.о.} / ^\circ\text{C}$$

$$T_{из} = 1,4 \cdot \tau_0 = 1,4 \cdot 38 = 53,2 \text{ с}$$

$$T_{пр} = 0,5 \cdot \tau_0 = 0,5 \cdot 38 = 19 \text{ с}$$

Для оптимального параметричного синтезу САР охолодження гранульованих комбікормів з ПІ-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 1.11. Результати оптимізації налаштувань ПІ-регулятора наведені на рис. 1.12.

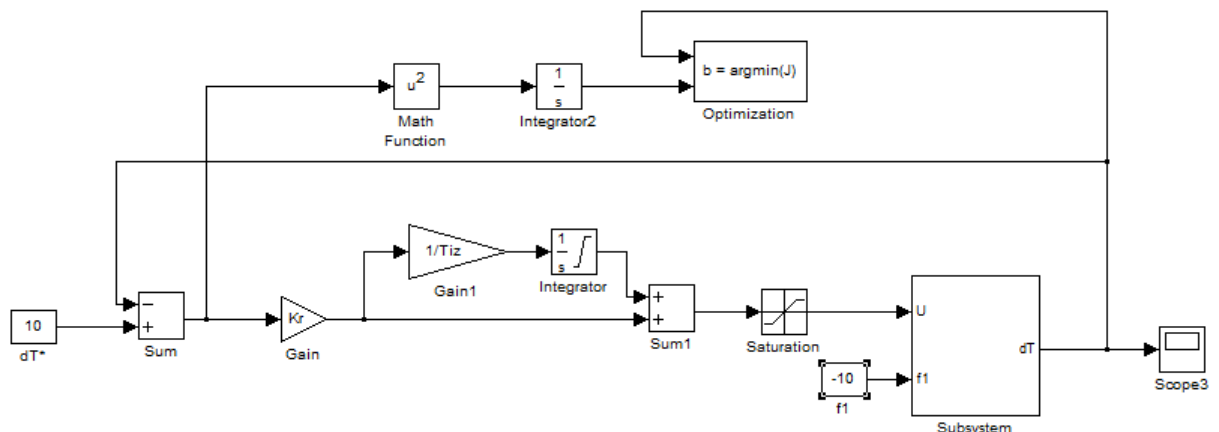
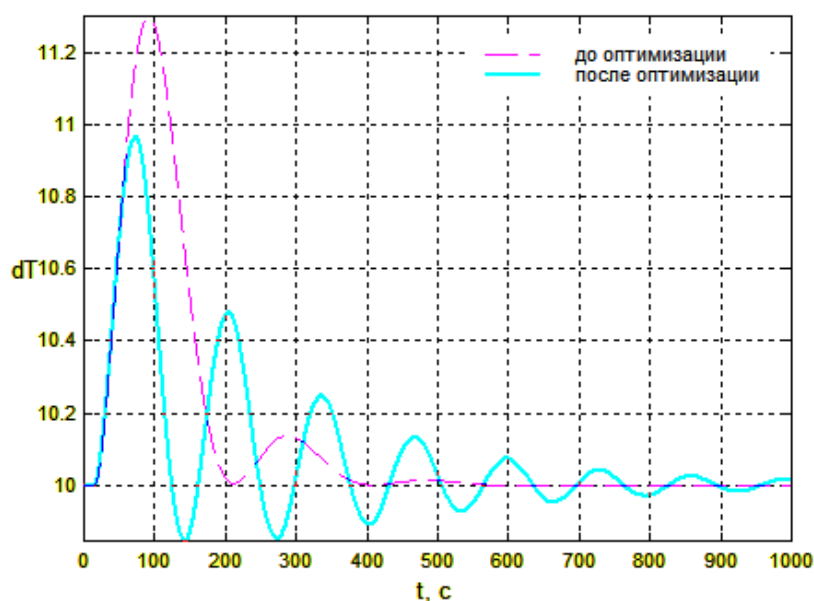


Рис. 1.11 – Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІ-регулятора



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr	-13.1992	-50	-5.5	0	до - 120.6856
Tiz	119.3861	0	76	300	после - 57.3766
					оптимизации.
					Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 86

Рис. 1.12 – Результати оптимізації налаштувань ПІ-регулятора

Для оптимального параметричного синтезу САР охолодження гранульованих комбікормів з ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 1.13. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рисунку 1.14.

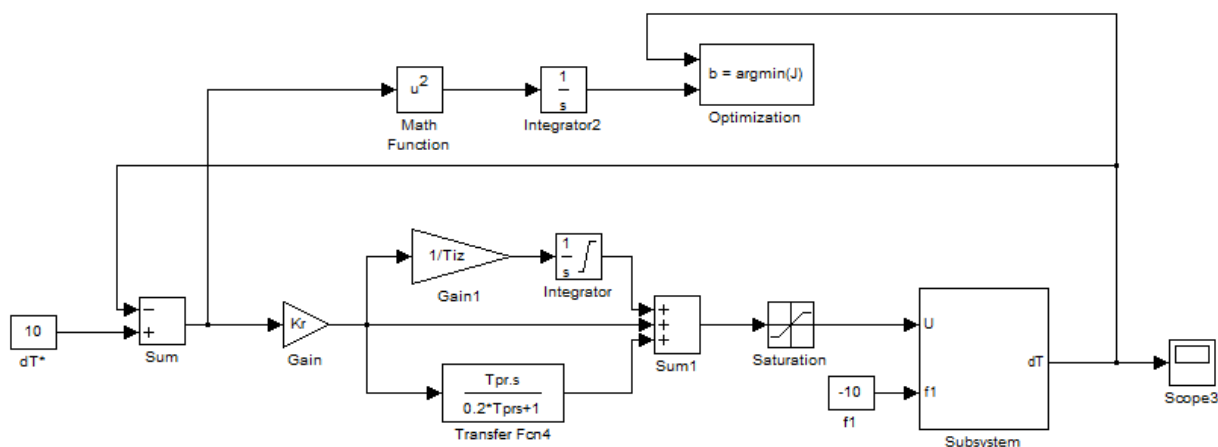
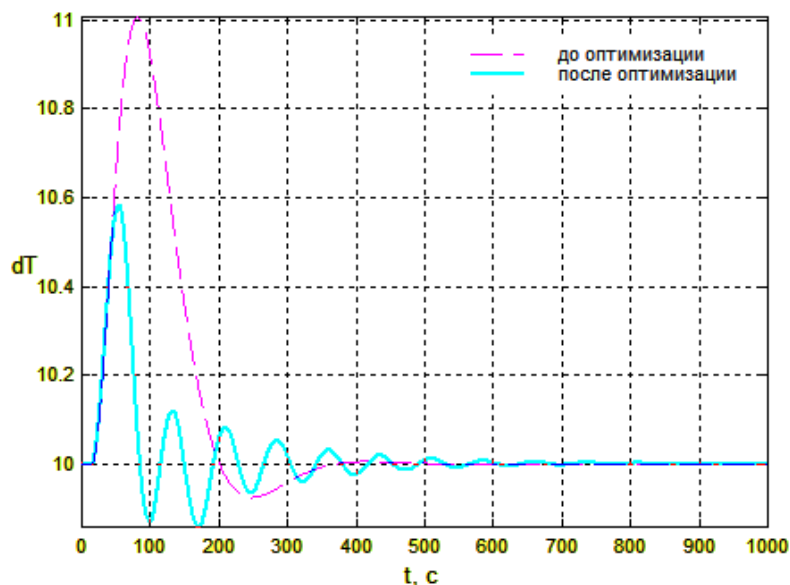


Рис. 1.13 – Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr	-18.9628	-50	-6	0	до - 71.1275
Tiz	37.6426	0	53.2	300	после - 11.1154
Tpr	18.5712	1	19	100	оптимизации.
					Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 122

Рис. 1.14 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

Порівняльний аналіз перехідних процесів у параметрично оптимальних системах за значенням критерію оптимальності і показникам, для яких встановлені гранично-припустимі значення. Результати порівняння варіантів САР наведені на рис. 1.15 і в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати порівняння варіантів САР

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\theta^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}}, \text{c}$	
ПІ	0,97	100	ПІ
ПІД	0,59	65	ПІД

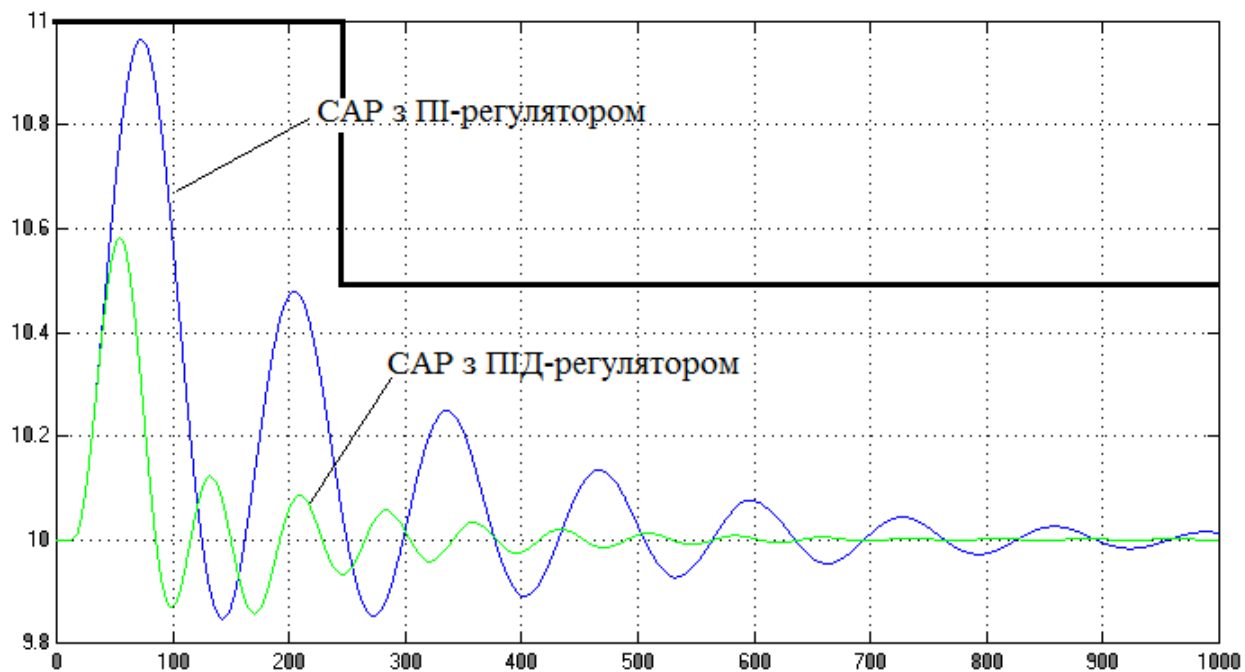


Рис. 1.15 – Порівняльний аналіз перехідних процесів у параметрично оптимальних системах

У результаті досліджень САР базової структури можна зробити висновок, що за найбільш важливими показниками якості САР з ПД-регулятором є кращою, ніж САР з ПІ-регулятором.

Тому в подальших дослідженнях в якості базового алгоритму регулювання будемо застосовувати ПД-регулятор.

Проведемо аналіз грубості САР до варіацій параметрів ОК. Для цього оберемо параметри ОК, за якими доцільно оцінити грубість САР, оберемо значення їх варіацій, сплануємо і проведемо машинний експеримент з оцінки грубості.

В процесі роботи системи може змінюватися час запізнення в каналі ОК та коефіцієнт передачі. Слід відзначити, що внаслідок нелінійності, параметри каналів можуть варіювати в межах до $\pm 20\%$. При цьому дослідження САР на грубість слід проводити в умовах дії детермінованих ступінчастих неконтрольованих збурень $10\% \text{ х.р.о.}$

У даній дипломній роботі грубість проводилась при варіації часу запізнень ОК. Найсприятливішими параметрами для ОК є $0,8 \cdot \tau$. Найнесприятливішими параметрами для ОК є $1,2 \cdot \tau$.

Структурні схеми моделювання для аналізу САР з ПІ- та ПІД-регуляторами на грубість аналогічні схемам моделювання для оптимального параметричного синтезу (рис. 1.11 і 1.13).

Результати оцінки САР з ПІ-регулятором на грубість наведені на рис. 1.16, а САР з ПІД-регулятором – на рис. 1.17.

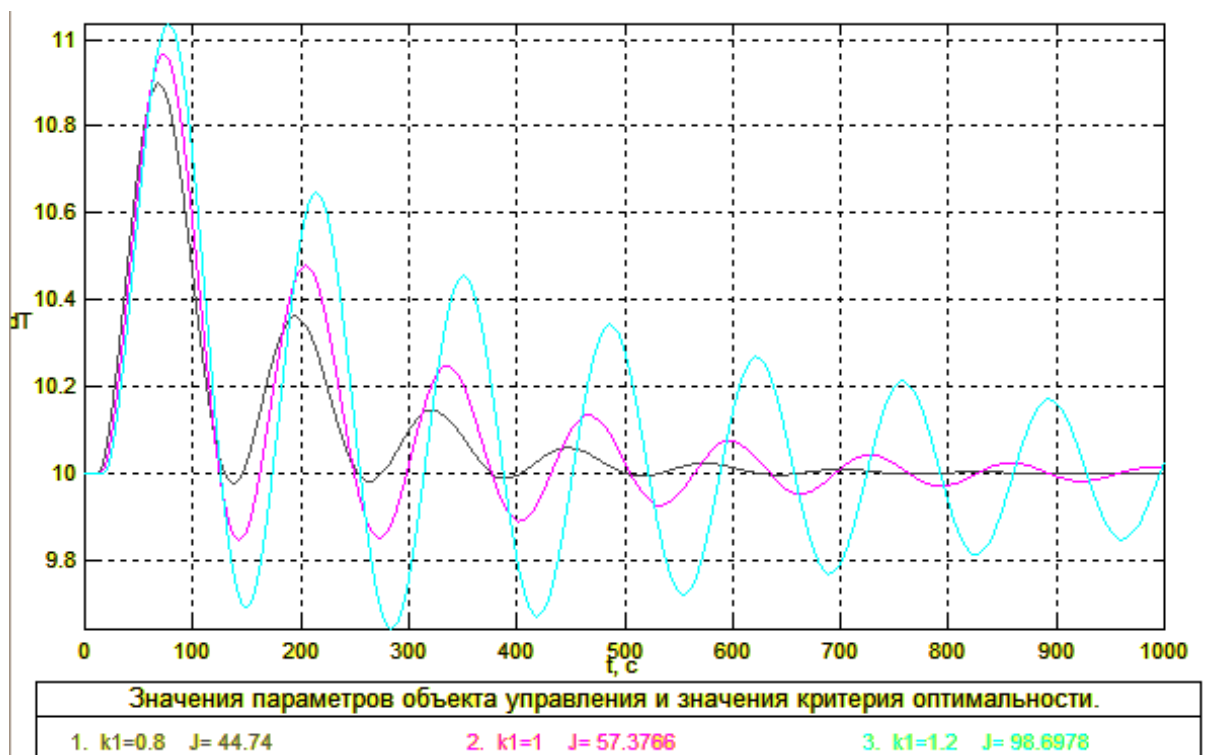


Рис. 1.16 – Аналіз на грубість САР з ПІ-регулятором в умовах дії детермінованих неконтрольованих збурень

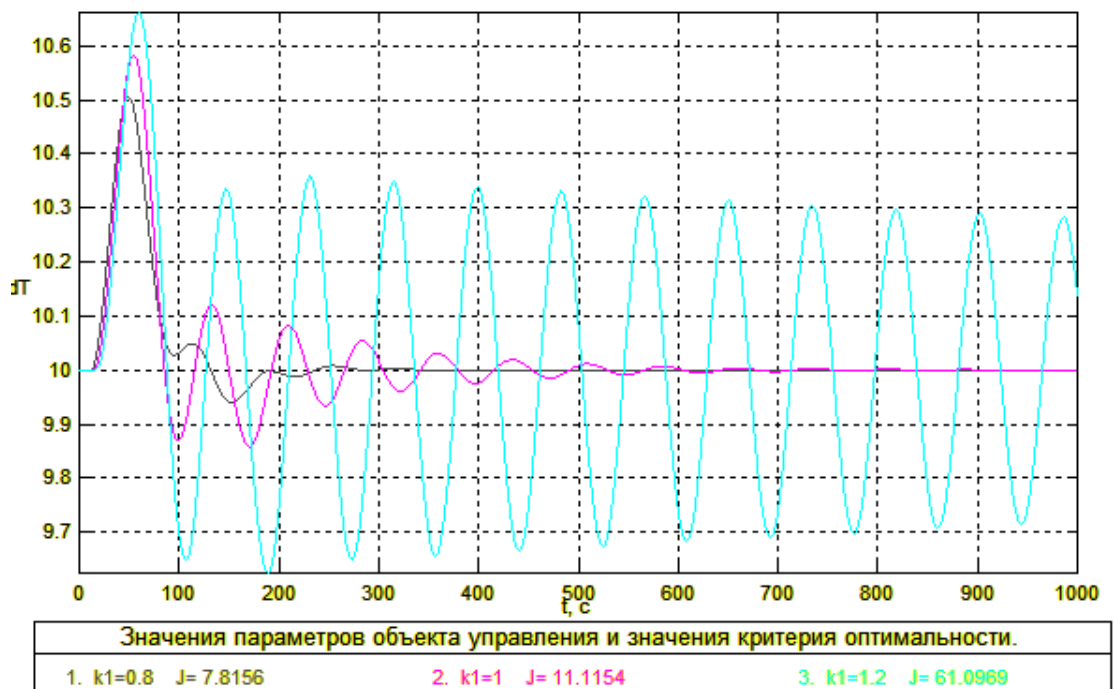


Рис. 1.17 – Аналіз на грубість САР з ПІД-регулятором в умовах дії детермінованих неконтрольованих збурень

Як видно з результатів, САР і з ПІ-регулятором, і з ПІД-регулятором є грубою, оскільки в умовах варіації параметрів ОК дає перехідні процеси, що сходяться. Але також в умовах дії збурень детермінованого характеру перехідні процеси в САР з ПІ-регулятором виходять за рамки регламентних зон, а в САР з ПІД-регулятором сильні коливання при найнесприятливіших параметрах ОК.

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих і неконтрольованих збурень, інтенсивна зміна завдання САР, а також внутрішні особливості ОК і САР (значне співвідношення t_0 / T_0 , взаємний вплив каналів в багатовимірної САР).

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є значне запізнення в ОК. Основним шляхом підвищення динамічної точності саме розглянутої САР є побудова САР з компенсацією запізнення.

Структурна схема САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання матиме вигляд, наведений на рис. 1.18.

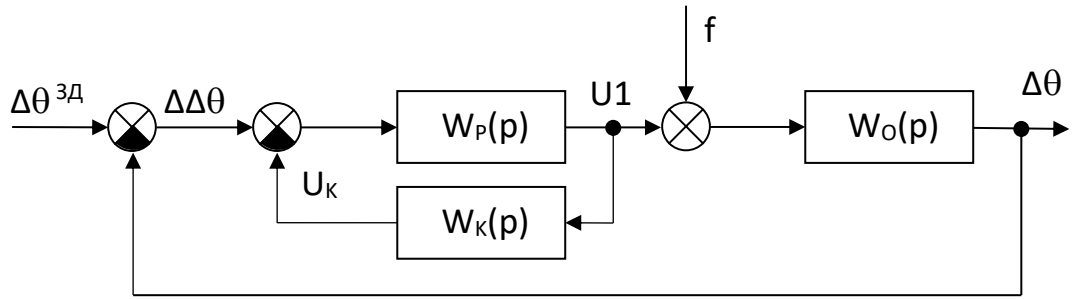


Рис. 1.18 – Структурна схема САР підвищеної динамічної точності

На рисунку:

U1 – положення регулюючого органу зміни частоти електроприводу вентилятору;

$\Delta\theta$ – різниця між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища;

f – вектор неконтрольованих збурень;

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

$W_K(p)$ - передаточна функція коригуючої ланки;

$\Delta\theta^{3Д}$ – задане значення регульованої координати;

$\Delta\Delta\theta$ – помилка регулювання.

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

Запізнення ОК не буде впливати на власний рух САР, якщо його передаточна функція не входить до власного оператора системи $Q^C(p)$. Запишемо передаточної функції «звичайної» САР (без коригуючого зв'язку) та САР з коригуючим зв'язком за каналом неконтрольованого збурення.

$$W_{f-\Delta\theta}^{co}(p) = \frac{W_{U1-\Delta\theta}(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_{f-\Delta\theta}(p)}$$

$$W_{f-\Delta\theta}^{ck}(p) = \frac{W_O(p)}{1 + \frac{W_P(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_K(p)} \cdot W_O(p)} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{W_O(p)}{\frac{1 + W_P(p) \cdot W_K(p) + W_P(p) \cdot W_O(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_K(p)}} = \\
&= \frac{W_O(p) \cdot (1 + W_P(p) \cdot W_K(p))}{1 + W_P(p) \cdot W_K(p) + W_P(p) \cdot W_O(p)}
\end{aligned}$$

Передаючі функції власних операторів систем:

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

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

В передаючих функціях власних операторів систем запишемо передаючу функцію ОК у вигляді добутку передаючої функції ОК, з якої виключено ланку запізнення $W_O'(p)$, та передаючої функції ланки запізнення $e^{-\tau_O p}$: $W_O(p) = W_O'(p) \cdot e^{-\tau_O p}$.

$$Q^{C3}(p) = 1 + W_P(p) \cdot W_O'(p) \cdot e^{-\tau_O p}$$

$$Q^{CK}(p) = 1 + W_P(p) \cdot W_K(p) + W_P(p) \cdot W_O'(p) \cdot e^{-\tau_O p}$$

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

$$Q^{CK}(p)|_{\tau_O > 0} = Q^{C3}(p)|_{\tau_O = 0}$$

Звідси:

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

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

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

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

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

$$W_O(p) = \frac{k_O \cdot e^{-\tau_O p}}{T_O p + 1}$$

Проведемо підстановку, отримаємо:

$$W_K(p) = (1 - e^{-\tau_O p}) \cdot \frac{k_O}{T_O p + 1}$$

Оскільки: $W_o(p) = \frac{-0,3 \cdot e^{-38p}}{57,5p+1}$, тоді передаточна функція коригуючого зв'язку набуде вигляду:

$$W_K(p) = (1 - e^{-38p}) \cdot \frac{-0,3}{57,5p+1}$$

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

Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку наведена на рис. 1.19, а її перехідна характеристика – на рис. 1.20.

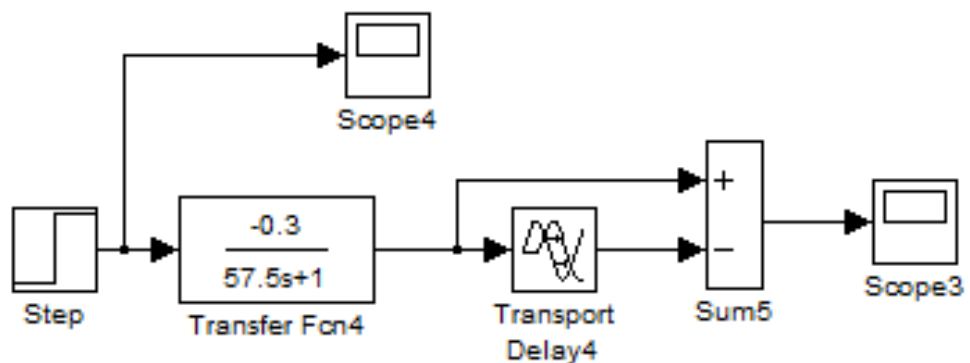


Рис. 1.19 – Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку

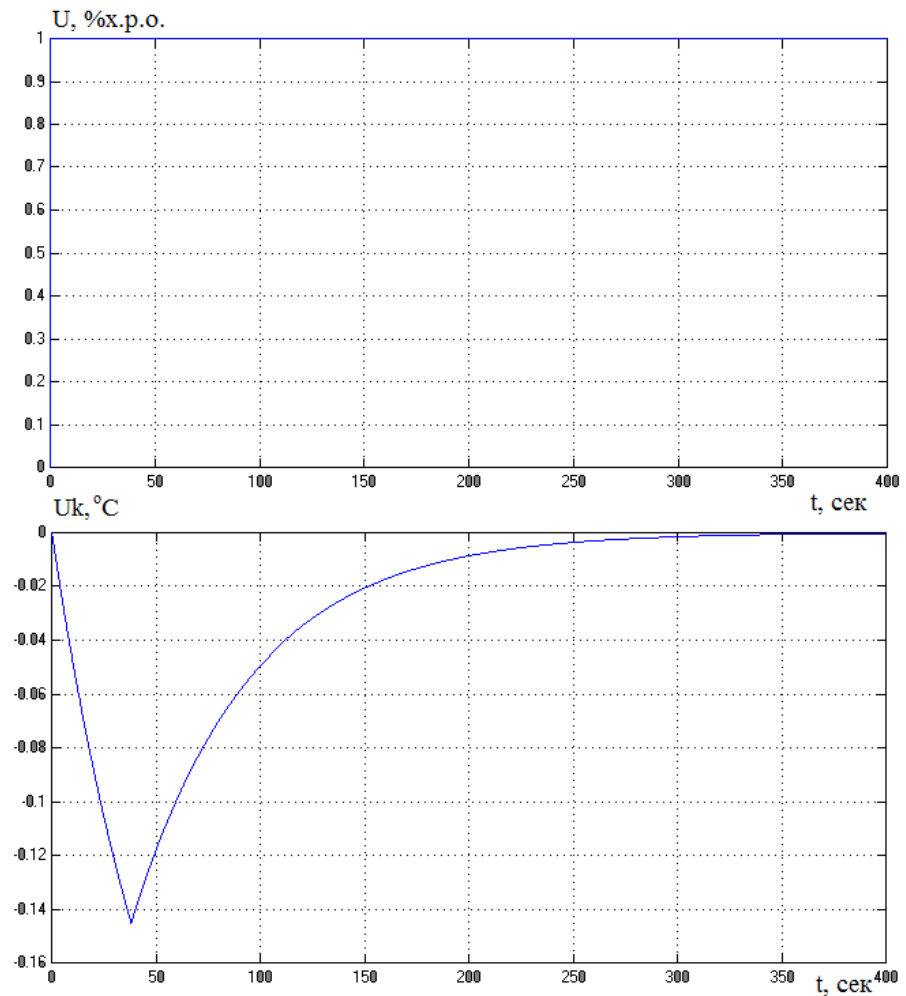


Рис. 1.20 – Перехідна характеристика коригуючого зв’язку

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

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

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв’язку приймемо такі значення параметрів: $K_K = -0,3$; $T_K = 57,5$; $\tau_{K1} = 38$. Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв’язку приведена на рис. 1.21, а результати оптимізації – на рис. 1.22.

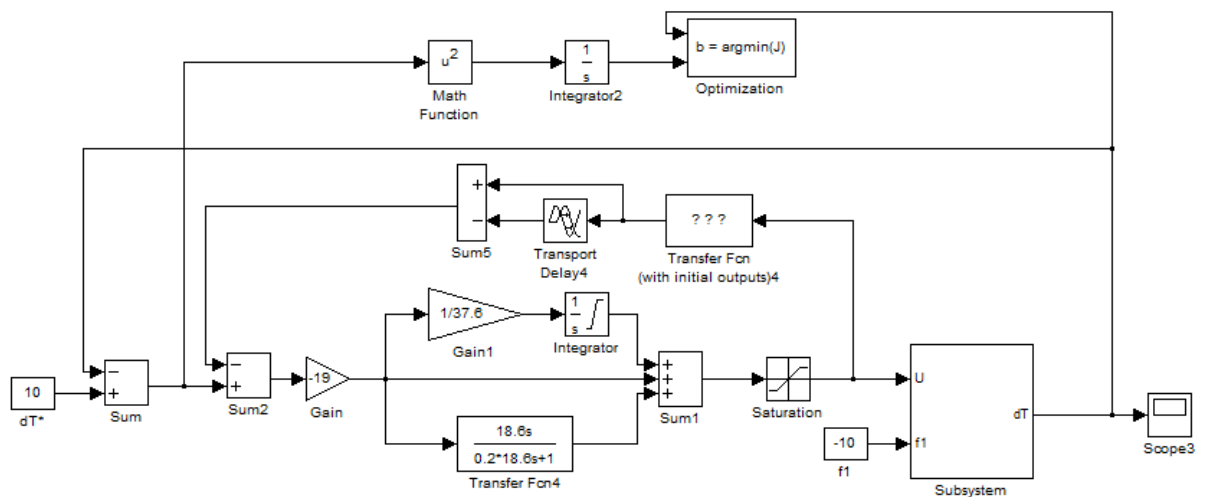
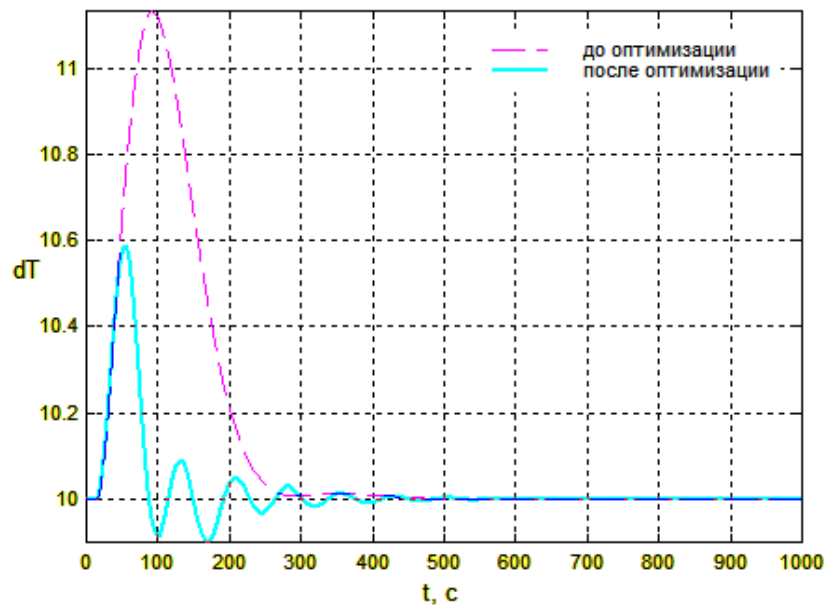


Рис. 1.21 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kk	-0.0063834	-50	-0.3	50	до - 108.0006
tk	100.7528	0.1	57.5	300	после - 10.7987
tauk	39.4879	0.1	38	300	оптимизации.
					Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 141

Рис. 1.22 – Результати оптимізації параметрів САР ПДТ

Проведемо аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіацій параметрів об'єкту регулювання. Як і в випадку з САР базової структури, САР підвищеної динамічної точності досліджуємо на грубість в

умовах варіації параметрів ОК, а саме, часу запізнення та коефіцієнту передачі в межах $\pm 20\%$. Найсприятливішими параметрами для ОК є $0,8 \cdot \tau$. Найнесприятливішими параметрами для ОК є $1,2 \cdot \tau$.

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК наведено на рис. 1.23. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР дає перехідні процеси, що сходяться, а значить, САР є грубою. І на відпадок від САР базової структури САР ПДТ при найнесприятливіших параметрах ОК веде себе стабільно.

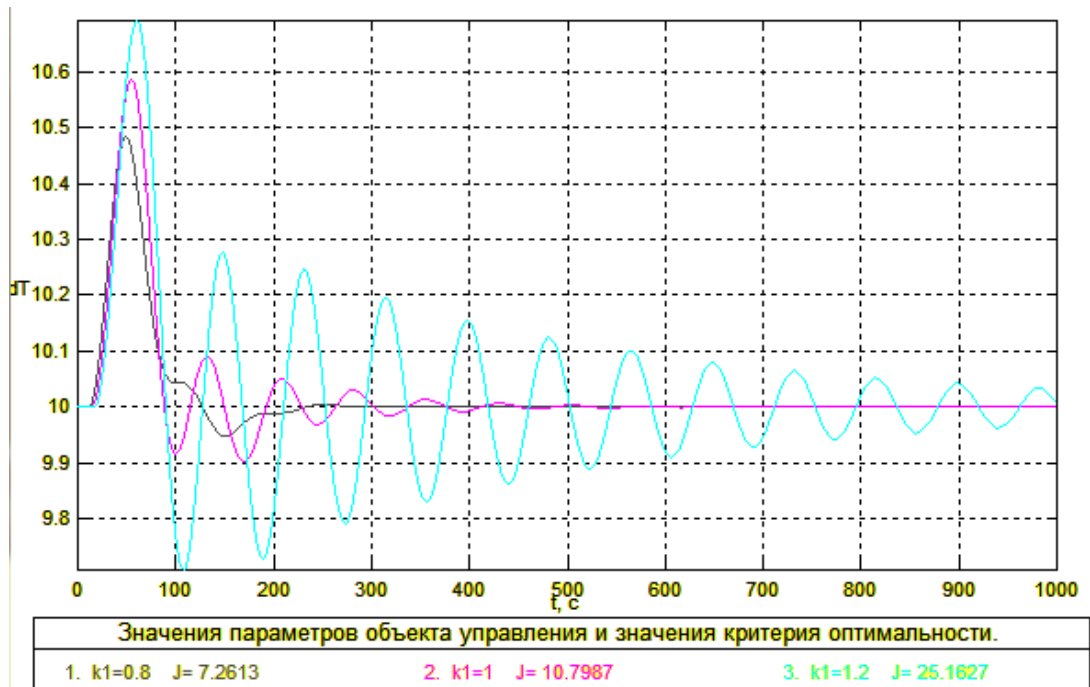


Рис. 1.23 – Результати перевірки САР з ПД-регулятором та коригуючою ланкою на грубість

Порівняльний аналіз перехідних процесів у параметрично оптимальних системах за значенням критерію оптимальності і показникам, для яких встановлені гранично-припустимі значення. В якості САР базової структури розглядається САР з ПД-регуляторами. Результати порівняння наведені на рис. 1.24 і в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняння САР з ПІД-регулятором та САР ПДТ

Варіант САР	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\Delta\theta^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}}, \text{с}$	
Базова	0,59	65	11,1
Підвищеної динамічної точності	0,59	65	10,8

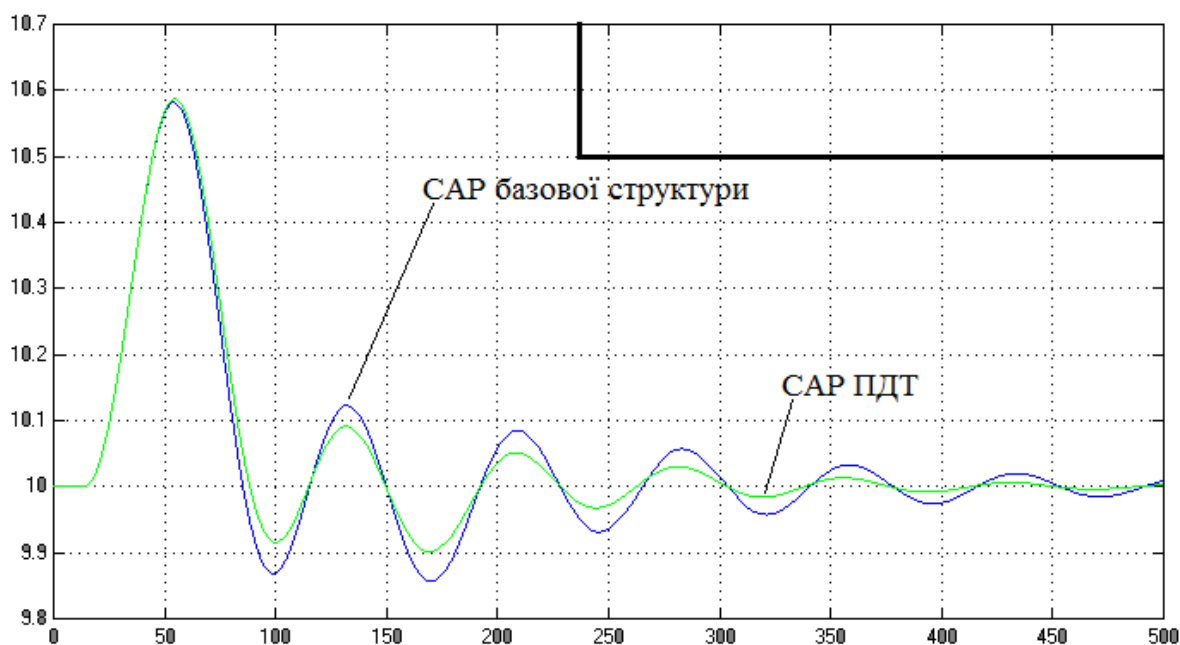


Рис. 1.24 – Порівняння САР з ПІД-регулятором та САР ПДТ

Як видно з показників якості перехідних процесів, прямі показники якості для САР базової структури та САР ПДТ однакові, а інтегральний показник якості незначно кращий для САР підвищеної динамічної точності. Це означає, що очікувано, САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання не дає суттєвого покращення показників якості перехідних процесів ОК.

Але САР з компенсацією запізнення показує кращі показники якості перехідних процесів при найсприятливіших для керування та найнесприятливіших для керування варіаціях параметрів ОК, це означає, що САР з компенсацією запізнення розширяє запас стійкості САР базової структури.

1.6 Недоліки відомих САК ТП охолодження гранульованих комбікормів, обґрунтування напрямків удосконалення САК як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу

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

Розглянуті вище в п.п. 1.5 системи регулювання забезпечують досить високу статичну та динамічну точність та забезпечують запас стійкості але ні в моделях ОК ні в алгоритмах керування не враховуються зміна температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки. Зміна температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки досить сильно змінює температуру гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки тобто і різницю між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища та погіршує динамічну точність САР. Віднесення цих змін температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки до контрольованих збурень та побудова САР різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища інваріантною до цих збурень може підвищити динамічну точність САР. Для вирішення цієї задачі потрібно доопрацювати математичну модель ОК та розробити інваріантну систему регулювання.

1.7 Висновки за розділом

Виходячи з вищевказаних обґрунтувань доцільно доопрацювати математичну модель ОК та розробити інваріантну систему.

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП ОХОЛОДЖЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ КОМБІКОРМІВ

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

Детально проаналізувавши вибраний об'єкт регулювання, можна зробити висновок, що зміна температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки досить сильно має значний вплив на різницю між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища. Цей перехресний зв'язок в ОК знижує динамічну точність САР. Основним шляхом підвищення динамічної точності даної САР являється побудова САР інваріантної до цих збурень. У основу підвищення динамічної точності САР буде покладений принцип двоканальності Петрова, суть якого у введенні додаткового каналу дії « $\theta_k - \Delta\theta$ » через корегуючий зв'язок. А це потребує доробки моделі ОР.

2.2 Доопрацювання математичної моделі ОР для розв'язання задачі додаткового застосування в САР принципу інваріантної до контрольованих збурень

Для побудови САР інваріантної до змін температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки доповнюємо розроблену модель ОК моделлю каналу дії контрольованого збурення « $\theta_k - \Delta\theta$ ». Для цього на основі експериментальної перехідної характеристики отримуємо математичну модель цього каналу.

Проведемо параметричну ідентифікацію моделі ОК для каналу « $\theta_k - \Delta\theta$ ». Перехідна характеристика наведена на рис. 2.1.

Коефіцієнт передачі ОУ визначають по формулі:

$$K_o = \frac{\Delta\Delta\theta}{\Delta\theta_k} = \frac{11 - 8}{75 - 70} = 0.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}}$$

Для ідентифікації постійної часу і часу запізнювання як для моделі 1-го порядку, так і для моделі 2-го порядку доцільно використати методики "двох загальних точок".

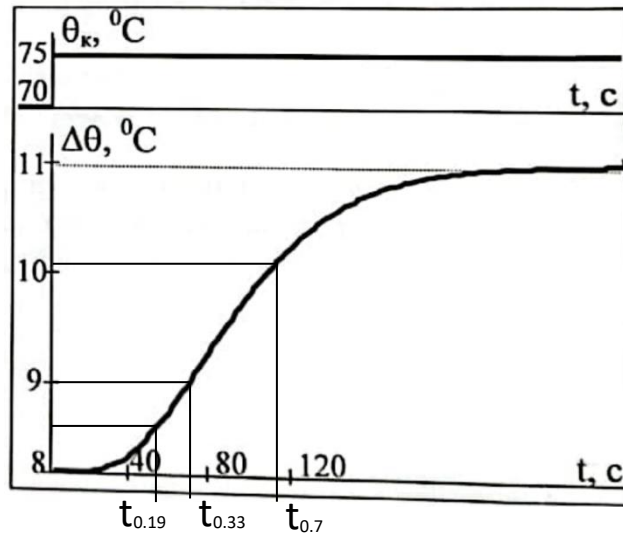


Рис. 2.1 – Параметрична ідентифікація моделі ОК для каналу « $\theta_k - \Delta\theta$ »

Для моделі 1-го порядку

Проводимо графічні побудови (рис. 2.1), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$:

$$t_{0,33} = 70 \text{ с};$$

$$t_{0,7} = 113 \text{ с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 * (3 * t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 * (3 * 70 - 113) = 48.5 \text{ с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (113 - 48.5) / 1,2 = 53.8 \text{ с}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК матиме вигляд:

$$W(p)_{\theta_k - \Delta\theta} = \frac{0.6 \cdot e^{-48.5p}}{53.8p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку

Проводимо графічні побудови (рис. 2.2), знаходимо $t_{0,19}$:

$$t_{0,19} = 53 \text{ с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 * (3 * t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 * (3 * 53 - 113) = 23 \text{ с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 2,4 = (113 - 23) / 2,4 = 37.5 \text{ с}$$

Передатна функція моделі 2-го порядку ОК матиме вигляд:

$$W(p)_{\langle \theta_k - \Delta \theta \rangle} = \frac{0.6 \cdot e^{-23p}}{(37.5p + 1)^2}$$

Схема моделювання повної моделі ОК прийме наступний вигляд (рис.2.2).

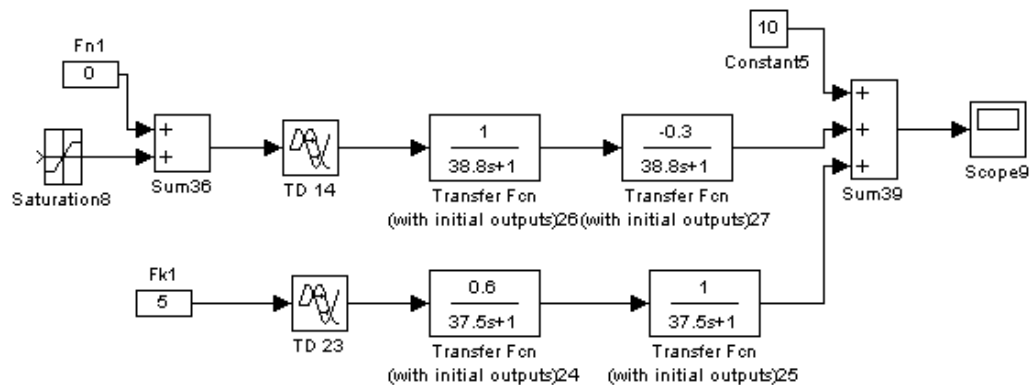


Рис. 2.2 – Схема моделювання повної моделі каналів ОК

2.3 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності

Для реалізації інваріантної системи в якості базової будемо використовувати раніше розроблену систему з компенсацією запізнення у власному русі.

В основу підвищення динамічної точності САР буде покладено принцип двоканальний Петрова, сутність якого у введенні додаткового каналу впливу « $\theta_k - \Delta \theta$ ». через коригувальний зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема САР, інваріантної до дії контрольованого обурення матиме вигляд, наведений на рис. 2.3.

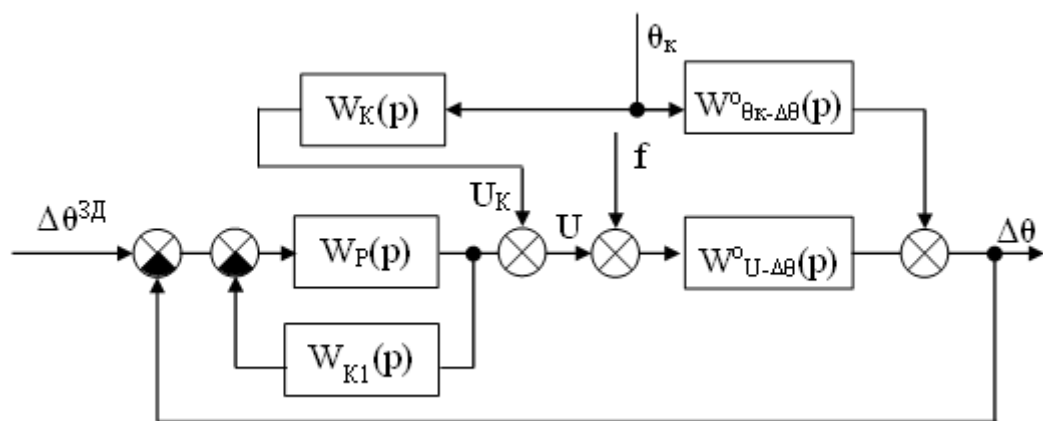


Рис. 2.3 – Структурна схема САР з компенсацією запізнення у власному русі та інваріантної до дії контрольованих збурень

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

$W_{K1}(p)$ – передаточна функція коригуючого зв'язку;

$W_P(p)$ – передаточна функція регулятора різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища;

$W^o_{U-\Delta\theta}(p)$ – передаточна функція ОК за каналом керування;

$W^o_{\theta_K-\Delta\theta}(p)$ – передаточна функція ОК за каналом контрольованого збурення;

$\Delta\theta$ – різниця між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища, °С;

f – вектор неконтрольованих збурень.

$\Delta\theta^{3Д}$ – задане значення регульованої координати;

θ_K – температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки (контрольоване збурення);

U – положення регулюючого органу зміни частоти електроприводу вентилятору, % х.р.о.;

U_K – коригуюча дія;

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткового каналу передачі контрольованого збурення, а для нашої САР є

така можливість. Достатньою умовою реалізації САР є фізична реалізуємость передатної функції коригуючого зв'язку.

Отримання передавальних функцій коригувальних зв'язків, аналіз їх структури з умов фізичної можливості бути реалізованим, приведення до вигляду що фізично реалізуємий, подання до формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідних характеристик.

Для забезпечення інваріантності до дії контрольованого обурення САР повинна забезпечити помилку стабілізації рівною нулю:

$$\Delta\Delta\theta_{\text{стаб}} = 0$$

Звісно, що

$$\Delta\Delta\theta_{\text{стаб}} = W_{\theta_k - \Delta\theta}^C(p) \cdot \theta_k = 0$$

Якщо $\theta_k \neq 0$, то

$$W_{\theta_k - \Delta\theta}^C(p) \cdot \theta_k = 0$$

$$W_{\theta_k - \Delta\theta}^C(p) = \frac{W_{\theta_k - \Delta\theta}^o(p)}{1 + W_P(p)W_{U - \Delta\theta}^o(p)} + \frac{W_K(p) \cdot W_P(p) \cdot W_{U - \Delta\theta}^o(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_{U - \Delta\theta}^o(p)} = 0$$

Звідси

$$W_K(p) = -\frac{W_{\theta_k - \Delta\theta}^o(p)}{W_P(p)W_{U - \Delta\theta}^o(p)}$$

Якщо коригуюча дія приведена до керуючої тоді передатна функція коригуючого зв'язку буде мати наступний вид:

$$W_K(p) = -\frac{W_{\theta_k - \Delta\theta}^o(p)}{W_{U - \Delta\theta}^o(p)}$$

Якщо

$$W_{U - \Delta\theta}^o(p) = \frac{-0,3}{(38,8p+1)^2} \cdot e^{-14p}, W_{F_r - \Delta P}^o(p) = \frac{0.6}{(37,5p+1)^2} \cdot e^{-23p}$$

Тоді

$$W_K(p) = -\frac{\frac{0.6}{(37,5p+1)^2} \cdot e^{-23p}}{\frac{-0,3}{(38,8p+1)^2} \cdot e^{-14p}} = -\frac{0.6}{-0,3} \cdot e^{(-23+14)p} \times$$

$$\begin{aligned} \times \frac{\frac{1}{(37,5p+1)^2}}{\frac{1}{(38,8p+1)^2}} &= 2 \cdot e^{-9p} \cdot \frac{\frac{1}{1406.3p^2+75p+1}}{\frac{1}{1505.4p^2+77.6p+1}} = \\ &= 2 \cdot e^{-9p} \cdot \frac{1505.4p^2+77.6p+1}{1406.3p^2+75p+1} \end{aligned}$$

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку є фізично реалізуємою але має складний вид для реалізації. Спростимо її зберігаючи властивості та приведемо до з'єднання типових динамічних ланок:

$$W_K(p) = 2 \cdot e^{-9p} \cdot \frac{77.6p+1}{1406.3p^2+75p+1}$$

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку приймемо наступні значення параметрів: $K_{K1} = 2$; $T_{K1} = 77.6$; $T_{K2} = 37.5$; $T_{K3} = 9$. Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку потрібно провести моделювання. При проведенні налаштування САР параметри коригуючих зв'язку можливо оптимізувати окремо так як коригуючий зв'язок не входить до оператора власного руху системи. Але спочатку доцільно провести повторний оптимальний параметричний синтез САР з упереджувачем Сміта для підвищення її динамічної точності. Як видно з регламентів на САР для процесу охолодження гранульованих комбікормів особливо жорсткі вимоги пред'являються до тривалих відхилень, оскільки саме недотримання цих регламентів може привести до браку готової продукції і істотних економічних збитків. Тому в якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний квадратичний критерій, що сильно штрафує великі відхилення. Тому ефективність роботи САР різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища і підвищення її динамічної точності доцільно оцінювати за наступним критерієм:

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

де t_M – час моделювання;

$\Delta\Delta\theta(t)$ – помилка регулювання.

2.4 Оптимальний параметричний синтез САР базової структури та аналіз результатів синтезу

На першому етапі проведемо оптимізацію параметрів регулятора в умовах параметричної невизначеності параметрів моделі ОК. Тобто при варіації параметрів ОК у межах 20%. Для оптимального параметричного синтезу САР тиску у топці котла з ПІД-регуляторами використовуватимемо структурну схему моделювання, приведену на рис. 2.4. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів наведені на рис. 2.5.

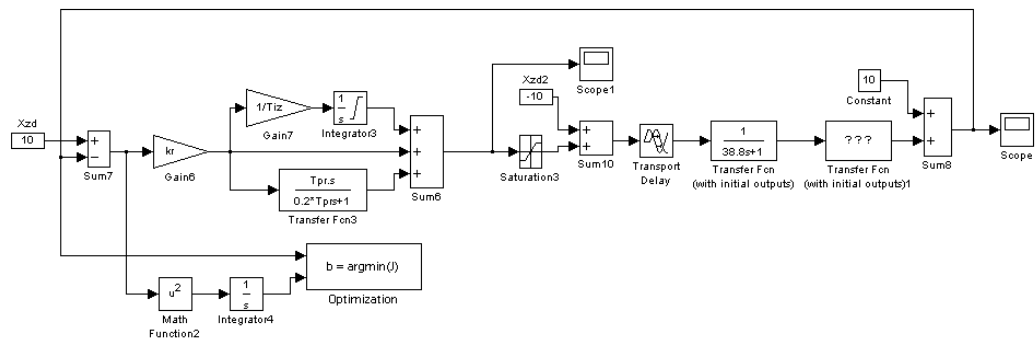
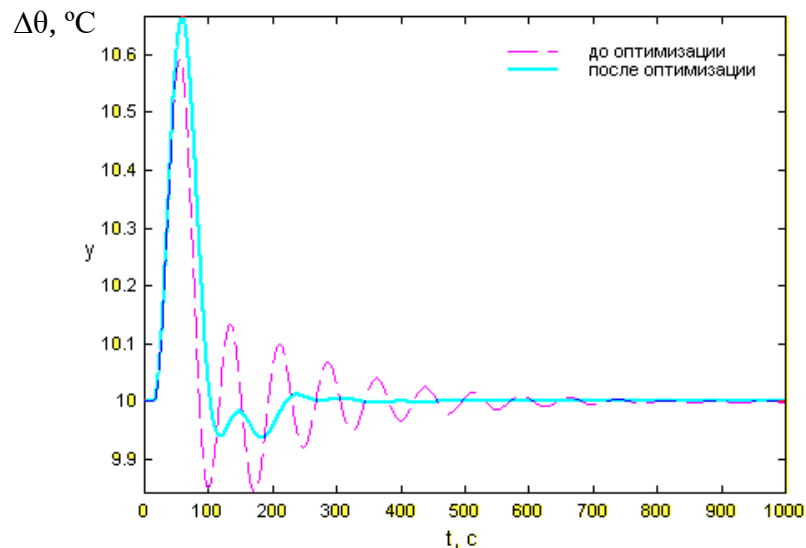


Рис. 2.4 – Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kr	-14.2742	-50	-19	-1	до - 798.3318
Tiz	38.5115	2	37.6	200	после - 17.7
Tpr	19.2666	2	18.6	100	оптимизации.
					Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1500
					фактическое - 131

Рис. 2.5 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

Проведемо аналіз грубості САР до варіацій параметрів ОК. В процесі роботи котла може змінюватися час запізнення та коефіцієнт передачі в каналах ОК. Слід зазначити, що внаслідок нелінійності, запізнення каналів можуть варіювати в межах до $\pm 20\%$. При цьому дослідження САР на грубість проводитимемо в умовах дії детермінованих ступінчастих неконтрольованих збурень 10% х.р.о.

Результати оцінки САР з ПІД-регуляторами на грубість наведені на рис. 2.6. Як видно з рис. 2.6, САР з ПІД-регуляторами є грубою.



Рис. 2.6 – Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором

На наступному кроці проведемо моделювання САР з ПД-регулятором та упереджувачем Сміта без оптимізації (САР ПДТ1). Схема моделювання наведена на рис.2.7. Результати моделювання наведено на рис. 2.8. Результати перевірки САР з ПД-регулятором та випереджувачем Сміта на грубість наведено на рис. 2.9. Я видно з рисунків запас стійкості системи збільшився.

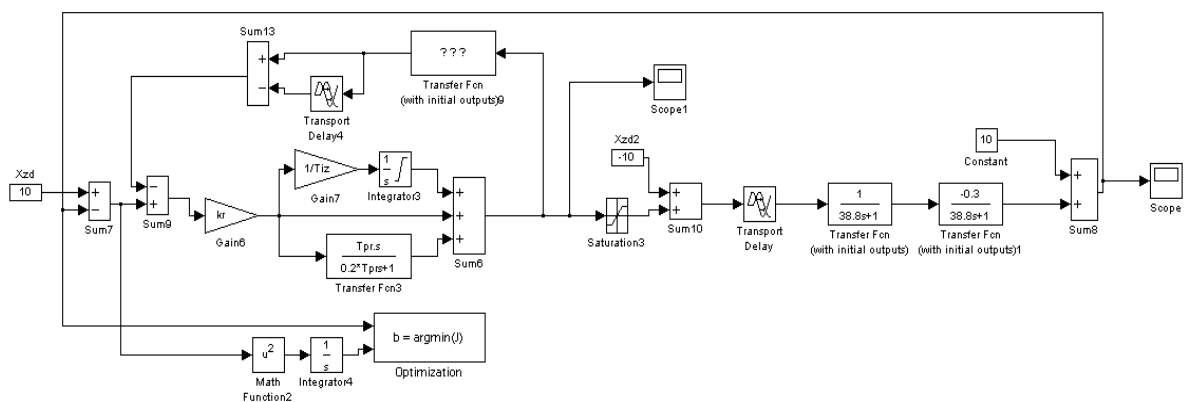


Рис. 2.7 – Структурна схема моделювання САР з ПД-регулятором та упереджувачем Сміта

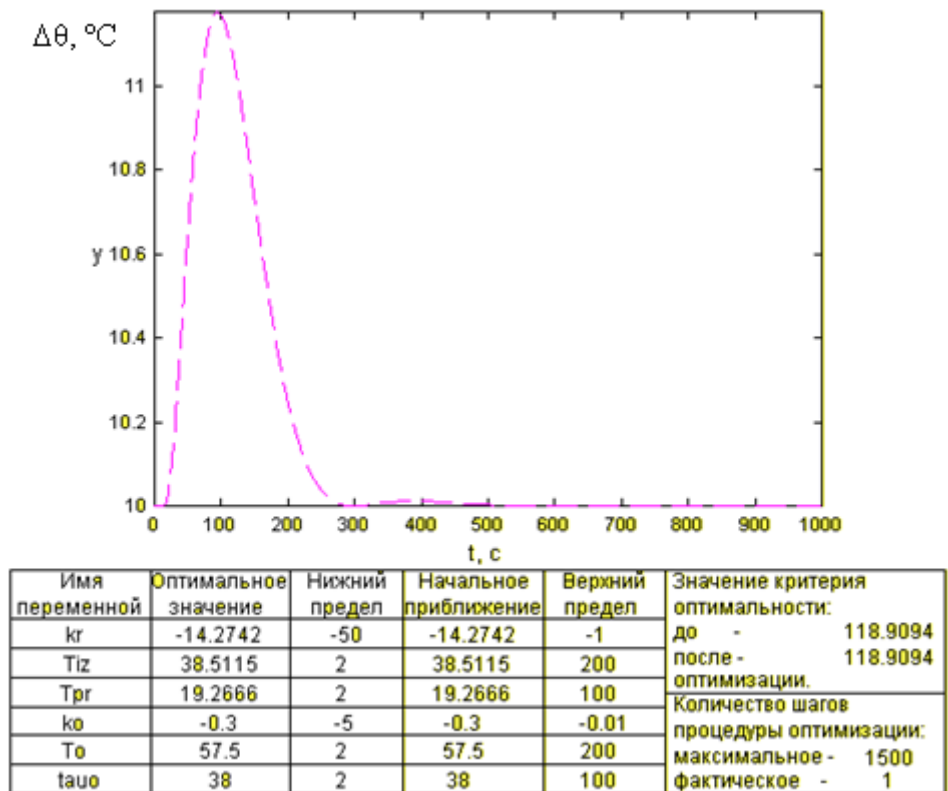


Рис. 2.8 – Результати моделювання САР з ПД-регулятором і упереджувачем Сміта



Рис. 2.9 – Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором і упереджувачем Сміта

Для забезпечення більш високої динамічної точності САР з упереджувачем Сміта проведемо оптимальний параметричний синтез ПД – регулятора і параметрів коригуючого зв'язку (САР ПДТ2). Результати оптимізації налаштувань ПД-регуляторів наведені на рис. 2.10. А результати перевірки на грубість на рис.2.11.

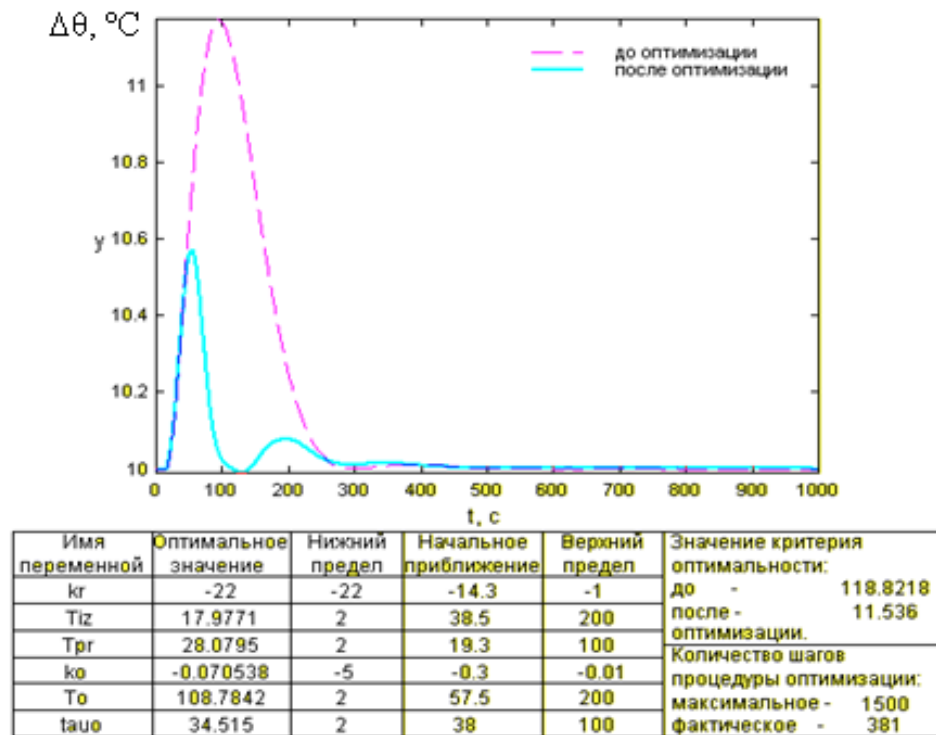


Рис. 2.10 – Результати оптимізації налаштувань ПД-регулятора і упереджувача Сміта



Рис. 2.11 – Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором і упереджувачем Сміта

Проведемо порівняльний аналіз роботи альтернативних варіантів САР.
Схема моделювання наведена на рис.2.12 , а результати на рис. 2.13

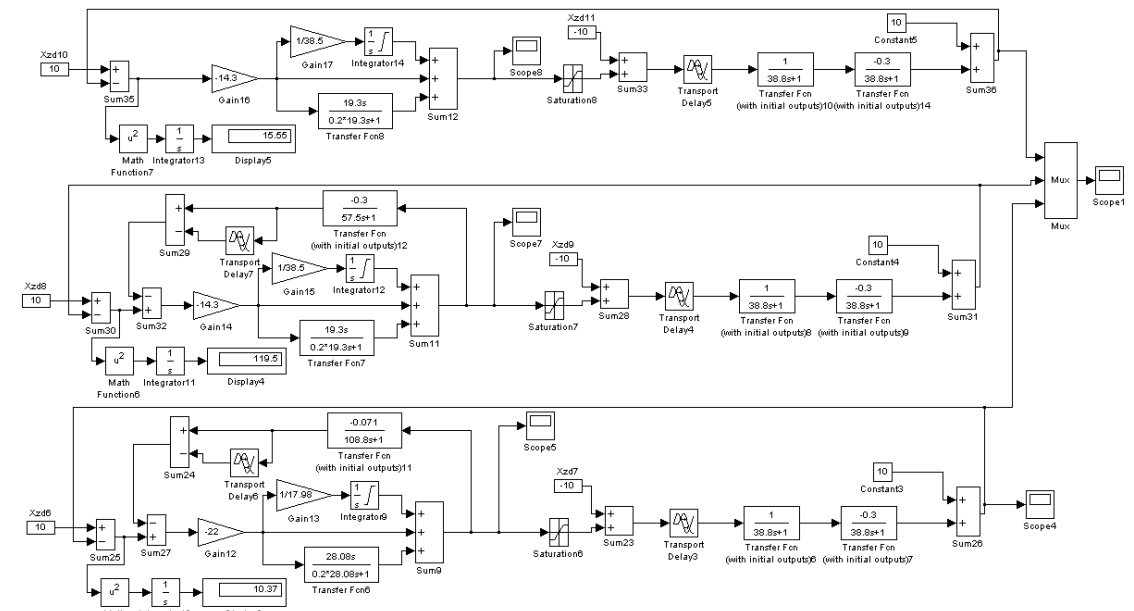


Рис. 2.12 – Структурна схема моделювання для порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

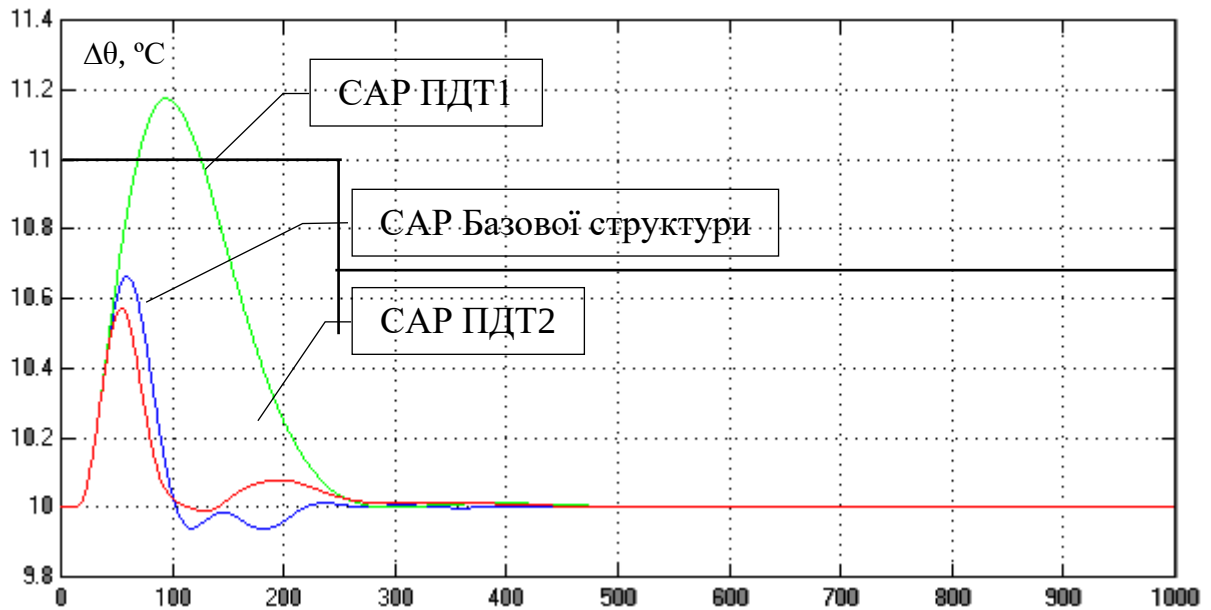


Рис. 2.13 – Перехідні процеси в САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

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

Структура САР	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\Delta\theta^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}}, \text{с}$	
Базова	0,67	80	15,6
Підвищеної динамічної точності (САР ПДТ1)	1,18	170	119,5
Підвищеної динамічної точності (САР ПДТ2)	0,58	70	10.4

2.5 Оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності та аналіз результатів синтезу

Доповнимо схему моделювання каналом дії контрольованого збурення та коригуючим зв'язком який забезпечує інваріантність відносно контрольованих збурень. Схема моделювання САР підвищеної динамічної

точності інваріантної до контрольованих збурень для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку приведена на рис. 2.14, а результати оптимізації – на рис. 2.15.

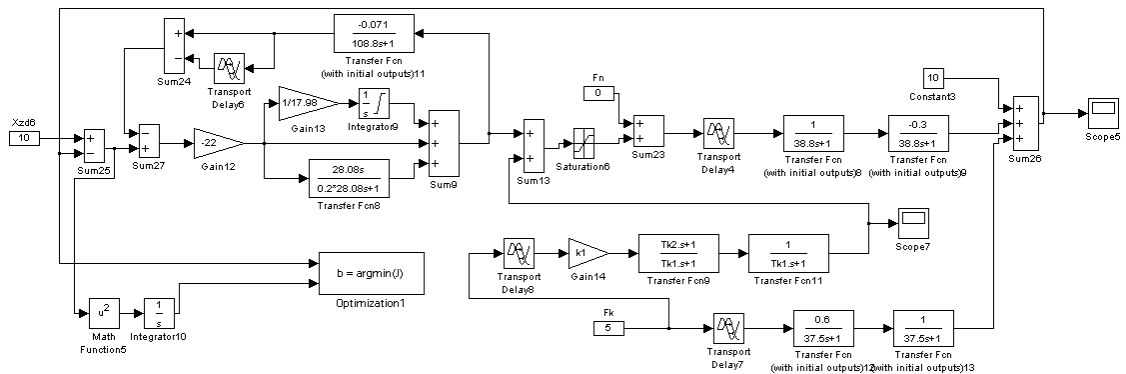
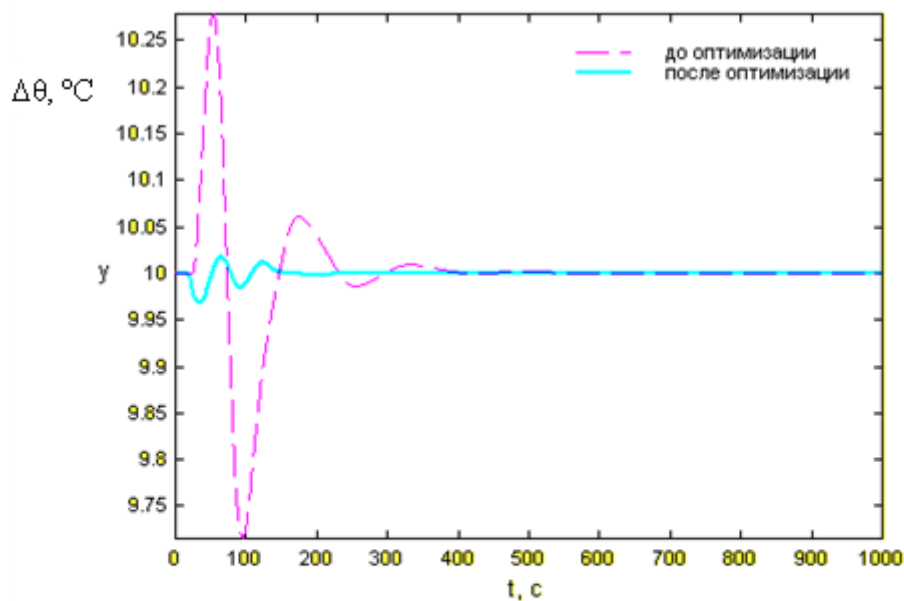


Рис. 2.14 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
k1	2.0279	0.1	2	10	до - 4.0692
Tk1	14.1457	2	37.5	100	после - 0.027523
Tk2	23.9865	2	77.6	200	оптимизации.
Tk3	1	1	9	20	Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1500
					фактическое - 204

Рис. 2.15 – Результати оптимізації налаштувань коригуючого зв'язку

Перевіряти отриману САР на грубість не потрібно тому що коригуючий зв'язок не входить до власного оператору САР.

Проведемо порівняльний аналіз роботи альтернативних варіантів САР.
Схема моделювання наведена на рис. 2.16, а результати на рис.2.17.

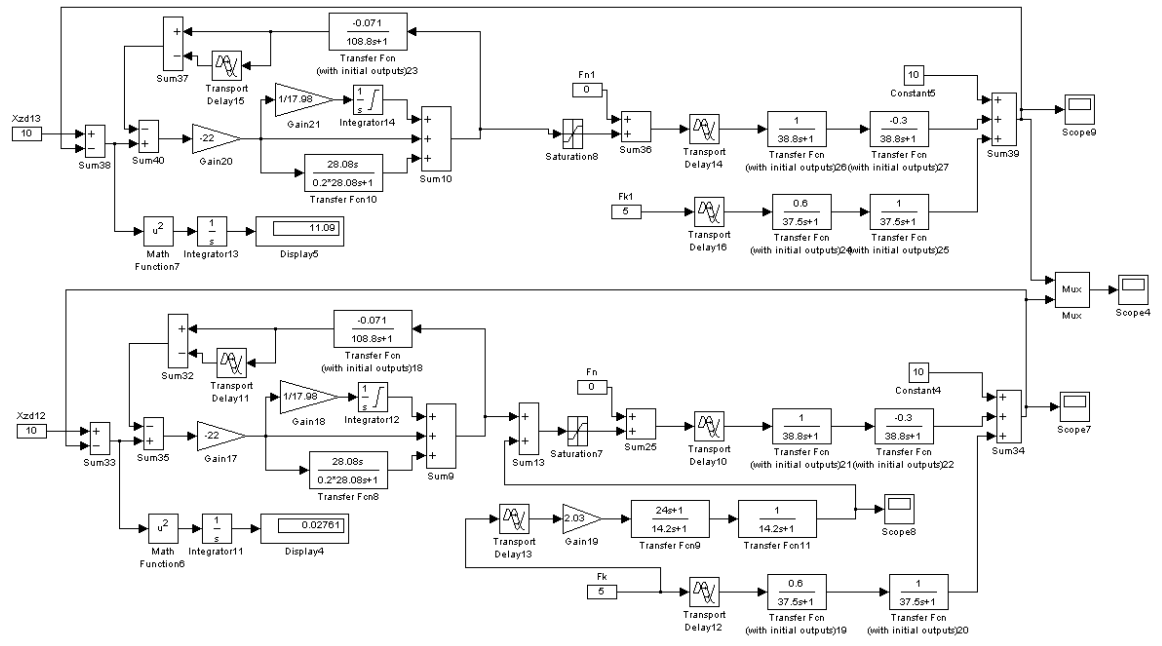


Рис. 2.16 – Структурна схема моделювання для порівняння САР з упереджувачем Сміта та інваріантної САР з упереджувачем Сміта в перехідних режимах

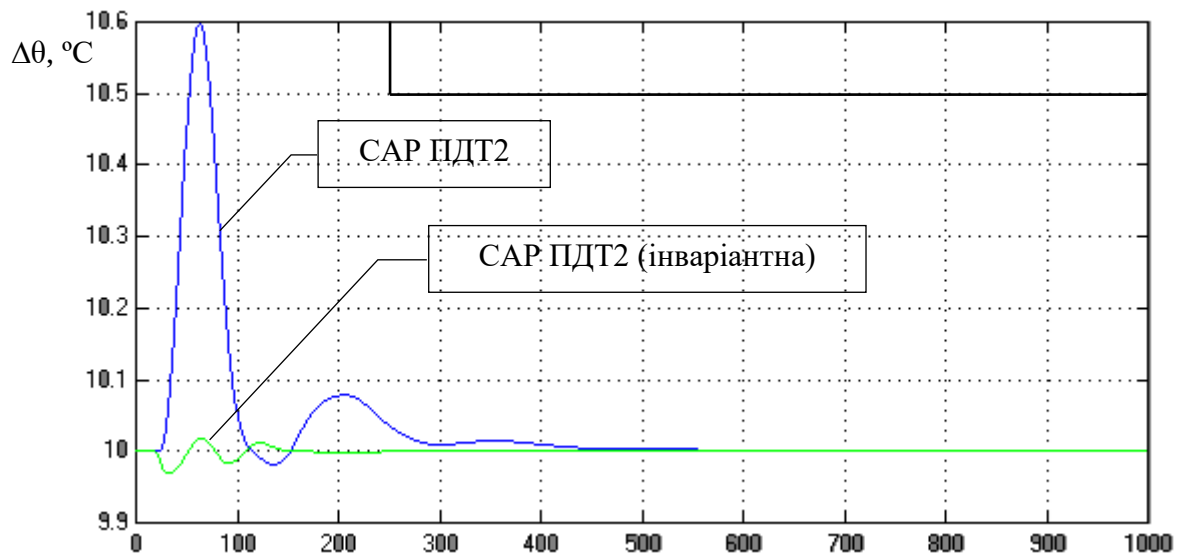


Рис. 2.17 – Перехідні процеси в САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

Таблиця 2.2 – Результати порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

Структура САР	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\Delta\theta^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}}, \text{с}$	
Підвищеної динамічної точності	0,6	75	11,1
Підвищеної динамічної точності (інваріантна)	0,035	0	0.03

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

Для технічної реалізації доцільно використовувати САР підвищеної динамічної точності, що забезпечує інваріантність до змін температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки.

2.6 Висновки за розділом

В даній роботі розроблена САР різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища з упереджувачем Сміта та інваріантністю до змін температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки. Результати моделювання показують, що введення коригуючих зв'язків дозволило істотно зменшити прямі та інтегральні показники якості тобто підвищилась динамічна точність САР.

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

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

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

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

можна використовувати систему управління з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

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

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

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

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

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

На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкту управління, яка є більш розширеною моделлю, розробка якої представлена в розділі 2 роботи. У блоці Look up Table у табличній формі задається нелінійний зв'язок (залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

В остаточному підсумку в результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_1 - \Delta\theta$ », яка має вигляд, представлений на рисунку 3.2. З рисунку 3.2 видно, що статична характеристика несуттєво нелінійна, це дає можливість виконати синтез САУ з традиційними ПД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

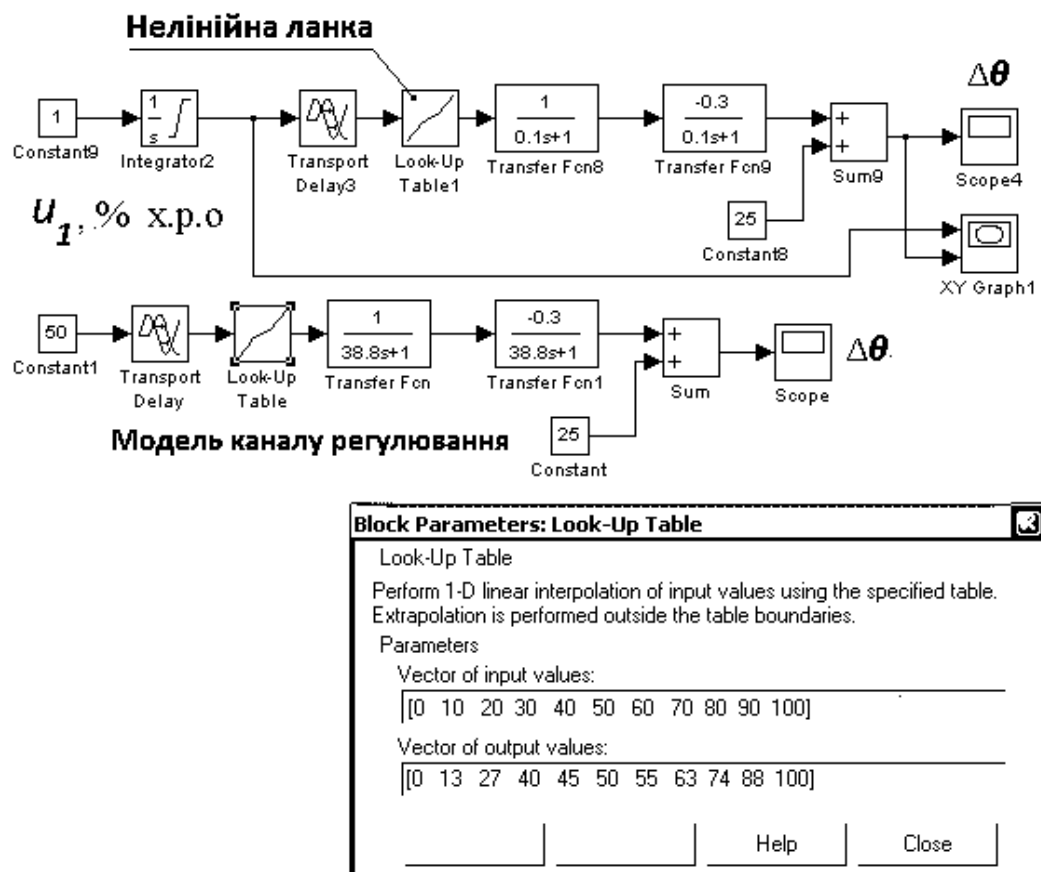


Рис. 3.1 – Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

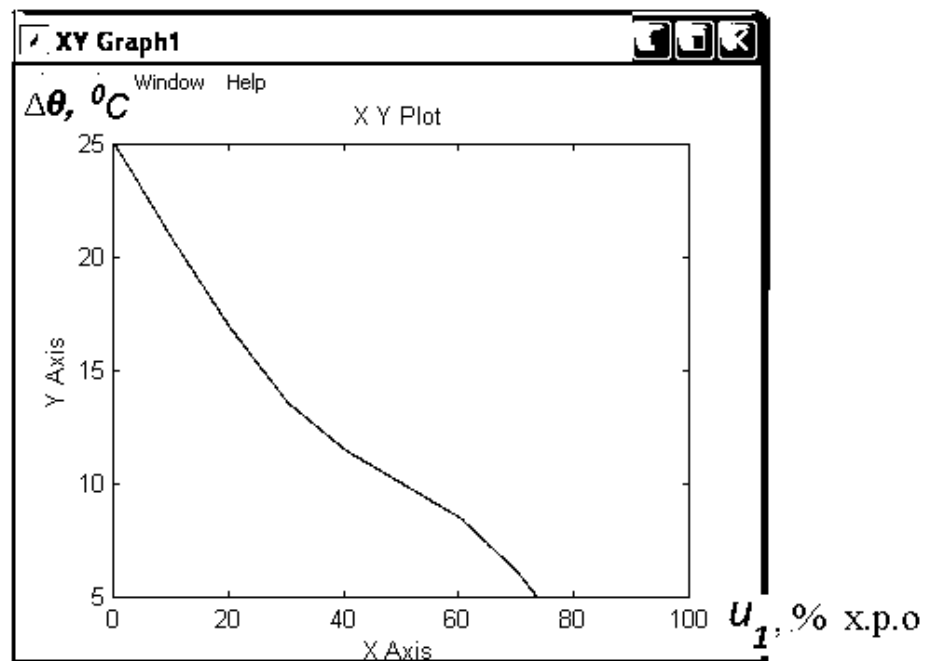


Рис. 3.2 – Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

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

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

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

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

$$J = \int_0^{\infty} |e_1(t)| dt \rightarrow \min$$

$e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища $\Delta\theta_z$;

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

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

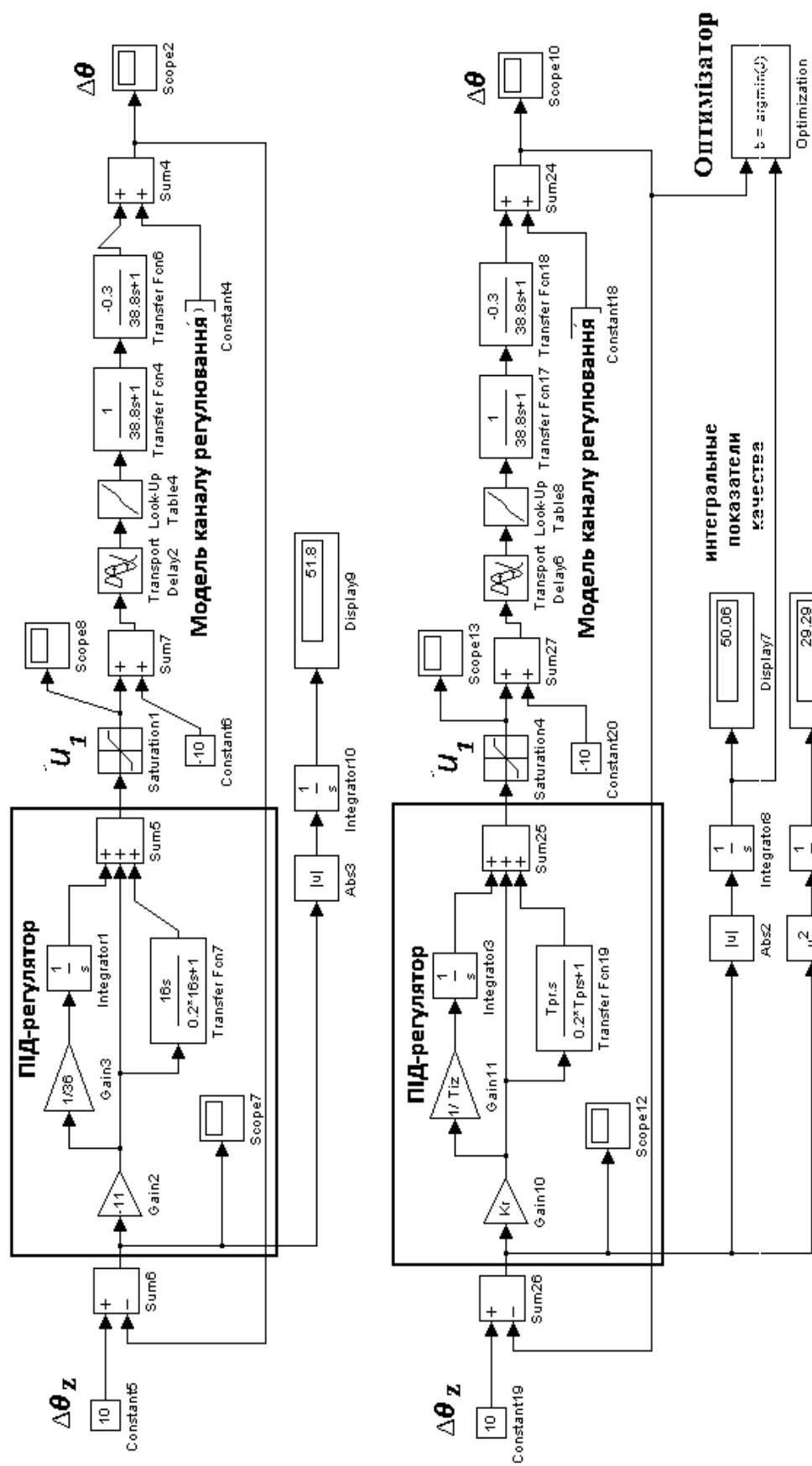


Рис. 3.3 – Структурна схема моделі оптимізованої САР з традиційним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором, та структурна схема моделі оптимізованої САР що реалізована засобами MATLAB\Simulink

Відповідно до нормативів ведення технологічного процесу різниця температур $\Delta\theta$ має підтримуватися на рівні 10°C з точністю $\pm 0,50^{\circ}\text{C}$. За цим параметром припустимі короточасні відхилення до $\pm 1^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 240 секунд. Всі ці дані відповідають перехідній характеристиці представленої після оптимізації.

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



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

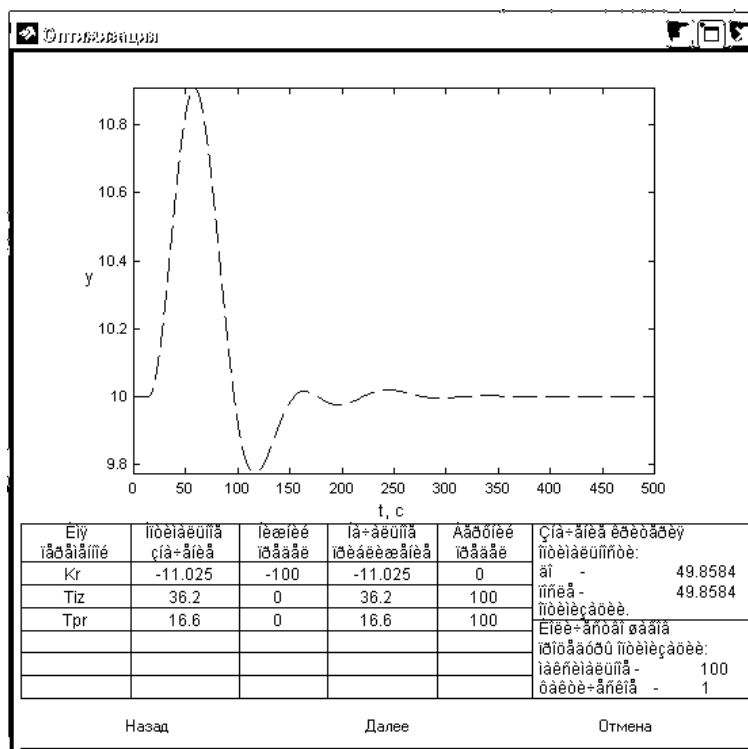


Рис. 3.4 – Результати параметричної оптимізації значень параметрів регуляторів САУ з каналом регулювання, що характеризуються нелінійною статичною характеристикою

3.4 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нечіткого регулятора

З урахуванням властивостей установки охолодження гранульованих комбікормів, як нелінійного об'єкта управління, доцільно застосувати в контурі регулювання різниці температур $\Delta\theta$ нечіткий логічний регулятор (НЛР), який має властивості нелінійного регулятора. Застосування нечіткого-логічного регулятора (Fuzzy – регулятора) обумовлено наявністю нелінійного об'єкта управління, а також складного опису його статичних режимів роботи.

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

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазіуправління: фазифікація, логічного висновку і дефазифікація. Спрощена структурна схема розроблюємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.5.

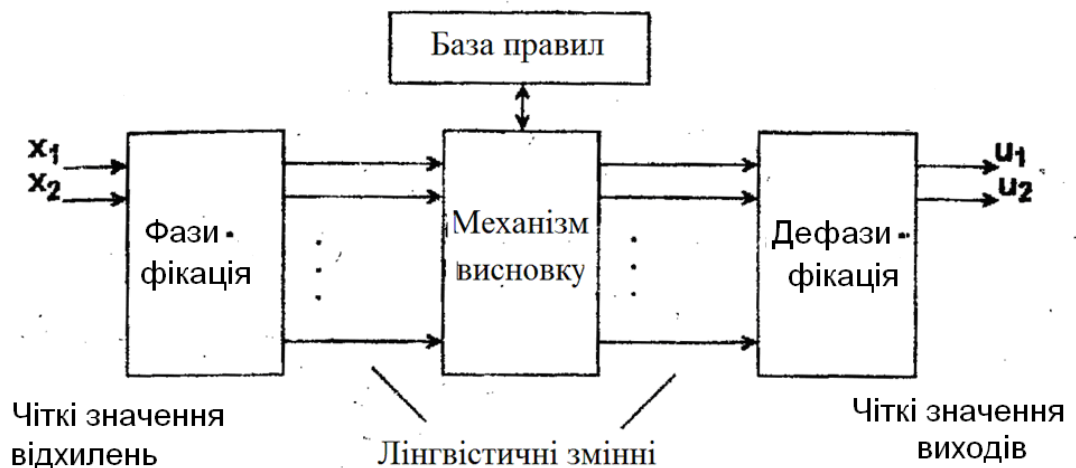


Рис. 3.5 – Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

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

На рисунку 3.6 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора різниці температур $\Delta\Theta$ з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

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

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

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

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

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

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

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

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

де C_1, C_2 - звичайні (чіткі) числа.

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

П1: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика позитивна РЕ» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z », то керуюча дія $u_1 = w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w_2$;

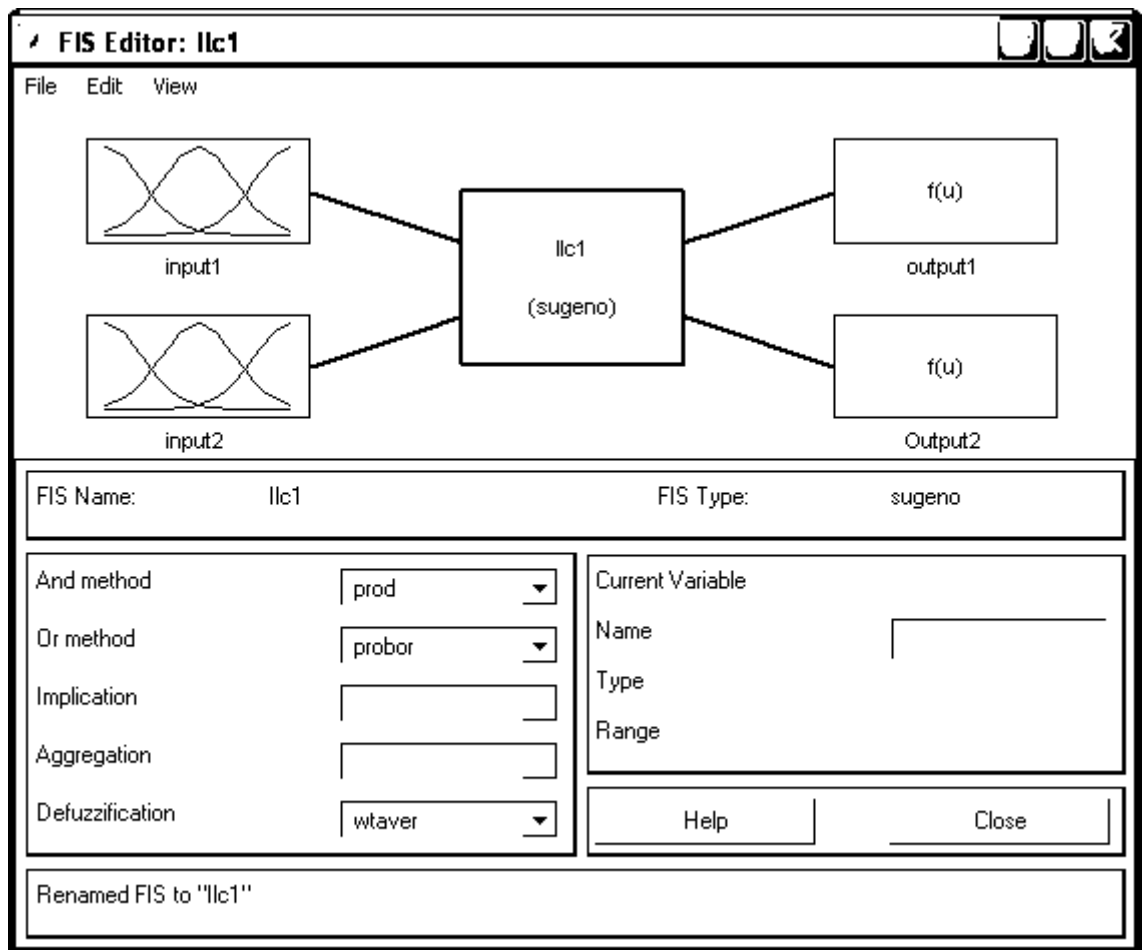


Рис. 3.6 – Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

П2: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика негативна NE» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_1 = -w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w_2$;

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

П4: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «велика позитивна PE», то керуюча дія $u_1 = w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w_2$;

П5: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «велика негативна NE», то керуюча дія $u_1 = -w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w_2$.

Відповідно вище представленим правилам складемо таблиці баз знань для НЛР різниці температур $\Delta \theta$.

Як видно з рисунку 3.6, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки регулювання (input2). Для змінної input1 задаємо три трикутні функції приналежності «trimf». Це проста функція приналежності і найбільш часто застосовується. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

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

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

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

$e_1 \backslash \Delta e_1$	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = 210$; $\Delta u_1 = 10$;	–
Z	$u_1 = 220$; $\Delta u_1 = 10$;	$u_1 = 0$; $\Delta u_1 = 0$;	$u_1 = -220$; $\Delta u_1 = -10$;
PE	–	$u_1 = -210$; $\Delta u_1 = -10$;	–

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.7 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 3.8.

Згідно з таблицею 1 бази правил функціонування регулятора, були прописані відповідні правила у вікні редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink. Це вікно з відповідними правилами зображено на рисунку 3.9.

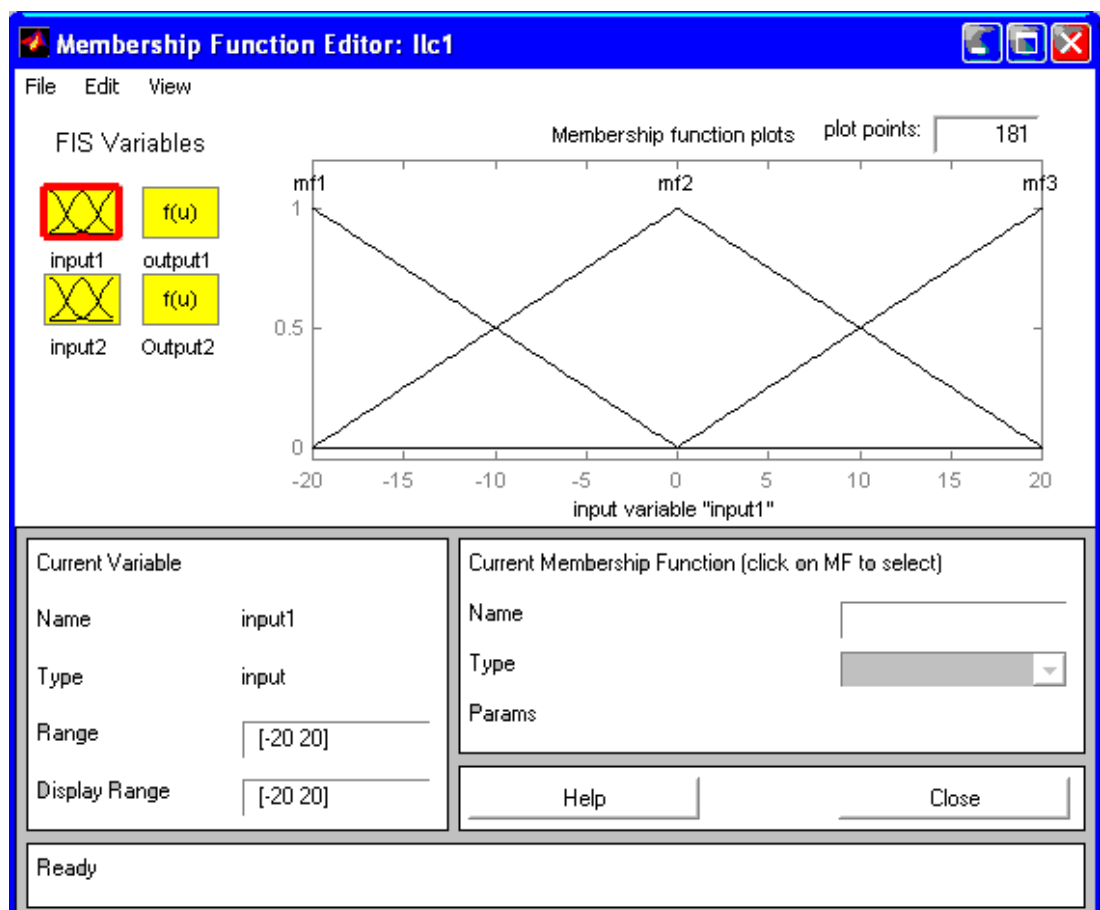


Рис. 3.7 – Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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

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

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

$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(x_0)), \alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(x_0))$ – значення ступенів істинності всіх висновків правил нечітких продукцій з використанням методу min-активізації.

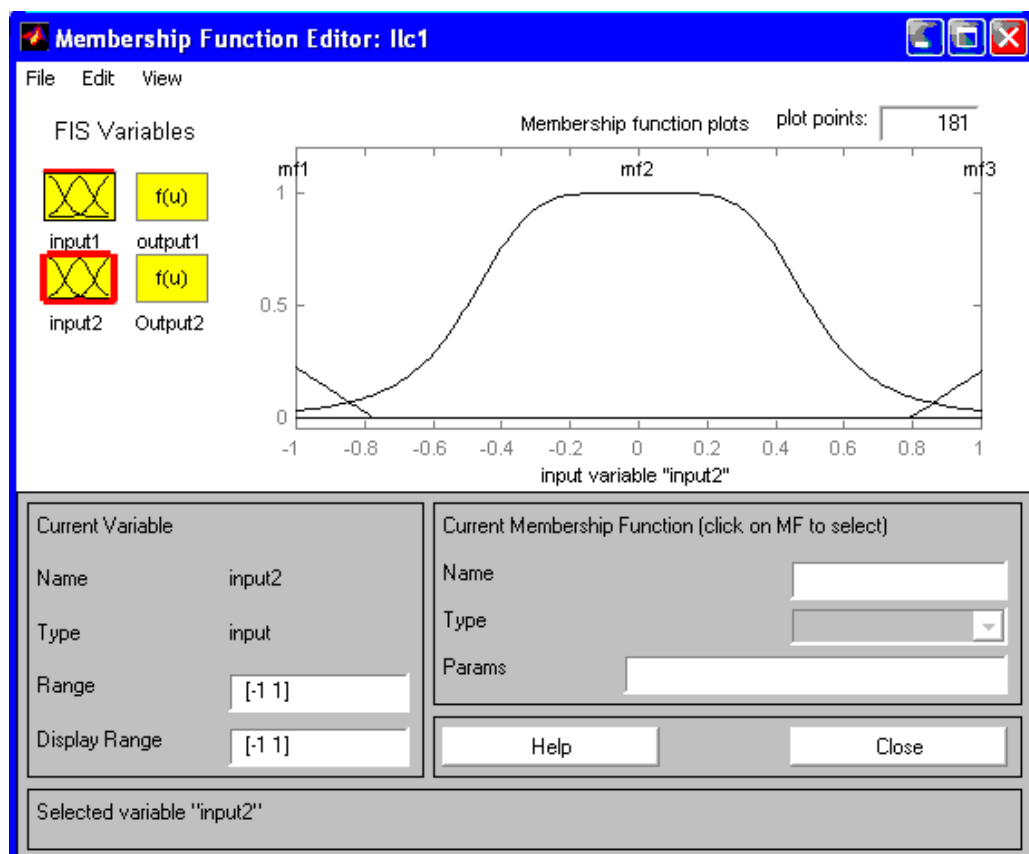


Рис. 3.8 – Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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

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

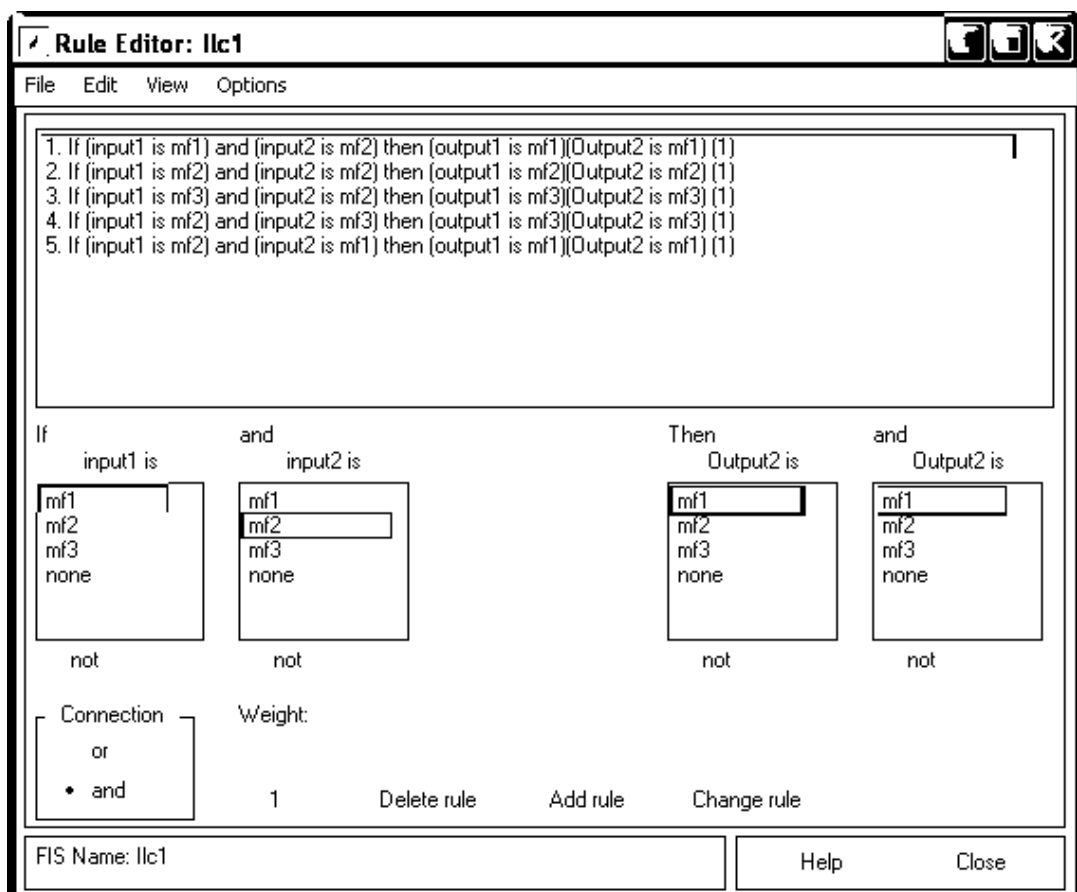


Рис. 3.9 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з нечітким регулятором, фрагмент якої представлений на рисунку 3.11. З рисунку 3.11 видно, що управляюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

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

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

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

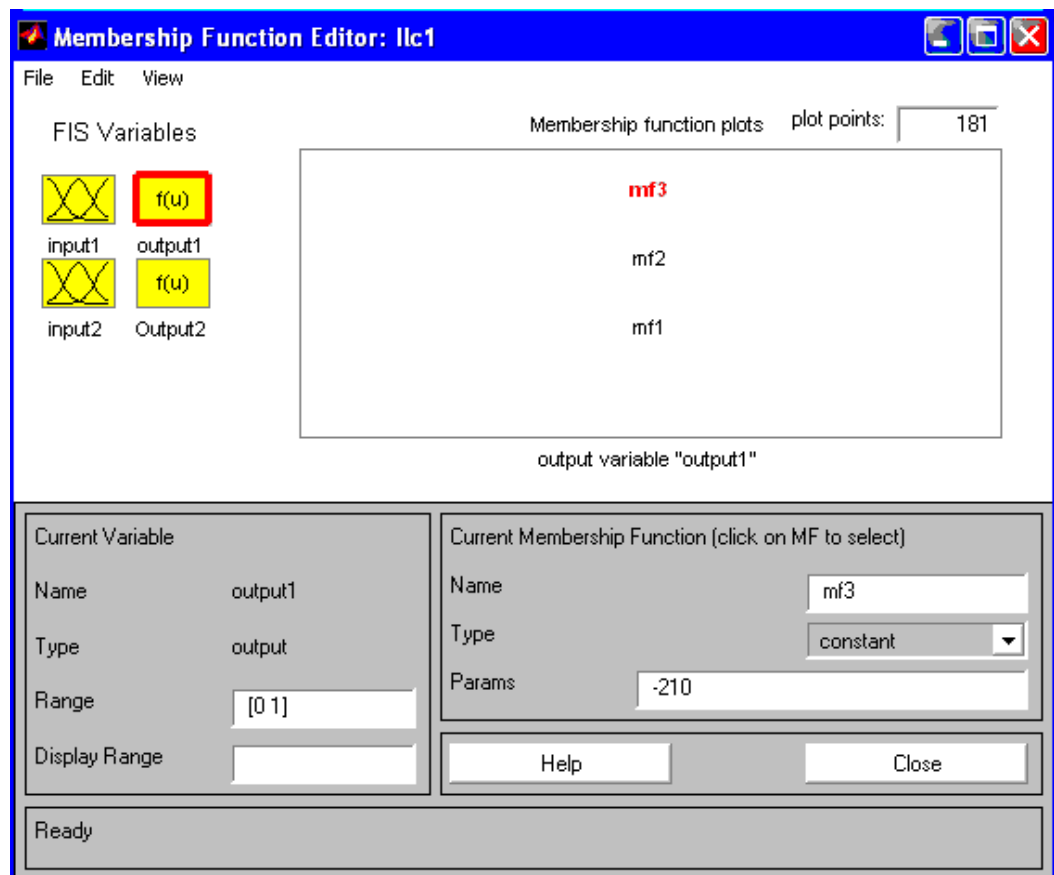


Рис. 3.10 – Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

Слід зазначити, що при синтезі нечіткого логічного регулятора «Fuzzy Logic Controller» всі функції приналежності к нечітким множинам та логічні

правила функціонування визначені на базі експертних даних. А потім скореговані при моделюванні методом «проб і помилок». Також логічні правила функціонування були визначені з урахуванням правил функціонування нечітких регуляторів, представлених у відомих наукових роботах, одних із перших з Fuzzy управління.

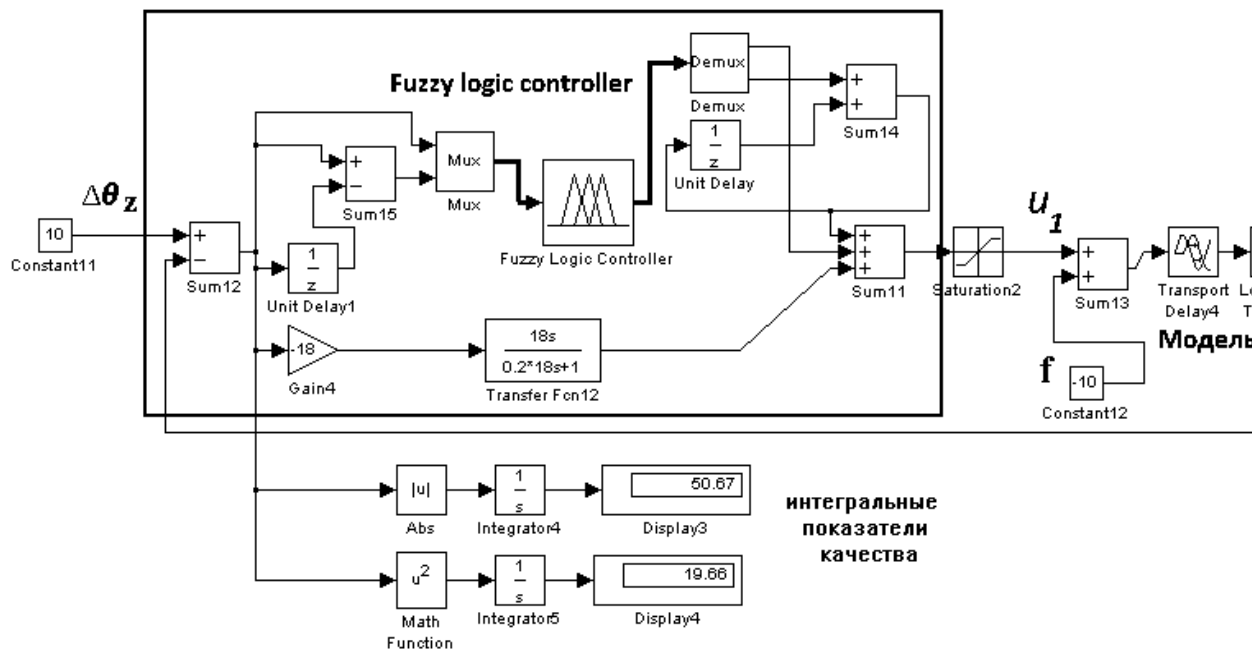


Рис. 3.11 – Фрагмент схеми моделювання САУ з нечітким логічним регулятором

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

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

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

Графіки перехідних процесів різні САУ зливаються в один. Це отримано завдяки корегуванню параметрів нечіткого регулятора, а також завдяки порівнянню функціонування САУ з нечітким регулятором і САУ з традиційним регулятором.

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

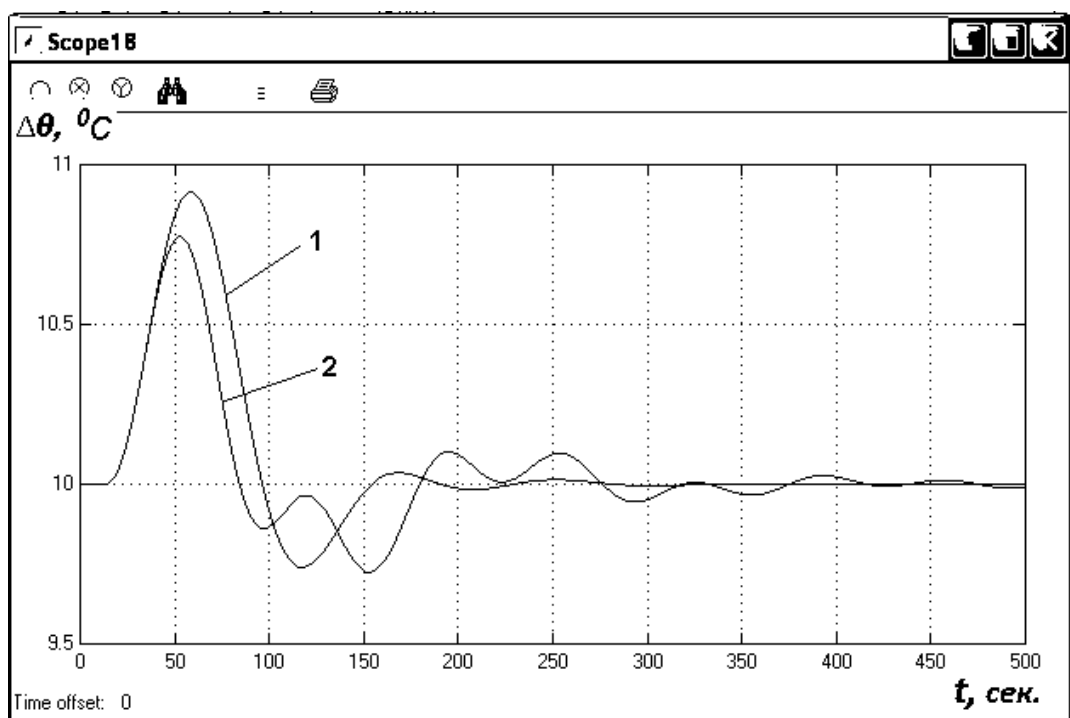


Рис. 3.12 – Графіки перехідних процесів, що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в неоптимізованій САУ з традиційним ПД – регулятором; графік 2 – перехідний процес в САУ з нечітким регулятором

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

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

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

.....

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

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

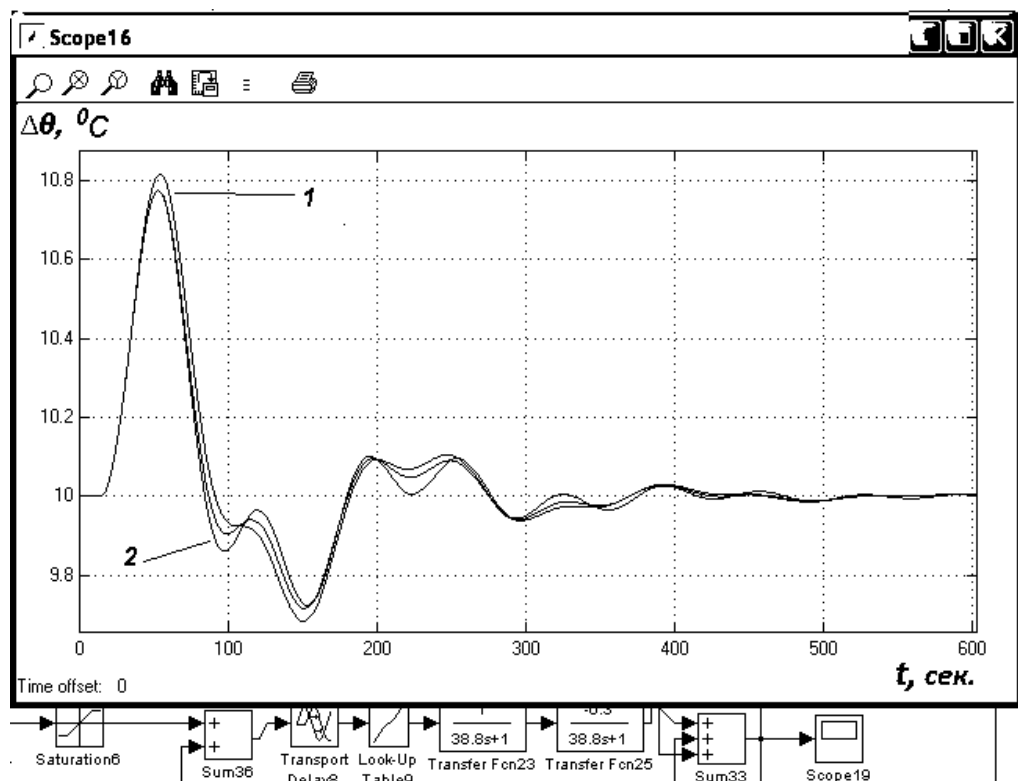


Рис. 3.13 – Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором з висновком Сугено -0; графік 2,3 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором який функціонує згідно з алгоритмом виведення Мамдані

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

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

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

$$\alpha_1 = A1(x_0) \wedge B1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A2(x_0) \wedge B2(y_0)$$

де через $\wedge$ позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

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

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

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

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

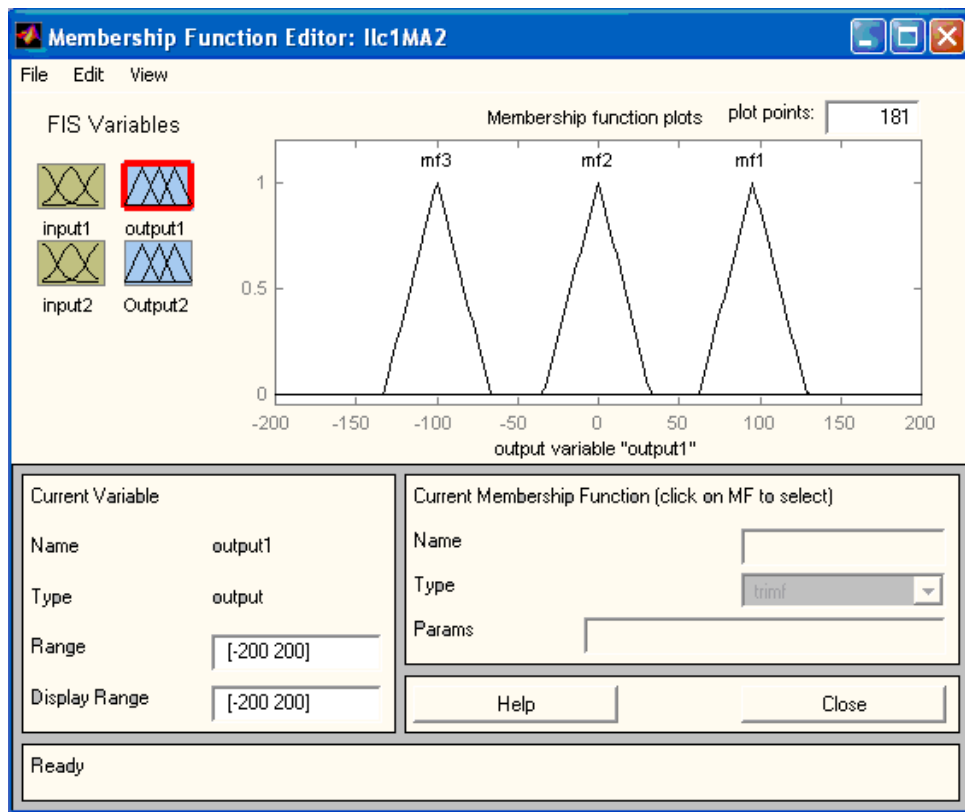


Рис. 3.13.1 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

Таким чином, для переходу від Сугено 0-го порядку до алгоритму Мамдані необхідно визначити вихідні функції приналежності $C1(z)$, $C2(z)$, $C3(z)$ замість відповідних значень $W2$, $-W2$, та $C1$, $C2$. На рисунках 3.13.1 та 3.13.2 представлені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам – «приріст управляючого впливі» великий (PE), «приріст управляючого впливі» приблизно нульовий (Z), «приріст управляючого впливі» від’ємний (NE).

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

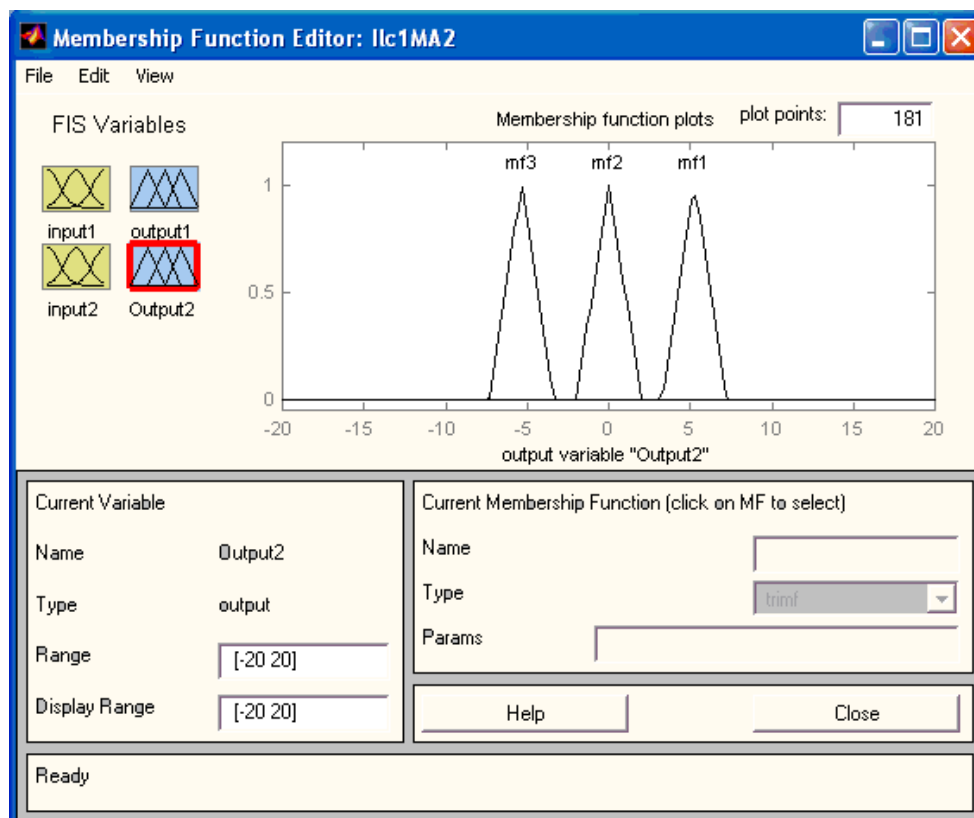


Рис. 3.13.2 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

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

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

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

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

3.5 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нейронного регулятора

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

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

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

Просто так подавати виважену суму на вихід досить безглуздо. Нейроелемент повинен якось обробити її і сформувати адекватний вихідний

сигнал. Саме для цих цілей і використовують функцію активації. Вона перетворює зважену суму в якесь число, яке і є виходом нейрона.

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятора визначає приріст управляючої дія як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейронрегулятора необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку буде використано гіперболічну тангенціальну функцію (tansig). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі управління. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.15.

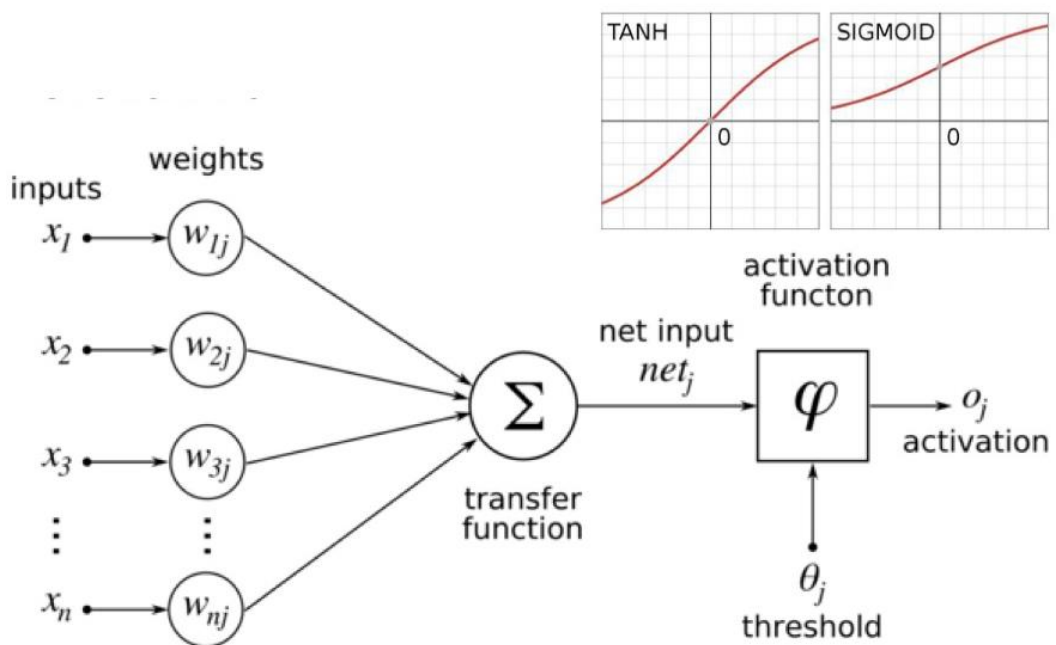


Рис. 3.14 – Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

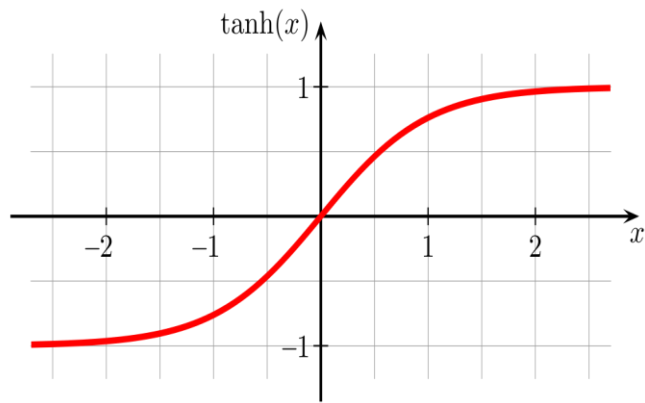


Рис. 3.15 – Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

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

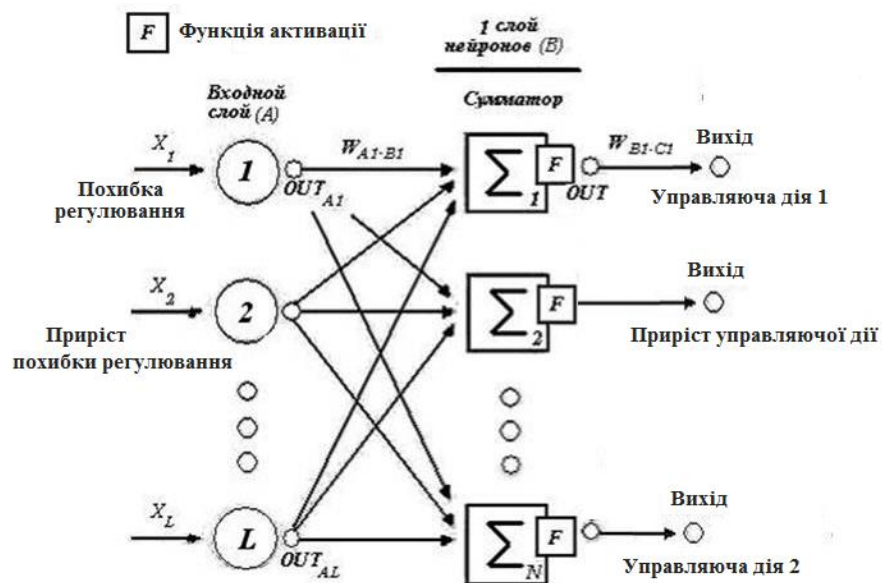


Рис. 3.16 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

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

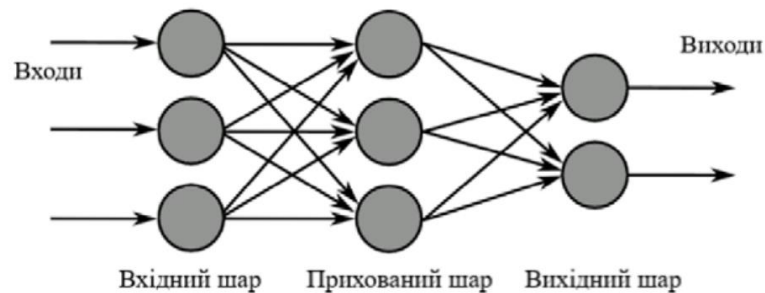


Рис. 3.17 – Багатошарова нейронна мережа

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

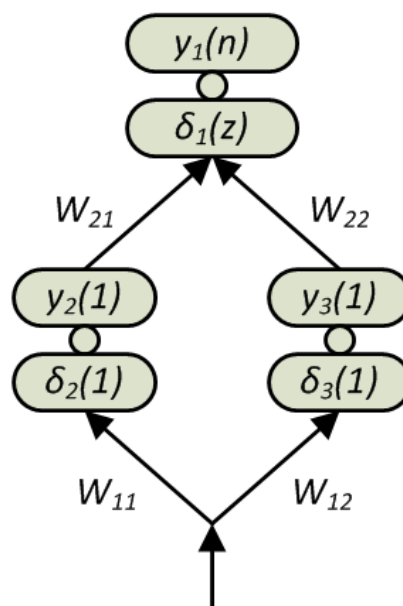


Рис. 3.18 – Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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

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

Таблиця 3.2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	l	u	Δu
1	-20	210	10
2	-10	105	5
3	-5	52	2,4
4	0	0	0
5	5	-52,5	-2,5
6	10	-105	-5
7	20	-210	-10

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, представленій на рисунку 3.19.

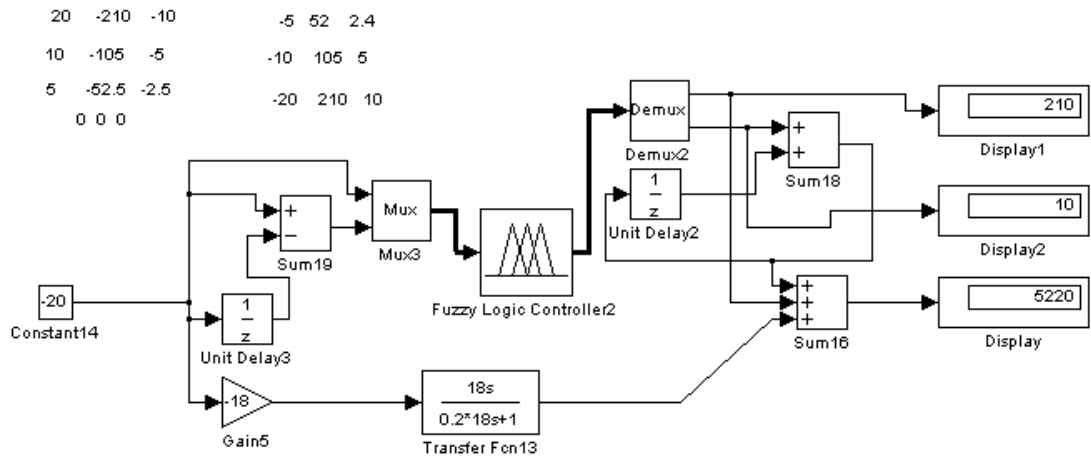


Рисунок. 3.19 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

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

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

```

» P=[-20 -10 -5  0 5 10 20];
» t=[0.210 0.105 0.052 0 -0.052 -0.105 -0.210];
» net=newff([-20 20], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=50;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/50, MSE 0.44434/0, Gradient 4.07718/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/50, MSE 3.12254e-006/0, Gradient 0.000284746/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/50, MSE 1.62995e-006/0, Gradient 0.000107386/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

    0.2100    0.1052    0.0500    0.0000   -0.0507   -0.1031   -0.2115

» a=sim(net, P)

a =

    0.2100    0.1052    0.0500    0.0000   -0.0507   -0.1031   -0.2115

» gensim(net)
» |

```

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

```

0.1033    0.0484    0.0222   -0.0012   -0.0262   -0.0505   -0.0967

» P=[-20 -10 -5  0 5 10 20];
» t=[0.1 0.05 0.024 0 -0.025 -0.05 -0.1];
» net=newff([-20 20], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.79676/0, Gradient 8.88205/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 2.14404e-005/0, Gradient 0.0061639/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 5.24633e-006/0, Gradient 0.000488287/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 3.11463e-006/0, Gradient 0.000171465/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 1.03115e-006/0, Gradient 0.00105162/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

0.0985    0.0500    0.0251   -0.0001   -0.0240   -0.0495   -0.1016

» gensim(net)
»

```

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

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

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

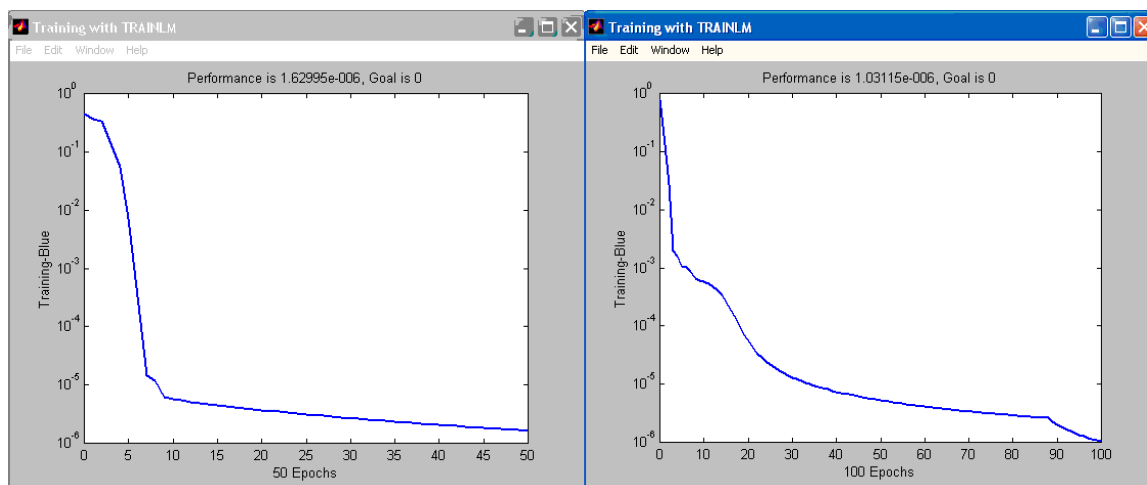


Рис. 3.22 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Фактичні значення:						
0.2100	0.1052	0.0500	0.0000	-0.0507	-0.1031	-0.2115
Бажані значення:						
0.210	0.105	0.052	0	-0.052	-0.105	-0.210

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

Фактичні значення:						
0.0985	0.0500	0.0251	-0.0001	-0.0240	-0.0495	-0.1016
Бажані значення:						
0.1	0.05	0.024	0	-0.025	-0.05	-0.1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 3.23:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.1031 - 0.105) * (0.1031) * (1 - 0.1031) = 0.00000085 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

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

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

Розрахунок помилок для II – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0251 - 0.024) * (0.0251) * (1 - 0.0251) = 0.0333 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

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

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

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

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

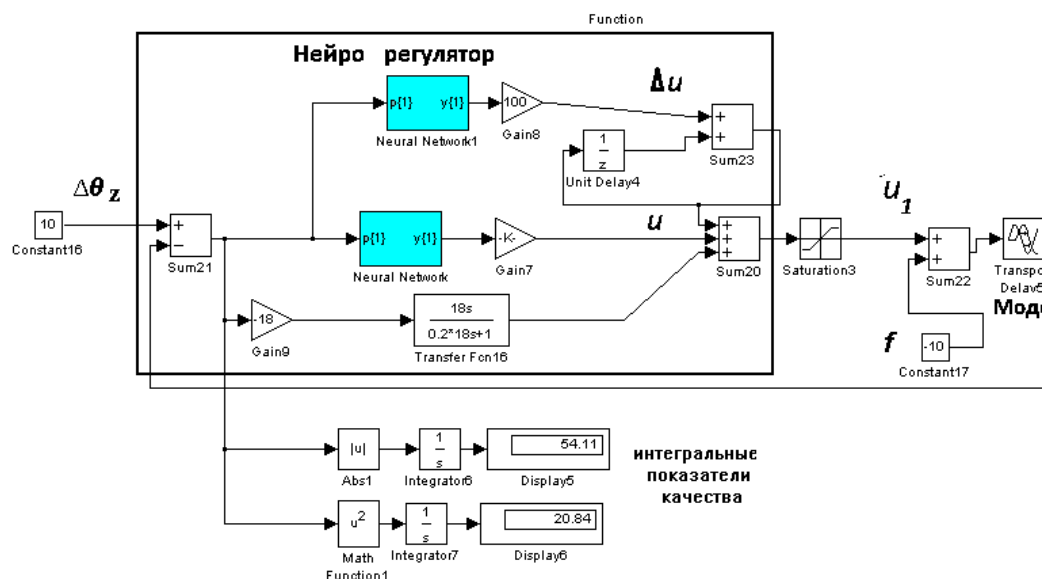


Рис. 3.25 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

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

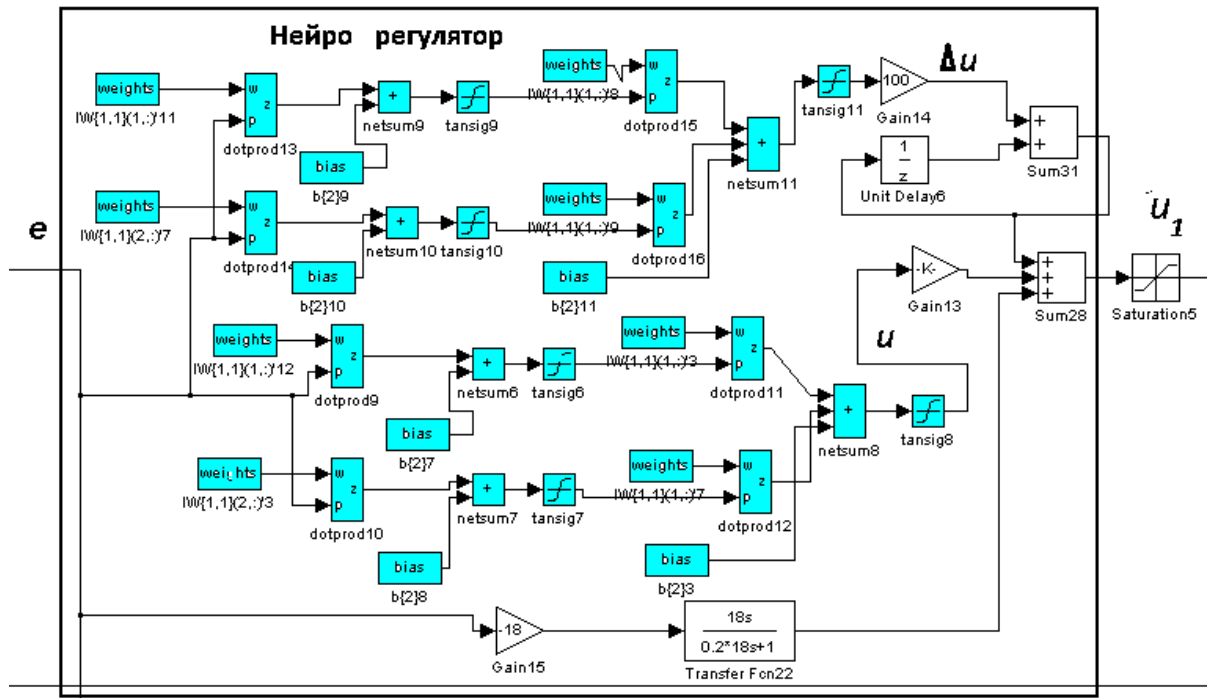


Рис. 3.26 – Схема моделювання нейронного регулятора

Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування складає 150 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПД регулятором, і 170 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому, що збурює, значно більше в САУ з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.27. Незважаючи на це регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має 8-м ваг між нейронних з'єднань, а саме параметри які можна оптимізувати для покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.28, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

Можливо зробити висновок, що виходячи з якості регулювання різних САУ необхідно нейрорегулятор оптимізувати при тих же умовах, як і

попередній традиційний ПІД-регулятор для визначення остаточного висновку про доцільність застосування різних САУ.

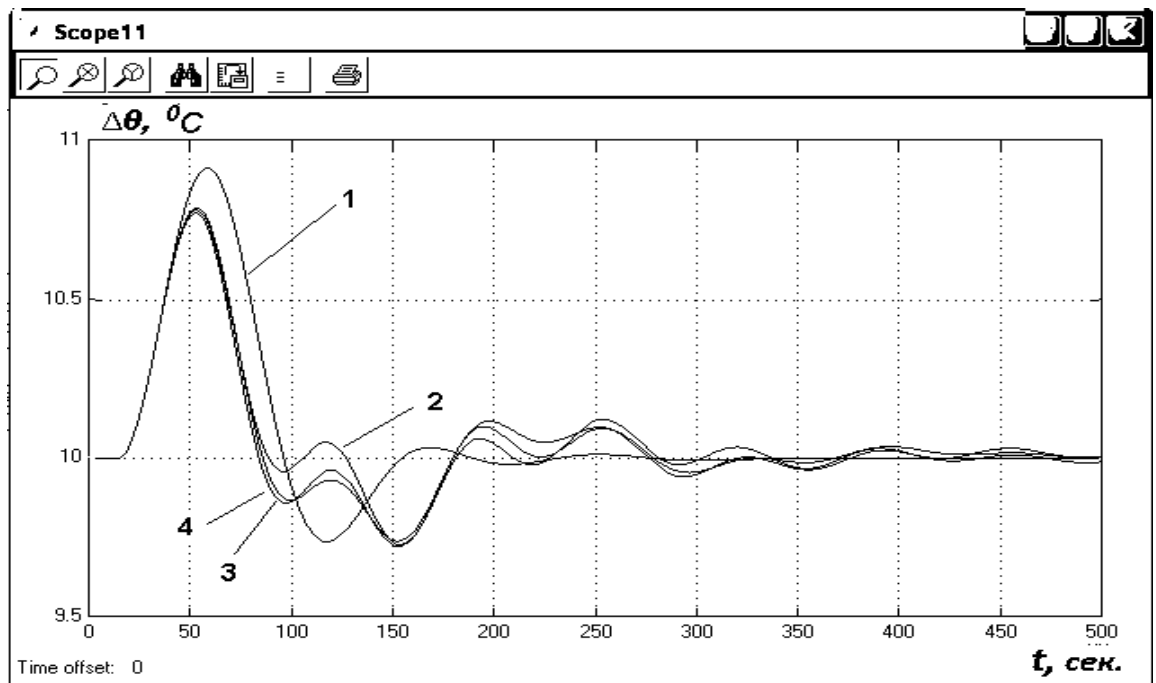


Рис. 3.27 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з традиційним ПІД-регулятором; графік 3 – перехідний процес у САУ з регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж

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

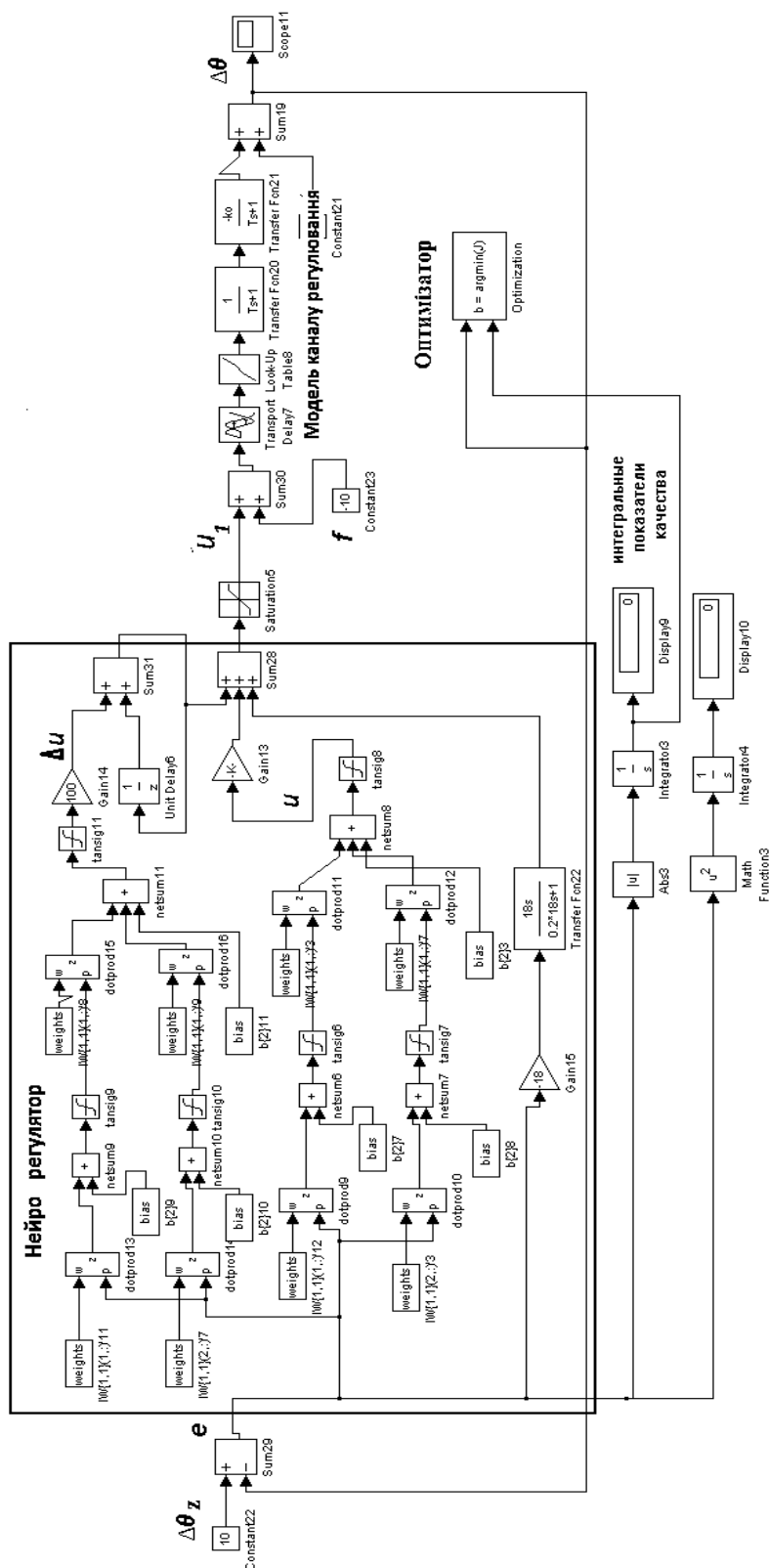


Рис. 3.28 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейронним регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB/Simulink для визначення оптимальних параметрів системи управління за умови нелінійності статичної характеристики каналу

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у

відповідному вікні результатів оптимізації, представленою рисунку 3.29. На рисунку 3.30 представлений результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації при визначеному інтегральному критерії якості роботи системи.

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

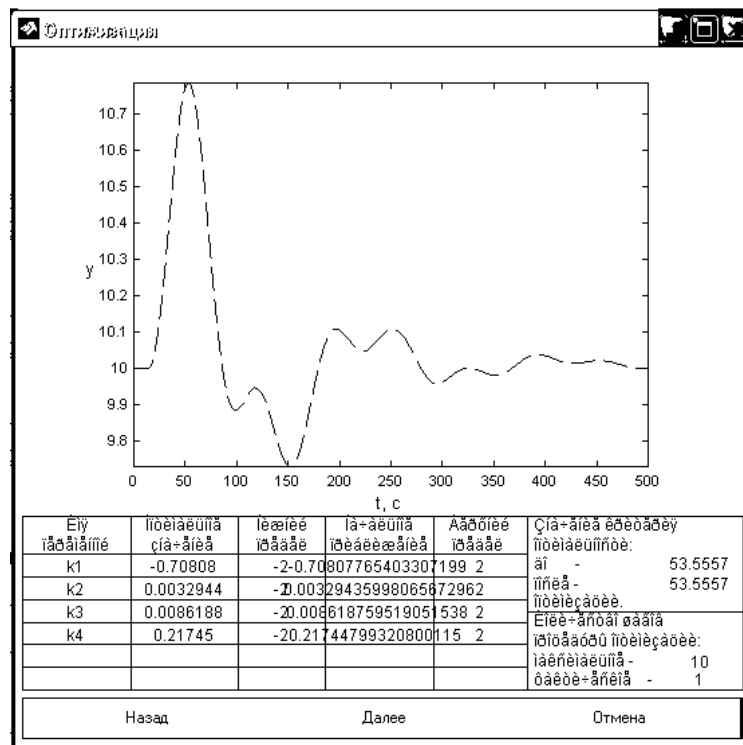


Рис. 3.29 – Вікно оптимізатора до початку оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

Результати параметричної оптимізації показують, що нейрорегулятор на відмінність від традиційного нечіткого регулятора, має велику можливість налаштування під обраний об'єкт з нелінійною статичною характеристикою каналів регулювання. Для визначення принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора необхідно визначити, чи не втрачає стійкість

САУ при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні $\pm 20\%$.

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

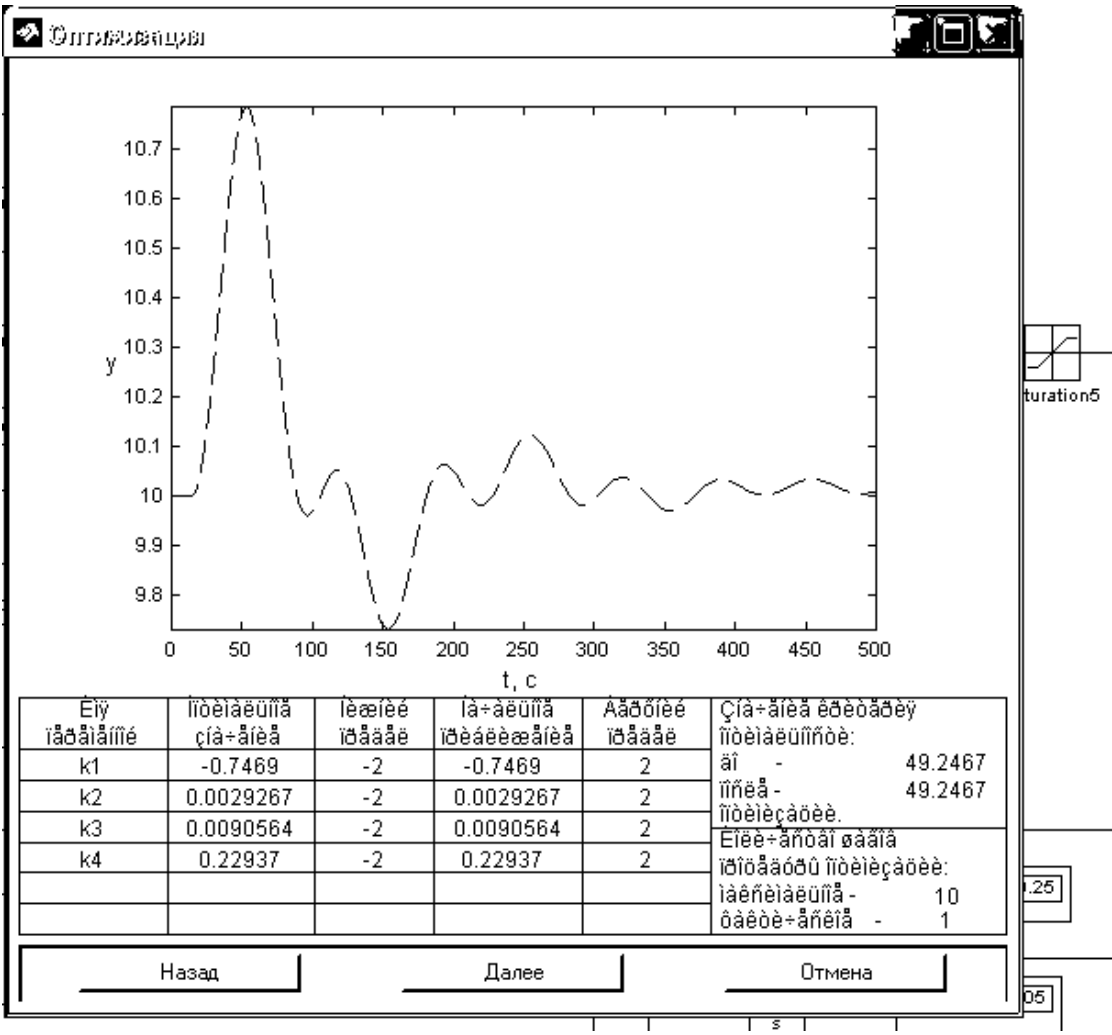


Рис. 3.30 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

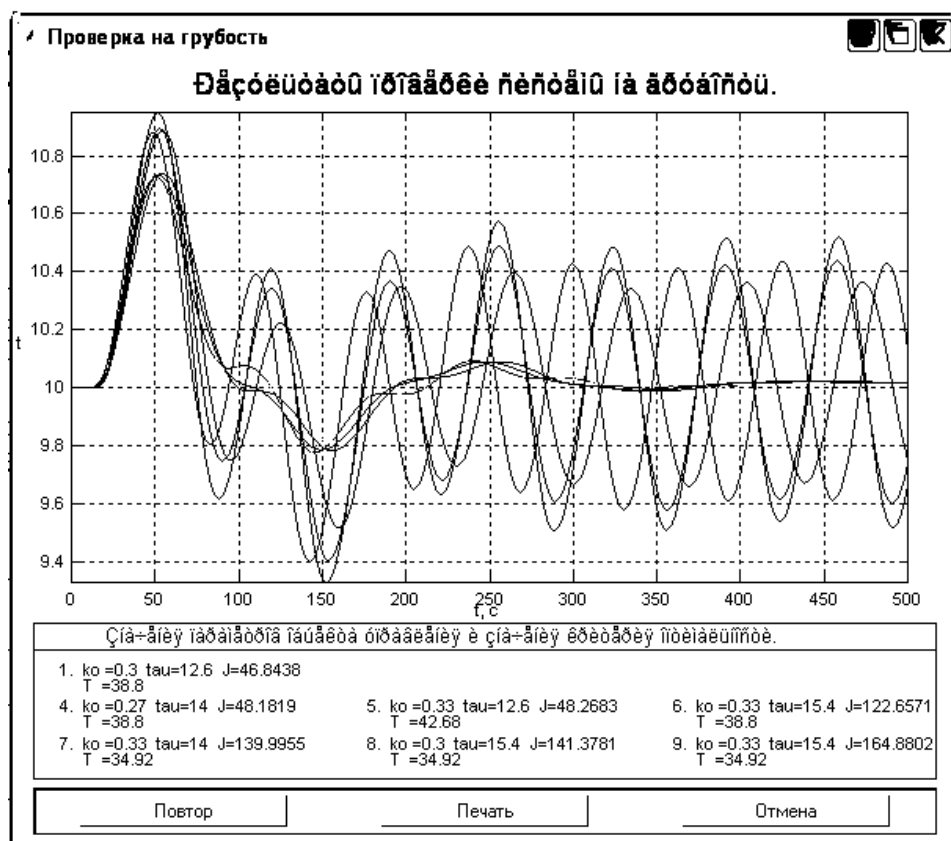


Рис. 3.30.1 – Результати перевірки САР з нейрорегулятором на грубість

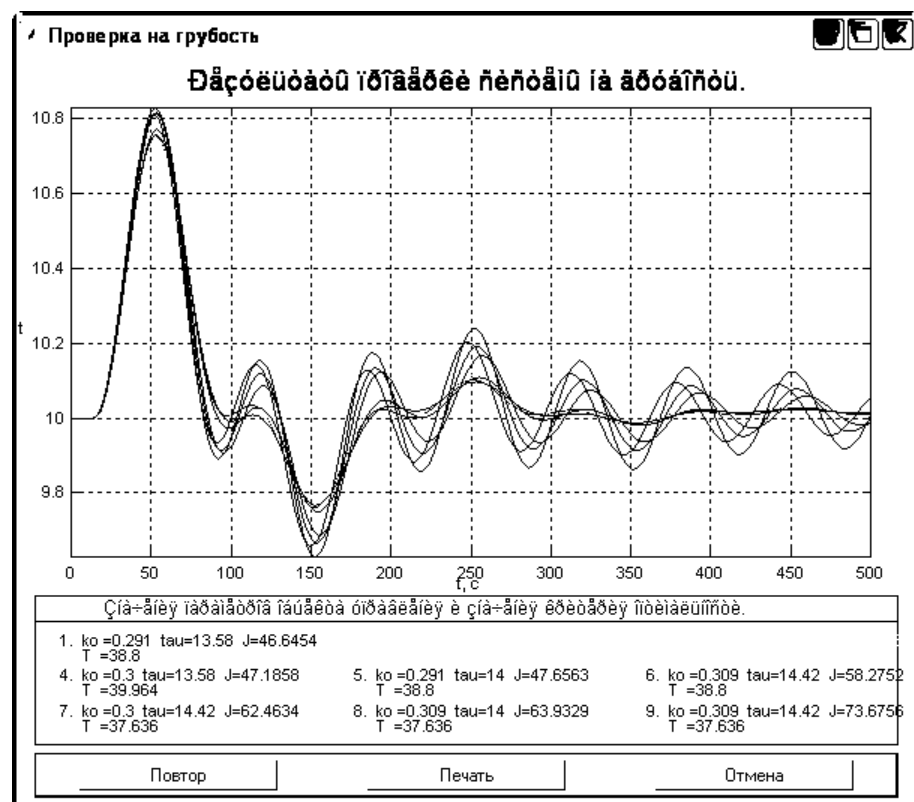


Рис. 3.30.2 – Результати перевірки САР з нейрорегулятором на грубість

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

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

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

Також на основі аналізатора імовірнісних характеристик, що був вбудований у середовище MATLAB\Simulink, була визначена якість регулювання різних САУ при випадкових впливах що збурюють. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання різних САУ при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.31, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.31 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням САУ з традиційним ПІД-регулятором і САУ з нейронним регулятором практично функціонують ідентично, а САУ з нечітким

регулятором незначно гірше. В кінцевому випадку показники функціонування різних САУ за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.

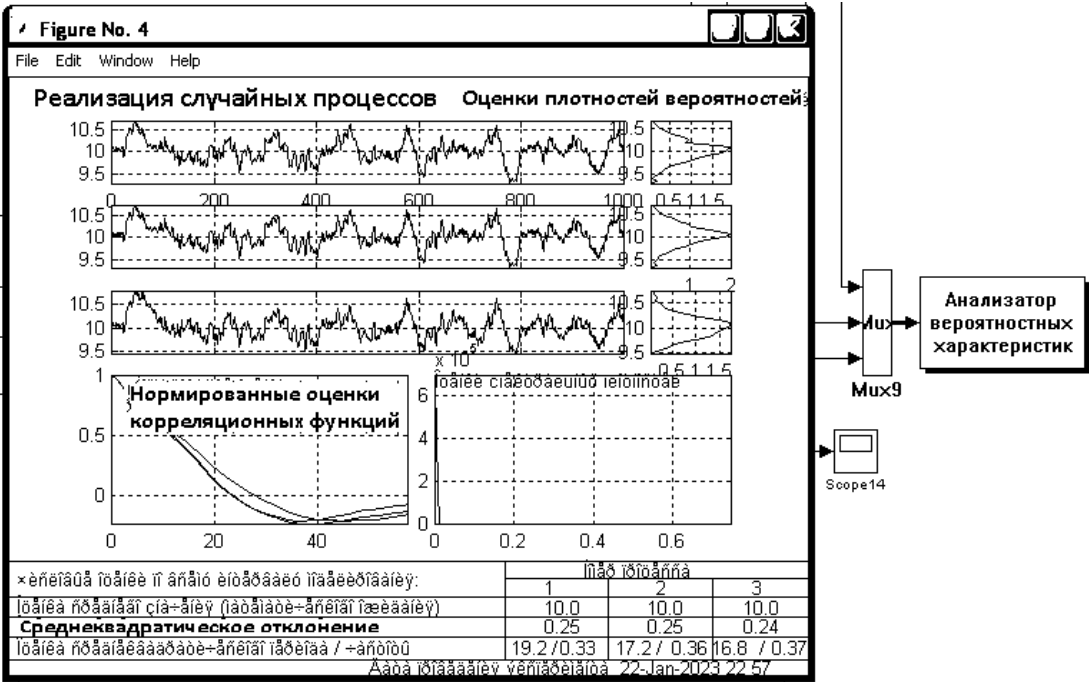


Рис. 3.31 – Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

Таблица 3.3 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПІД-регулятором	САУ з нечітким регулятором	САУ з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈250	≈450	≈450
Максимальне динамічне відхилення	≈10,9	≈10.8	≈10.7
Інтегральний показник	49,8	53	49,3
Математичне очікування	10	10	10
Середньоквадратичне відхилення	0,25	0,25	0,24

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

3.7 Висновки за розділом

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

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

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 49,3 при САУ з нейрорегулятором і 49,9 при САУ з традиційним ПД-регулятором.

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

РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

4.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом охолодження гранульованих комбікормів і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок

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

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

№ пп	Назва параметра	Умовне позначення	Вид сигналу A/D	Тип сигналу I/O	Діапазон сигналу на вході/виході контролера	Позначення на схемі
1	Температура гранул на вході в охолоджувальну колону	Tg1	A	I	(4-20 мА)	AI1
2	Рівень гранул у колоні	L	A	I	(4-20 мА)	AI2
3	Температура навколишнього середовища	Toc	A	I	(4-20 мА)	AI3
4	Температура гранул на виході з охолоджувальної колонки	Tg2	A	I	(4-20 мА)	AI4
5	Зміна продуктивності живильника випуску гранул	U1	A	O	(4-20 мА)	AO1
6	Зміна продуктивності вентилятору	U2	A	O	(4-20 мА)	AO2

7	Сигнал 33 від пускача двигуна живильника M1	M1_KM_S	D	I	«сухий контакт»	DI1
8	Сигнал 33 від пускача двигуна вентилятору M2	M2_KM_S	D	I	«сухий контакт»	DI2
9	Сигнал 33 від пускача двигуна живильника M3	M3_KM_S	D	I	«сухий контакт»	DI3
10	Сигнал автомату захисту двигуна вентилятору	M2_SF_S	D	I	«сухий контакт»	DI4
11	Сигнал автомату захисту двигуна M1	M1_SF_S	D	I	«сухий контакт»	DI5
12	Сигнал автомату захисту двигуна M3	M1_SF_S	D	I	«сухий контакт»	DI6
13	Сигнал кнопки пуска	SB_pusk	D	I	«сухий контакт»	DI7
14	Сигнал кнопки стоп	SB_stop	D	I	«сухий контакт»	DI8
15	Сигнал керування двигуном вентилятору	M2_Control	D	O	«відкритий колектор»	DO1
16	Сигнал керування двигуном живильника M1	M1_Control	D	O	«відкритий колектор»	DO2
17	Сигнал керування двигуном живильника M3	M1_Control	D	O	«відкритий колектор»	DO3

18	Сигнал управління звуковою сигналізацією	НА	D	O	«відкритий колектор»	DO4
----	--	----	---	---	----------------------	-----

Кількість каналів вводу\виводу:

AI – 4 AO – 2, DI – 8, DO – 4.

Систему керування було розроблено на базі контролера S7-300 фірми Siemens. Враховуючи, що центральний процесор і модулі системи мають виконання IP20, доцільно розмістити їх у настінній шафі зі ступенем захисту не менш IP54 в окремому від технологічного устаткування приміщенні.

На наступних рисунках наведені рекомендації з монтажу Simatic S7-300 у шафі з урахуванням зазорів, можливості розсіювання тепла, а також схема заземлення.

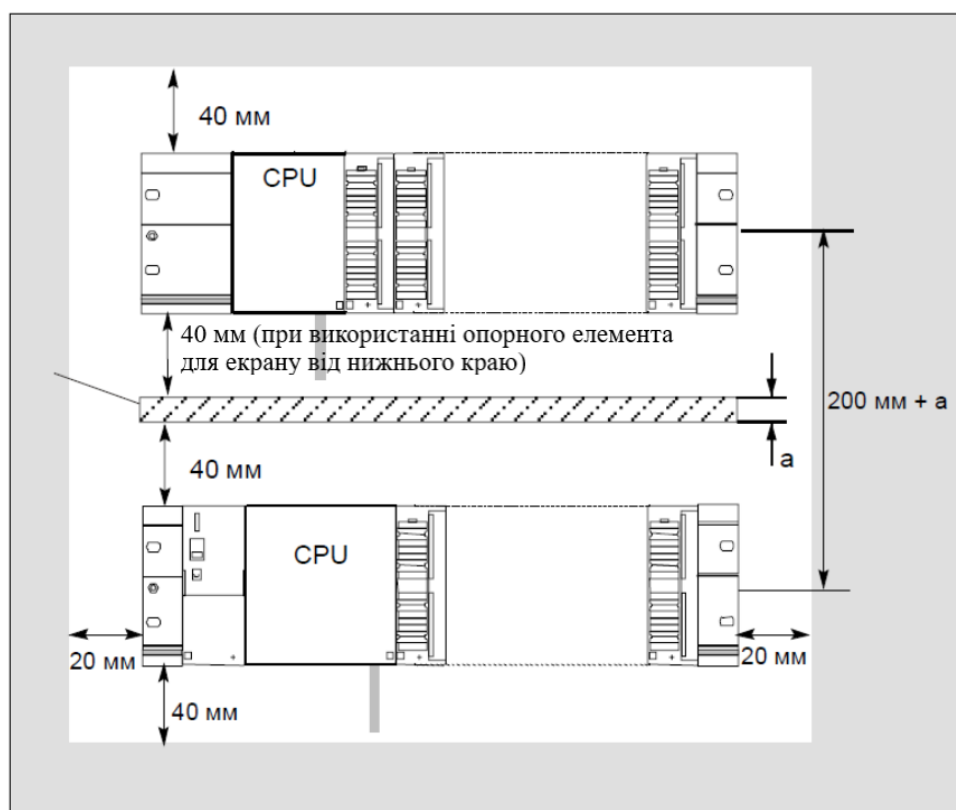


Рис. 4.1 – Зазори при встановленні S7-300 у шафі

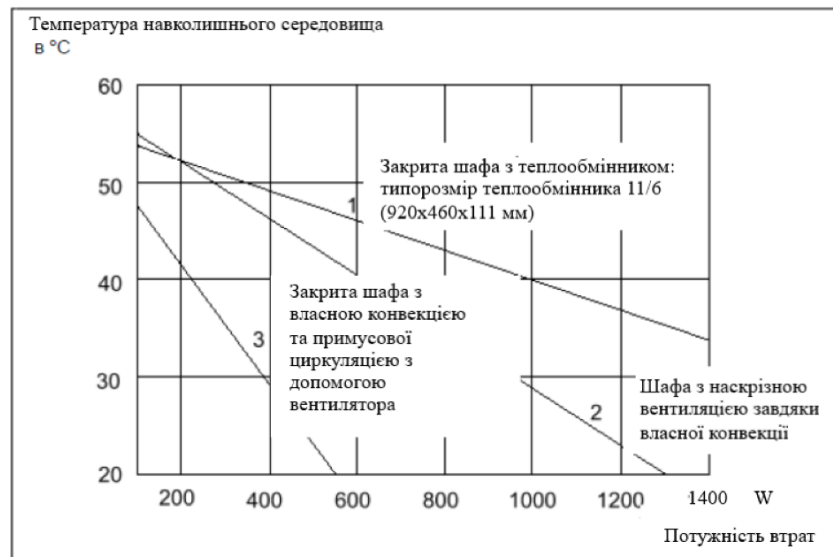


Рис. 4.2 – Діаграма припустимих потужностей розсіювання

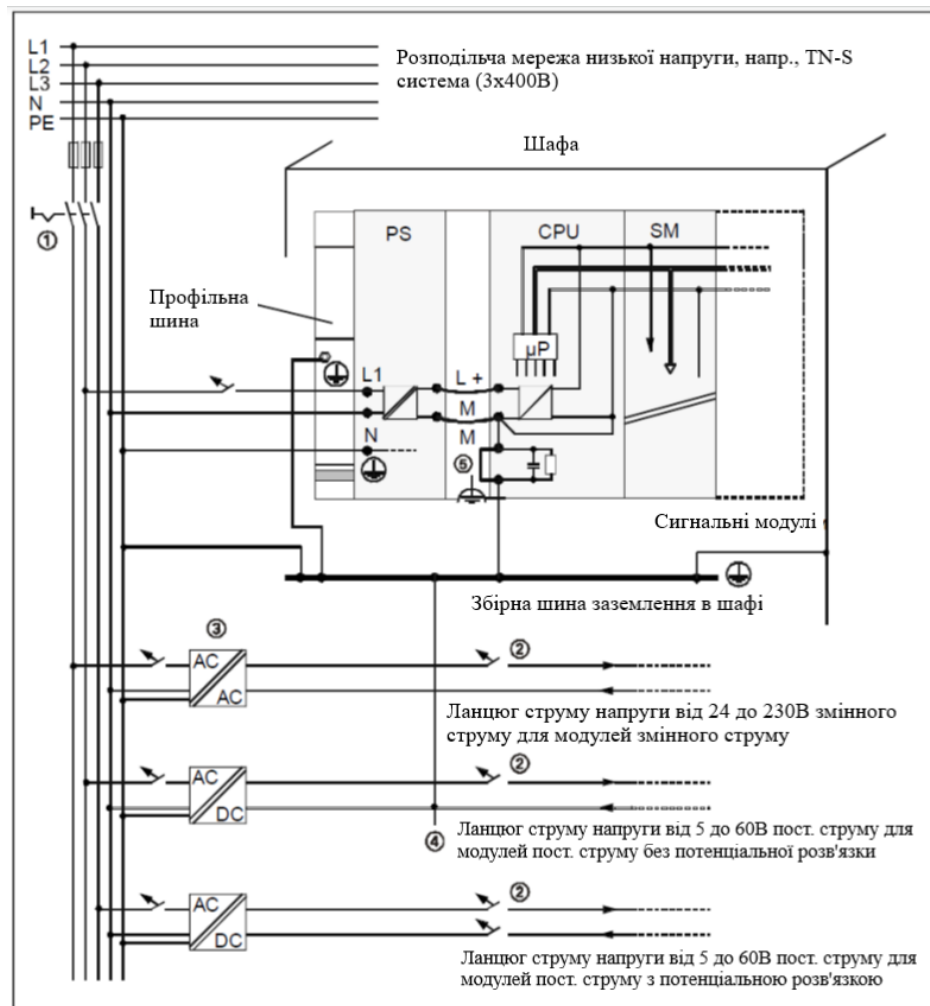


Рис. 4.3 – Схема заземлення в шафі

Оскільки приміщення опалювальне, то це дозволяє використовувати модулі звичайного виконання, а не з розширеним температурним діапазоном, які дорожче.

Враховуючи, що фірма Siemens випускає найбільш широку гаму устаткування з можливістю підключення по мережі PROFIBUS/MPI, доцільно вибрати CPU із вбудованим портом PROFIBUS/MPI. Це дозволить при необхідності легко розширити функціональні можливості системи керування, зокрема, зв'язати її з іншими системами й з оператором, який працює в SCADA-Системі на панелі оператора.

Виходячи з сформованої таблиці з переліком входів-виходів системи керування та середньої складності алгоритмів керування технічну структуру системи управління розробимо на базі контролера Simatic S7-300. Для реалізації системи управління в модулях ПЗО контролера повинні бути передбачені: 4 аналогових входів, 2 аналогових виходи, 8 дискретних входів і 4 дискретних виходів. Виходячи з сформованої таблиці для реалізації системи керування скористаємося контролером CPU 313C-2DP з модулем ПЗО SM 334 – AI4/AO2.



Рис. 4.4 – Центральний процесор CPU 313C-2DP

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

- Мікропроцесор; 100-200 нс на виконання бінарної інструкції. Робоча пам'ять об'ємом 64 Кбайт, RAM (приблизно 20 К інструкцій);

для виконання завантаженої секції програми та зберігання оперативних даних.

- Мікрокарта пам'яті (до 8 Мбайт), яка у ролі завантажувальної пам'яті, а також збереження архіву проекту (з коментарями і таблицею символів), архівування даних і управління рецептами.
- Гнучкі можливості розширення; підключення до 31 модуля S7-300 (4-рядна конфігурація).
- Інтерфейс MPI; дозволяє встановлювати одночасно до 8 з'єднань з програмованими контролерами S7-300/400, програматорами, комп'ютерами та панелями операторів.
- Набір вбудованих входів і виходів; 16 дискретних входів = 24В і 16 дискретних виходів = 24В/0.5А .

Табл. 4.2 – Технічні дані входів/виходів CPU

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

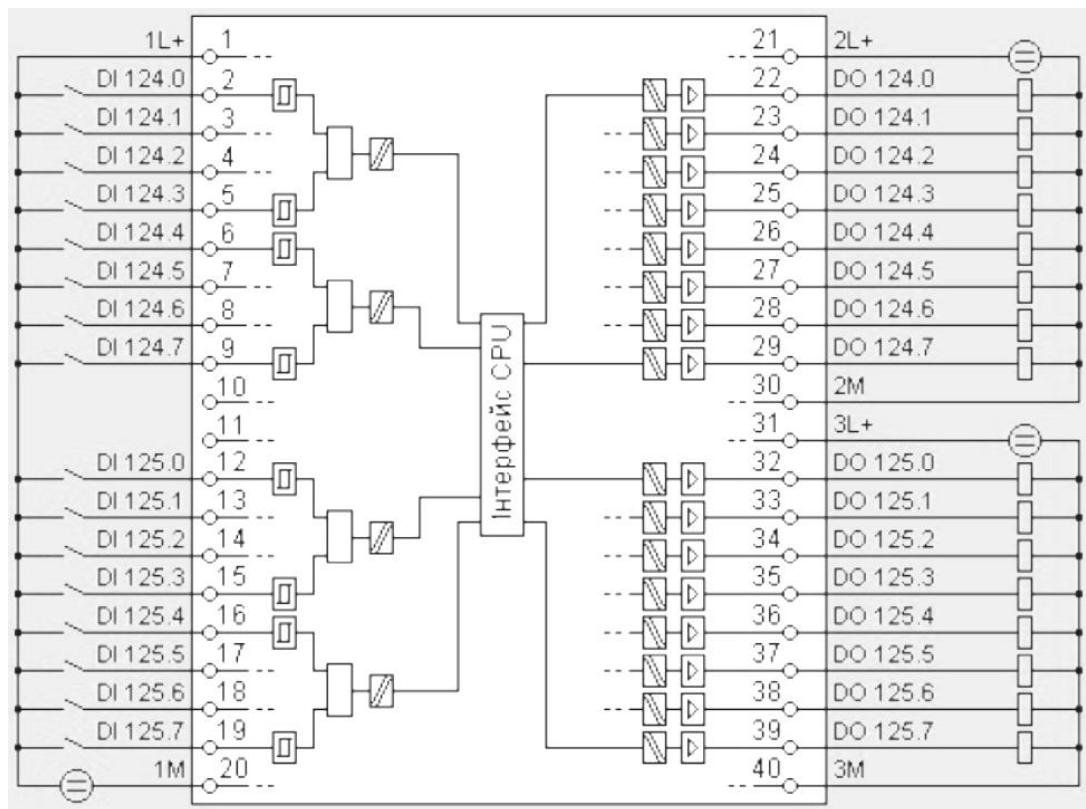


Рис. 4.5 – Схеми зовнішніх підключень CPU 313C-2DP

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

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

Схеми захисту для котушок, що обтікають постійним струмом

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



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

- ① з діодом
- ② зі стабілітроном

Схема з діодом/стабілітроном має наступні властивості:

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

Схема для котушок, що обтікають змінним струмом

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



Рис. - Схема захисту для котушок що обтікають змінним струмом

- ① з варистором
- ② з RC-ланцюгом

Схема з варистором має наступні властивості:

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

Схема з RC-ланцюгом має наступні властивості:

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

Рис. 4.6 – Рекомендації Siemens при підключенні дискретних виходів

Для вводу/виводу аналогових сигналів був обраний аналоговий модуль вводу/виводу SM 334; AI 4 / AO 2 x 8 Bit (6ES7 334-0CE01-0AA0)

Номер для замовлення: 6ES7 334-0CE01-0AA0

Характеристики:

- 4 входи, 2 виходи;

- дозвіл вимірюваного значення 8 бітів + знак;
- обраний вид виміру: - напруга; - струм;
- гальванічна розв'язка між каналами и ланцюгами живлення електроніки.

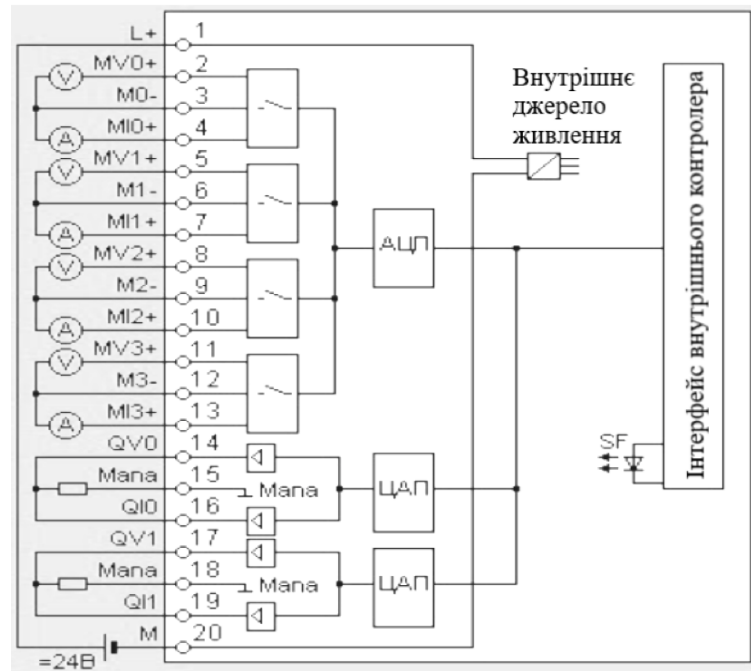


Рис. 4.7 – Схема підключення і принципова схема SM 334; AI 4 / AO 2 x 8 Bit

У таблицях нижче представлені технічні дані модуля та огляд параметрів, що налаштовуються чи встановлені за замовчуванням.

Табл. 4.3 – Технічні дані для вибору датчиків та виконавчих пристроїв

Данні для вибору датчика	
Вхідний діапазон (номінальні значення)/ вхідний опір	від 0 до 10 В/100 кОм від 0 до 20 мА/50 Ом
• Напруга • Струм	
Допустима вхідна напруга для потенційного входу (руйнівальна межа)	макс. 20В довго; 75В протягом макс. 1с (коефіцієнт заповнення 1:20)
Допустимий вхідний струм для струмового входу (руйнівальна межа)	40 мА
Підключення датчиків сигналу	за допомогою 20-контактного фронтштекера можливо
• для виміру напруги • для виміру струму як 2-проводних перетворювачів як 4- проводних перетворювачів	можливо з зовнішнім джерелом живлення можливо
Данні для вибору виконавчого пристрою	
Вихідні діапазони (номінальні значення)	від 0 до 10 В від 0 до 20 мА
• Напруга • Струм	

Табл. 4.4 – Діапазони аналогових сигналів та їх цифрове представлення в CPU

Система		Діапазон виміру напруги		
десятирічні	16-річні	від 1 до 5 В	від 0 до 10 В	
32767	7FFF	5,741 В	11,852 В	Переповнення
32512	7F00			
32511	7EFF	5,704 В	11,759 В	Перенавантаження
27649	6C01			
27648	6C00	5 В	10 В	Номінальний діапазон
20736	5100	4 В	7,5 В	
1	1	1 В + 144,7 мкВ	0 В + 361,7 мкВ	
0	0	1 В	0 В	
-1	FFFF			Від'ємне перенавантаження
-4864	ED00	0,296 В		
-4865	ECFF			Від'ємне переповнення
-32768	8000			

Розроблена схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом охолодження гранульованих комбікормів представлена на рис. 4.8.

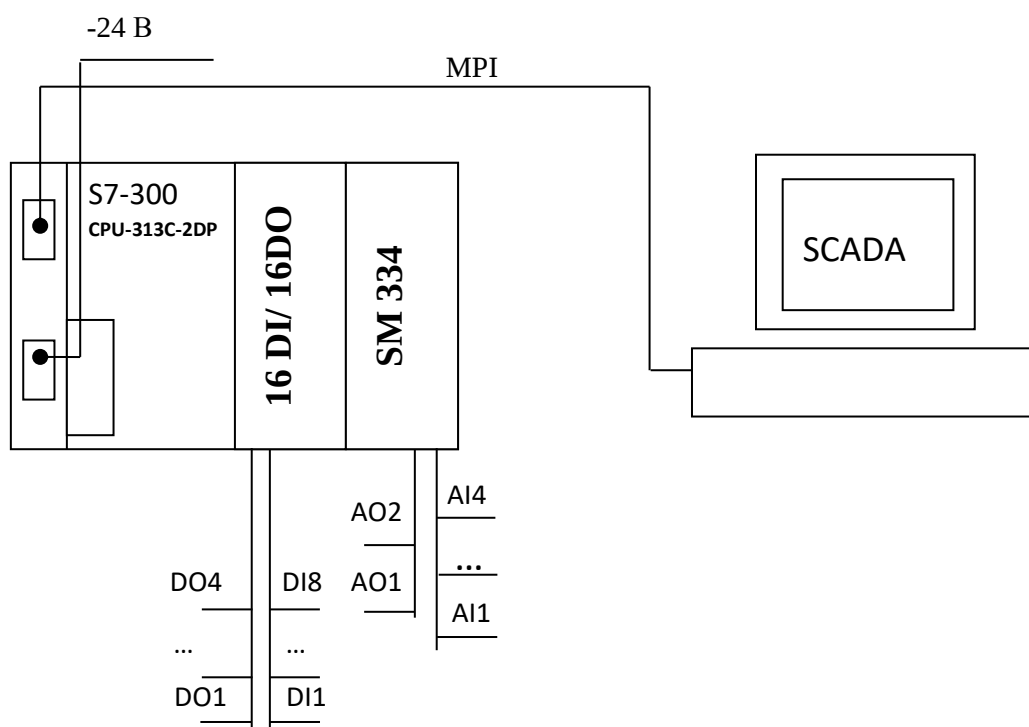


Рис. 4.8 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом охолодження гранульованих комбікормів

При конфігуруванні контролера і модулів ПЗО у середовищі Simatic Manager Step7 створюємо проект і додаємо до його складу станцію контролера S7-300. У програмі «Hardware» проводимо конфігурування обраного контролера його дискретних входів/виходів і модуля вводу/виведення аналогових сигналів SM 334. Загальний вид вікна програми «Hardware» з обраним контролером і модулями ПЗО наведено на рисунку 4.9. При конфігуруванні модулі обираються з каталогу елементів, що входить в програму «Hardware».

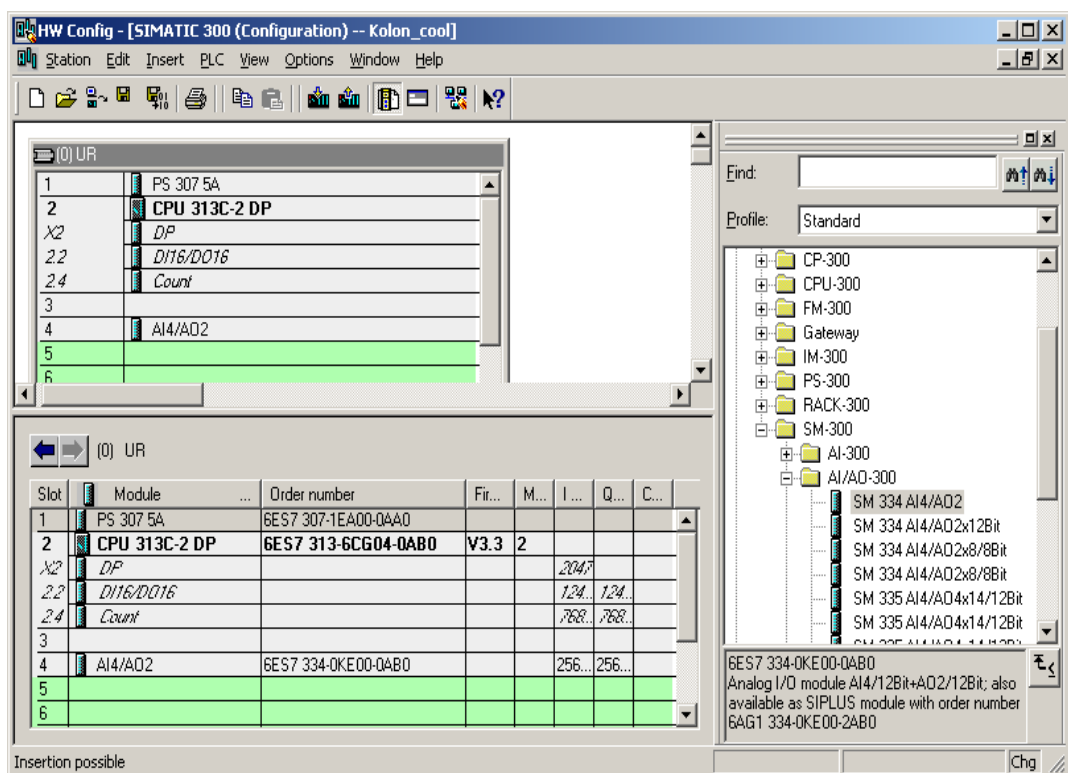


Рис. 4.9 – Загальний вид вікна програми «Hardware»

В розділах 2 і 3 даної роботи існуюча система керування була доповнена алгоритмами підвищення динамічної точності контуру регулювання різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища. Було додатково реалізовано інваріантність відносно температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки. Інтегровані алгоритми не потребують істотного збільшення обчислюваних ресурсів. Введення поточного значення

температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки через аналоговий вхід вже передбачено у контролері. Тому технічну структуру системи керування змінювати не потрібно і можна залишити в існуючому виді.

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

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені у середовищі Simulink системи Matlab алгоритми керування може реалізовуватись безпосередньо у середовищі Simatic Step 7 з використанням стандартних мов програмування контролерів. Наприклад мовами STL і SCL. Для цього потрібно розроблені у системі Matlab алгоритми керування перевести у цифрову форму, отримати різницеві рівняння та привести до виду придатного для програмування, а потім написати відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загалі такий підхід потребує багато часу і та знання принципів та особливостей реалізації цифрових алгоритмів. Альтернативою цьому є варіант конвертації отриманих алгоритмів з середовища Simulink системи Matlab у потрібну середу програмування контролерів. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.

Для програмної реалізації розроблених алгоритмів будемо використовувати пакет Simulink PLC Coder з його бібліотекою функціональних блоків PLCLib. Для цього з використанням блоків бібліотеки PLCLib проведемо цифрову реалізацію алгоритмів керування у моделі Simulink. Отримана модель з алгоритмами підготовленими до конвертації наведена на рис. 4.10.

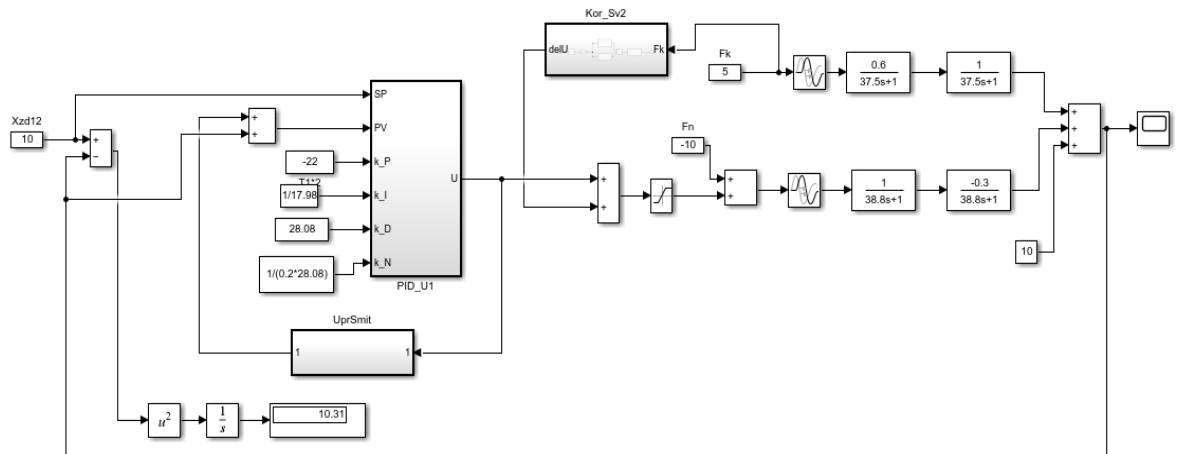


Рис. 4.10 – Схема моделювання САК процесом охолодження гранульованих комбікормів з цифровими алгоритмами керування

На рис. 4.11 – 4.13 наведені схеми моделювання ПІД регулятора та ланок коригуючих зв'язків.

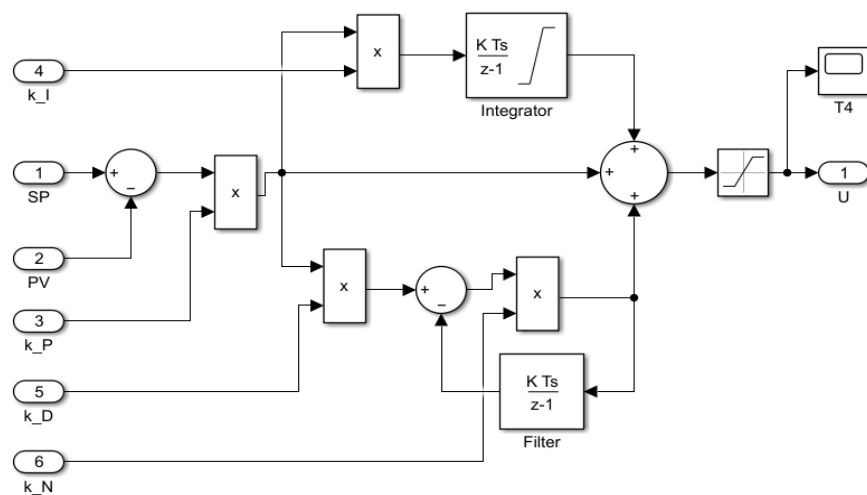


Рис. 4.11 – Схема цифрового ПІД-регулятора

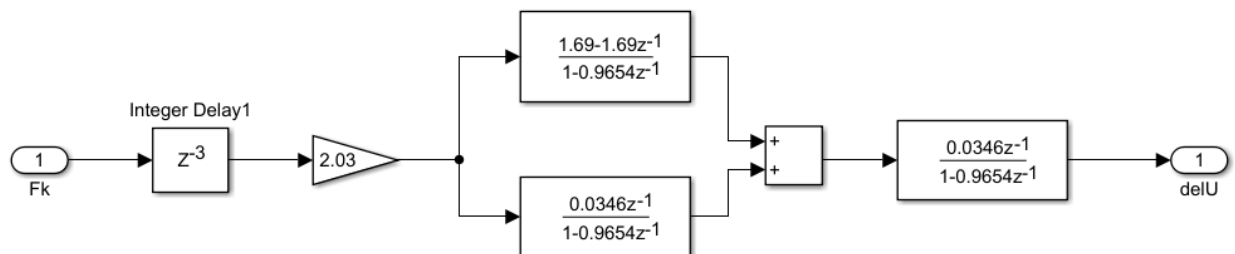


Рис. 4.12 – Схема моделювання цифрового варіанту коригуючого зв'язку (блок «Kor_Sv»)

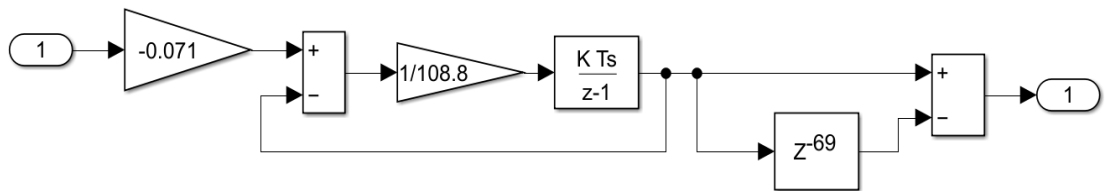


Рис. 4.13 – Схема моделювання цифрового варіанту коригуючого зв'язку (блок «UprSmit»)

Відповідність цифрового варіанту коригуючого зв'язку його неперервному аналогу підтверджується результатами моделювання. На рис. 4.14 – 4.17 наведено відповідні схеми моделювання та отримані результати.

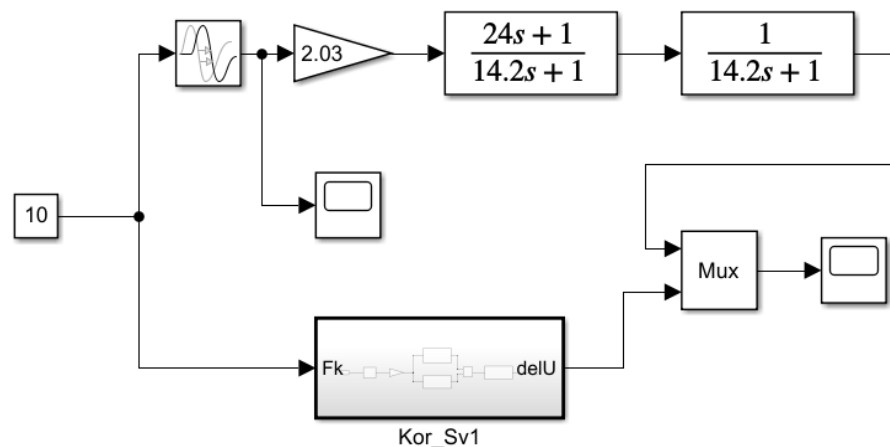


Рис. 4.14 – Схема моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

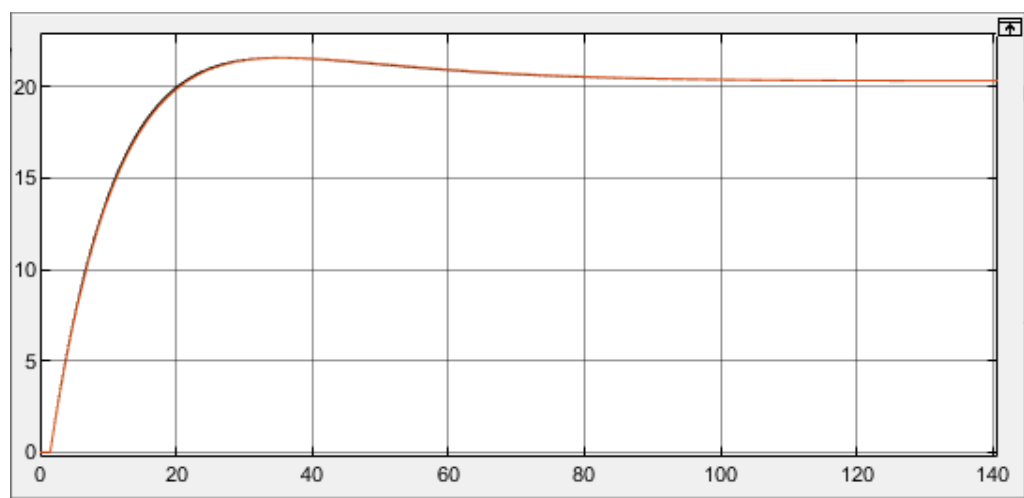


Рис. 4.15 – Результати моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

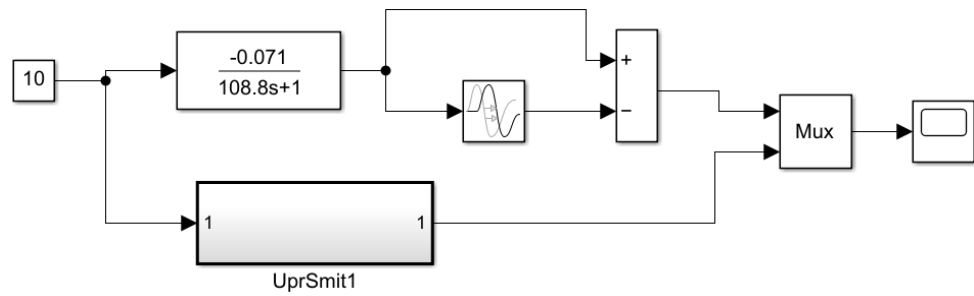


Рис. 4.16 – Схема моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

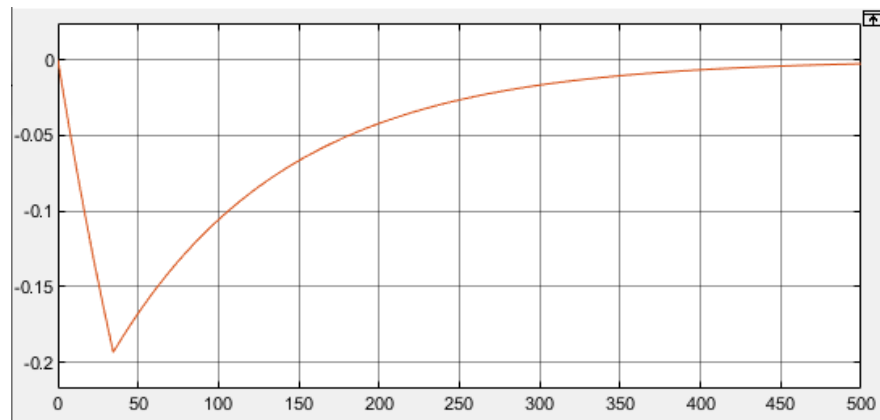


Рис. 4.17 – Результати моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

Результати моделювання системи керування при дії неконтрольованих та контрольованих збурень з використанням цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис.4.18.

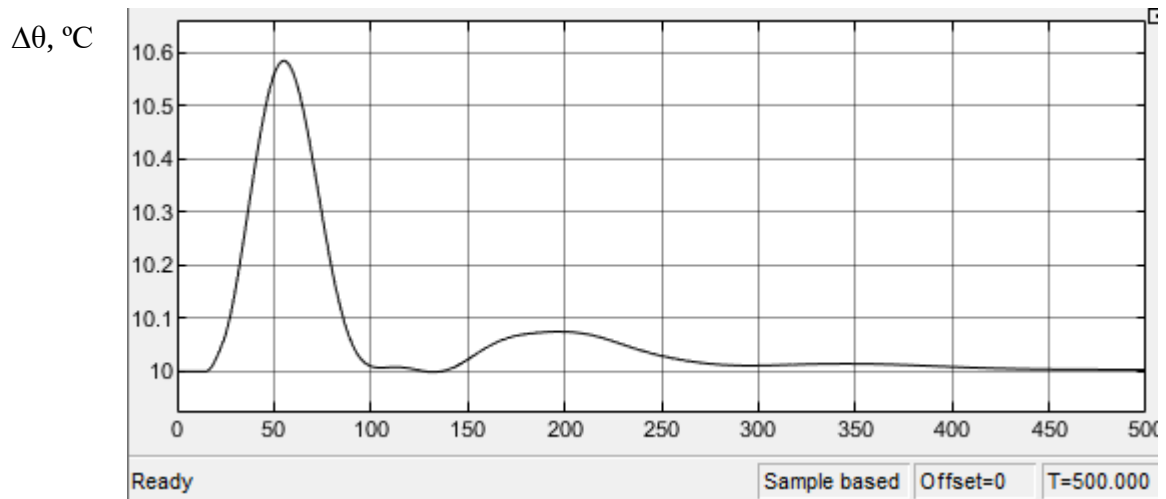


Рис. 4.18 – Динаміка зміни різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища

Процедура отримання Z-передатних функцій наведена на рис. 4.20. Для отримання Z-передатної функції використовуються спеціальні вбудовані функції системи MatLab (функції: `tf` і `c2d`) що призначені для роботи з передатними функціями у неперервному та дискретному часі.

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

```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> sys = tf([1],[14.2 1])

sys =

      1
-----
14.2 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> sysd=c2d(sys,0.5,'zoh')

sysd =

    0.0346
-----
z - 0.9654

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.

>> sys = tf([24 1],[14.2 1])

sys =

    24 s + 1
-----
14.2 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> sysd=c2d(sys,0.5,'foh')

sysd =

    1.678 z - 1.644
-----
z - 0.9654

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Рис. 4.19 – Отримання Z-передатної функції ланок коригуючих зв'язків

Для кожної підсистеми яка буде конвертуватися у мову SCL середовища Step 7 проведемо налаштування рис 4.20.

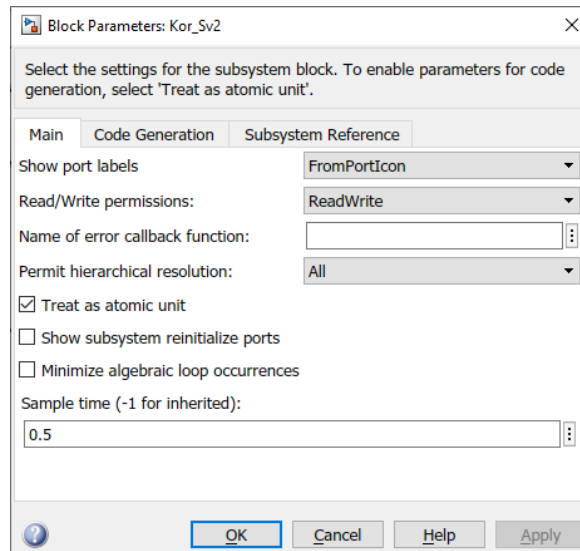


Рис. 4.20 – Вікно налаштування підсистем для їх конвертації

Пакет Simulink PLC Coder налаштуємо для компіляції коду для середовища Siemens SIMATIC Step7 5.4 (рис. 4.21).

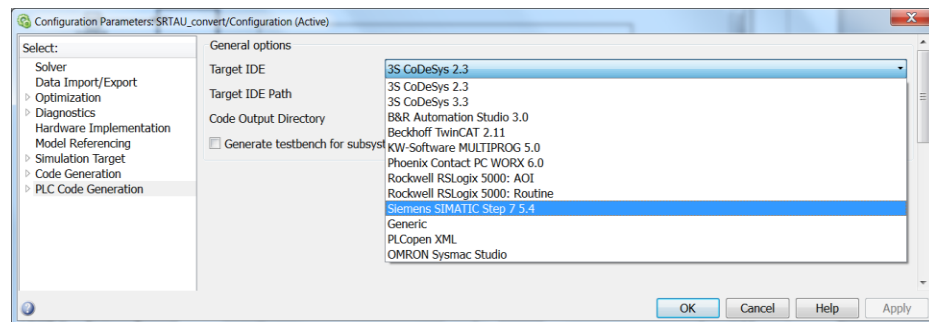


Рис. 4.21 – Вікно налаштування пакету Simulink PLC Coder

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для блоку ПІД регулятора та блоків коригуючих зв'язків. На рис. 4.22 та 4.23 наведена процедура генерації коду для коригуючого зв'язку.

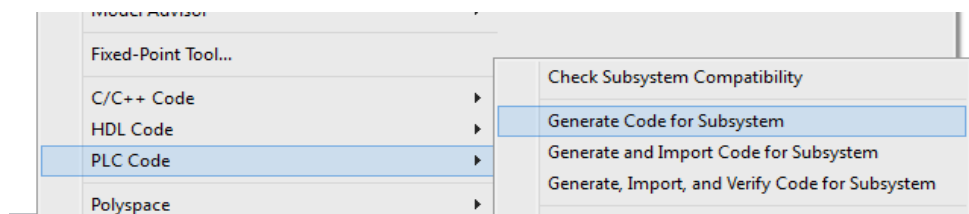


Рис 4.22 – Компіляція коду

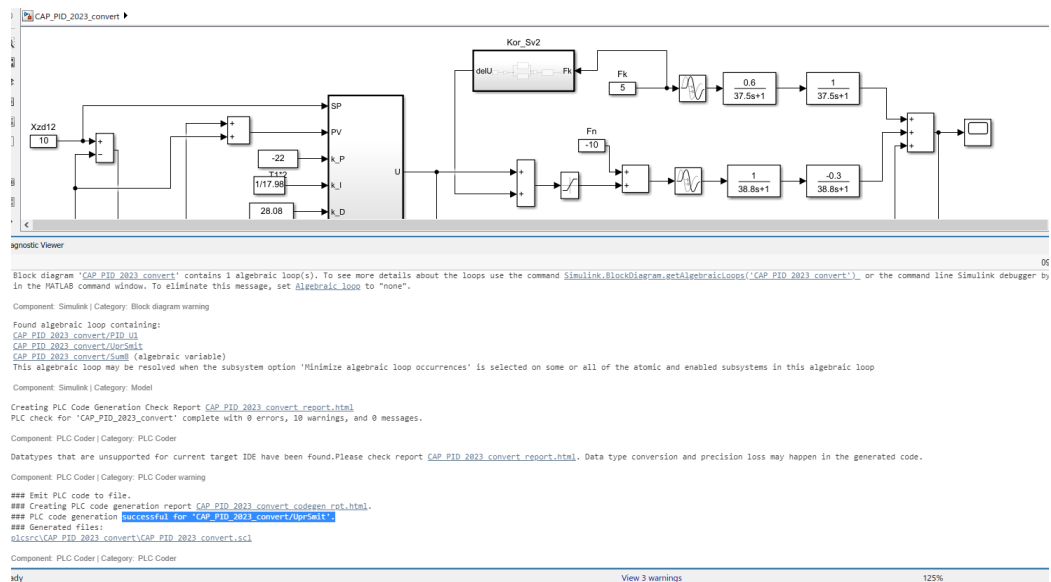


Рис. 4.23 – Результати успішної генерації коду коригуючого зв'язку для середовища SIMATIC Step7

На рис. 4.24 наведено вихідний генерований код мовою SCL для блоку коригуючого зв'язку «UprSmit». Повний список вихідних кодів конвертованих блоків наведено у додатку А.

```

Editor - D:\M2023\Ільченко\Роздел 4\plcsrc\CAP_PID_2023_convert\CAP_PID_2023_convert.scl

EDITOR VIEW
New Open Save Print Compare Go To Find Bookmark Refactor ANALYZE SECTION Run Step Stop
FILE NAVIGATE CODE RUN

CAP_PID_2023_convert.scl
1 (*
2 *
3 * File: CAP_PID_2023_convert.scl
4 *
5 * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "CAP_PID_2023_convert/UprSmit"
6 *
7 * Model name : CAP_PID_2023_convert
8 * Model version : 1.2
9 * Model creator : user
10 * Model last modified by : user
11 * Model last modified on : Sat Nov 11 19:19:20 2023
12 * Model sample time : 0.5s
13 * Subsystem name : CAP_PID_2023_convert/UprSmit
14 * Subsystem sample time : 0.5s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on : Sat Nov 11 21:15:09 2023
17 *
18 * Target IDE selection : Siemens SIMATIC Step 7
19 * Test Bench included : No
20 *
21 *)
22 FUNCTION_BLOCK UprSmit
23 VAR_INPUT
24 ssMethodType: INT;
25 In1: REAL;
26 END_VAR
27 VAR_OUTPUT
28 Out1: REAL;
29 END_VAR
30 VAR
31 c_DiscreteTimeIntegr: REAL;
32 IntegerDelay1_DSTATE: ARRAY [0..68] OF REAL;
33 c_rtb_DiscreteTimeIn: REAL;
34 b_i: DINT;
35 END_VAR
36 CASE ssMethodType OF
37 0:
38 (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/UprSmit' *)
39 (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator' *)
40 c_DiscreteTimeIntegr := 0.0;
41 (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/UprSmit' *)
42

```

Рис. 4.24 – Вихідний генерований код мовою SCL блоку коригуючого зв'язку «UprSmit» для середовища програмування Step7

Після генерації коду в середовищі MATLAB додаємо отримані файли до проекту який створено у середовищі Step 7. Процес додавання розроблених програмних модулів у проект Step 7 наведено на рис. 4.25, а на рис. 4.26 приклад імпортованого генерованого коду.

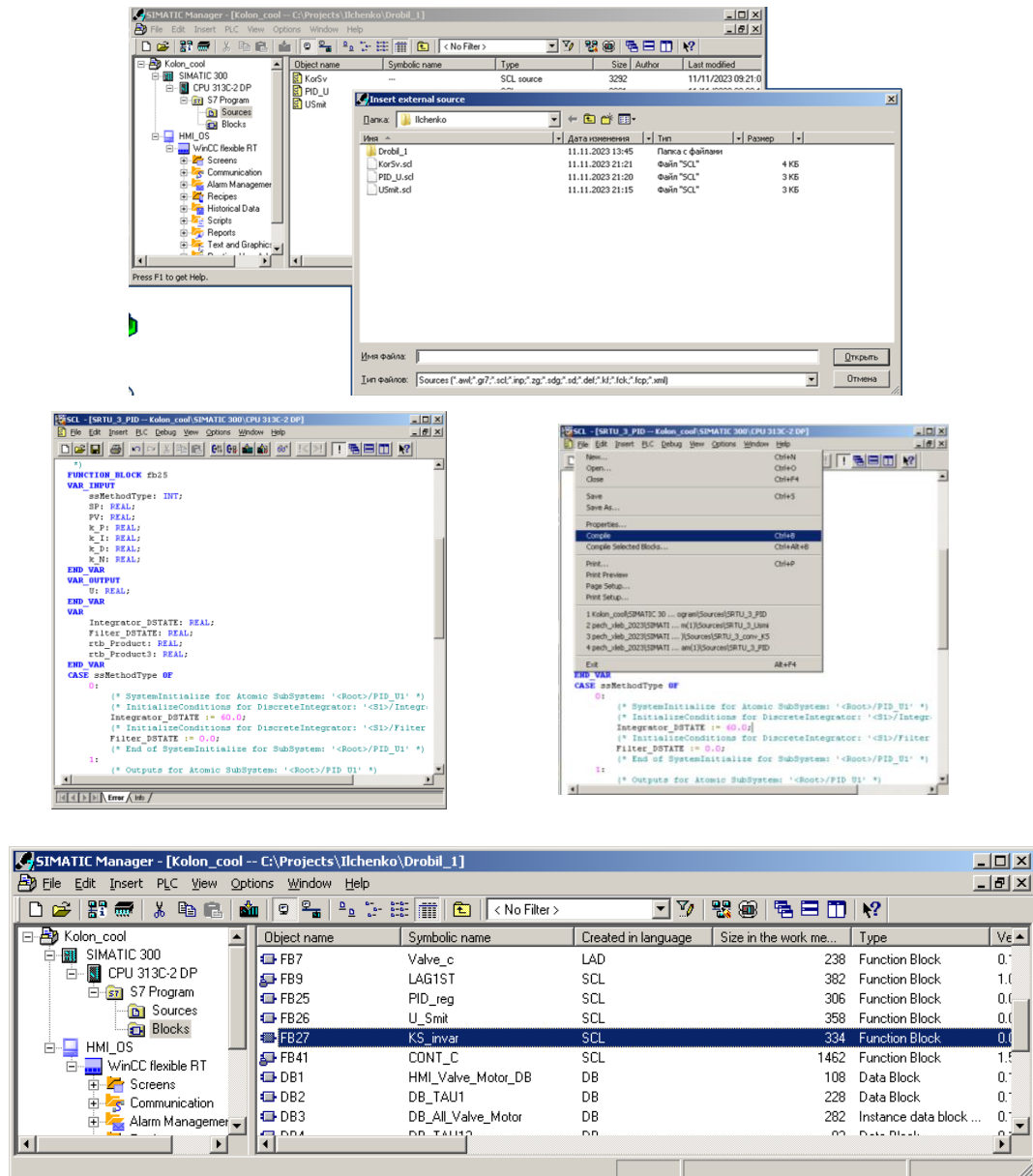


Рис. 4.25 – Процедура імпорту генерованого коду в середовище програмування Step 7 і створення відповідних функціональних блоків

```

FUNCTION_BLOCK fb27
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    Fk: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    delU: REAL;
END_VAR
VAR
    c_DiscreteFilter1_st: REAL;
    c_DiscreteFilter2_st: REAL;
    c_DiscreteFilter3_st: REAL;
    IntegerDelay1_DSTATE: ARRAY [0..2] OF REAL;
    Gain19: REAL;
    rtb_DiscreteFilter2: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:
        (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/Kor_Sv2' *)
        (* InitializeConditions for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter1' *)
        c_DiscreteFilter1_st := 0.0;
        (* InitializeConditions for Delay: '<S1>/Integer Delay1' *)
        IntegerDelay1_DSTATE[0] := 0.0;
        IntegerDelay1_DSTATE[1] := 0.0;
        IntegerDelay1_DSTATE[2] := 0.0;
        (* InitializeConditions for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter2' *)
        c_DiscreteFilter2_st := 0.0;
        (* InitializeConditions for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter3' *)
        c_DiscreteFilter3_st := 0.0;
        (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/Kor_Sv2' *)
    1:
        (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Kor_Sv2' *)
        (* Output: '<Root>/delU' incorporates:
         * DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter1' *)
        delU := 0.0346 * c_DiscreteFilter1_st;
        (* Gain: '<S1>/Gain19' incorporates:
         * Delay: '<S1>/Integer Delay1' *)
        Gain19 := 2.03 * IntegerDelay1_DSTATE[0];
        (* DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter2' *)
        rtb_DiscreteFilter2 := Gain19 - (-0.9654 * c_DiscreteFilter2_st);
        (* Update for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter1' incorporates:
         * DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter2'
         * DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter3'
         * Sum: '<S1>/Sum25' *)
        c_DiscreteFilter1_st := ((1.69 * rtb_DiscreteFilter2) + (-1.69 * c_DiscreteFilter2_st)) + (0.0346 * c_DiscreteFilter3_st)
            - (-0.9654 * c_DiscreteFilter1_st);
        (* Update for Delay: '<S1>/Integer Delay1' *)
        IntegerDelay1_DSTATE[0] := IntegerDelay1_DSTATE[1];
        IntegerDelay1_DSTATE[1] := IntegerDelay1_DSTATE[2];
        IntegerDelay1_DSTATE[2] := Fk;
        (* Update for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter2' *)
        c_DiscreteFilter2_st := rtb_DiscreteFilter2;
        (* Update for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter3' *)
        c_DiscreteFilter3_st := Gain19 - (-0.9654 * c_DiscreteFilter3_st);
        (* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Kor_Sv2' *)
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Рис. 4.26 – Приклад імпортованого генерованого коду коригуючого зв’язку в середовищі Step 7

Загальний вигляд розробленого проекту в середовищі Step 7 наведено на рис.4.27.

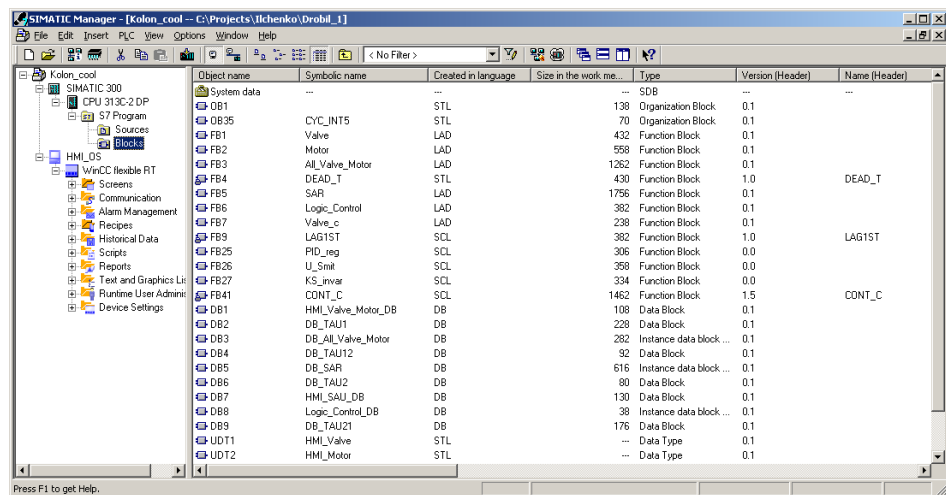


Рис. 4.27 – Загальний вид вікна проекту в середовищі Step 7

Алгоритми регулювання різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища та коригуючи алгоритми реалізовані у функціональному блоці FB5. Фрагмент коду програми наведено на рис. 4.28.

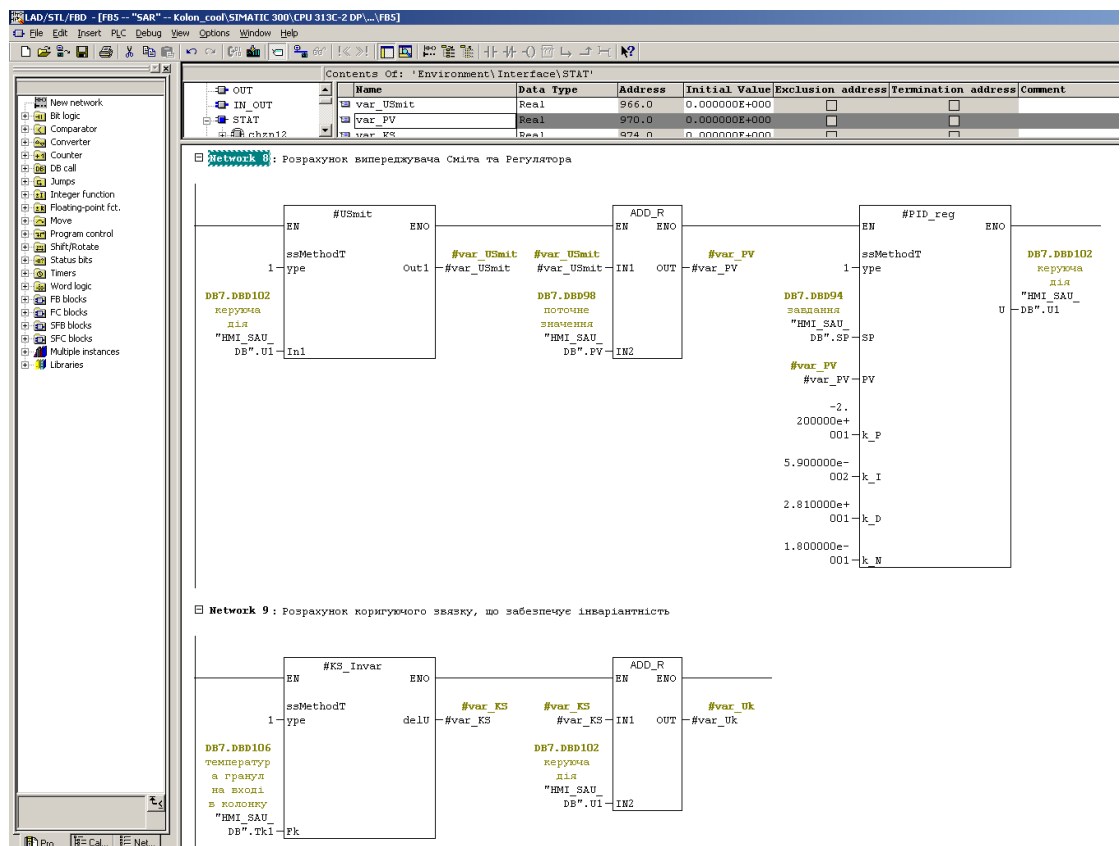


Рис. 4.28 – Фрагмент програми в функціональному блоці FB5 яка реалізує розрахунок регулятора та коригуючи алгоритми

Проведемо тестування програми в режимі емуляції контролеру. Для цього доповнимо програму моделлю об'єкта керування і запусимо розрахунок моделі САР за каналом регулювання різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища. Фрагмент програми моделі ОК наведено на рис. 4.29, а фрагмент алгоритму регулювання у режимі відлагодження програми на рис. 4.30. А результати тестування у вигляді перехідної характеристики САР розрядження наведені у вікні SCADA системи WinCCflexible на рис. 4.31 та 4.32.

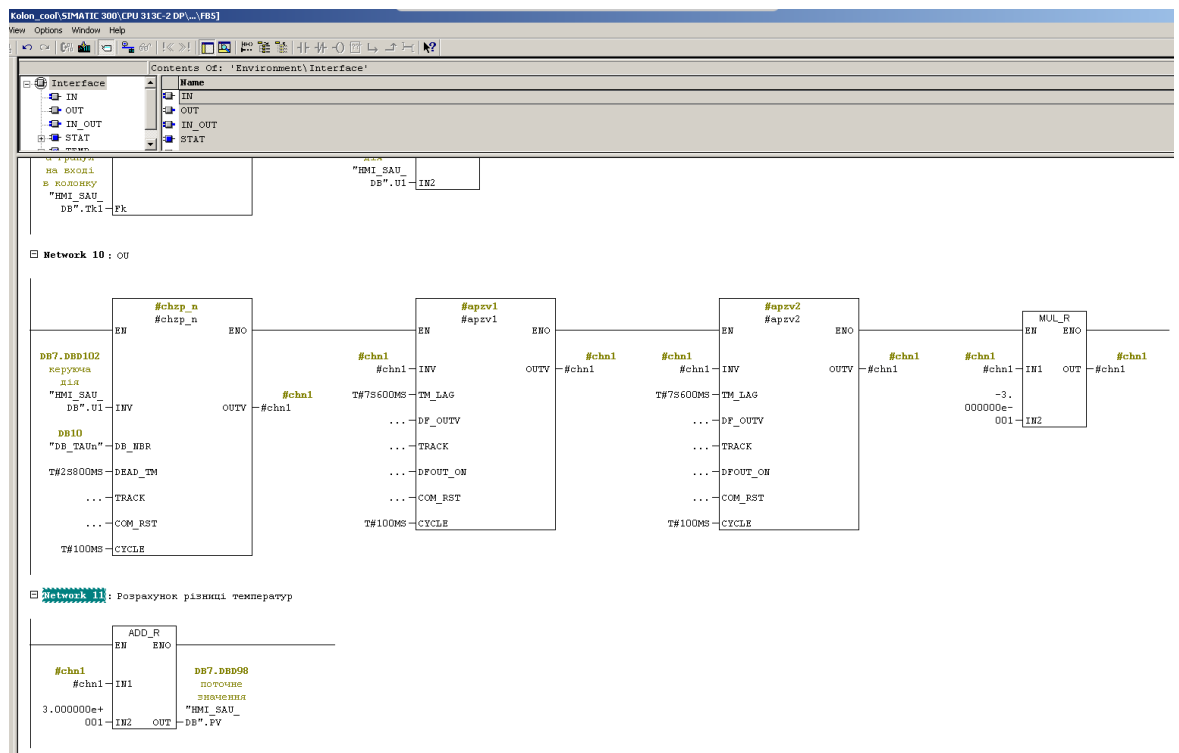


Рис. 4.29 – Фрагмент програми в організаційному блоці OB35 яка реалізує розрахунок моделі ОК

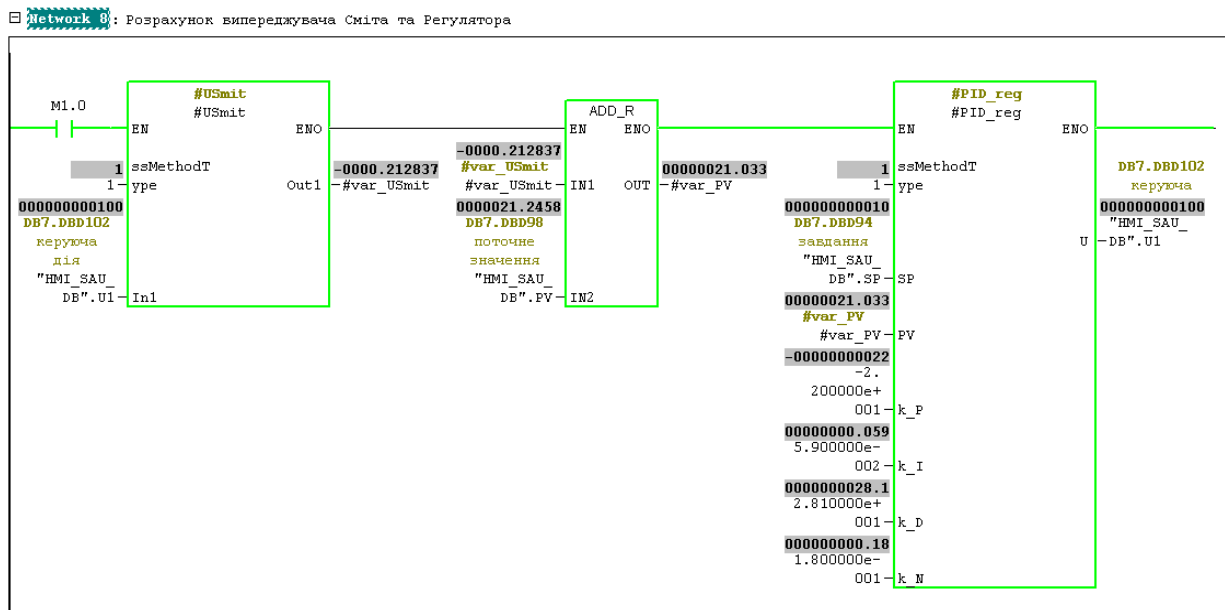


Рис. 4.30 – Фрагмент алгоритму регулювання у режимі відлагодження програми

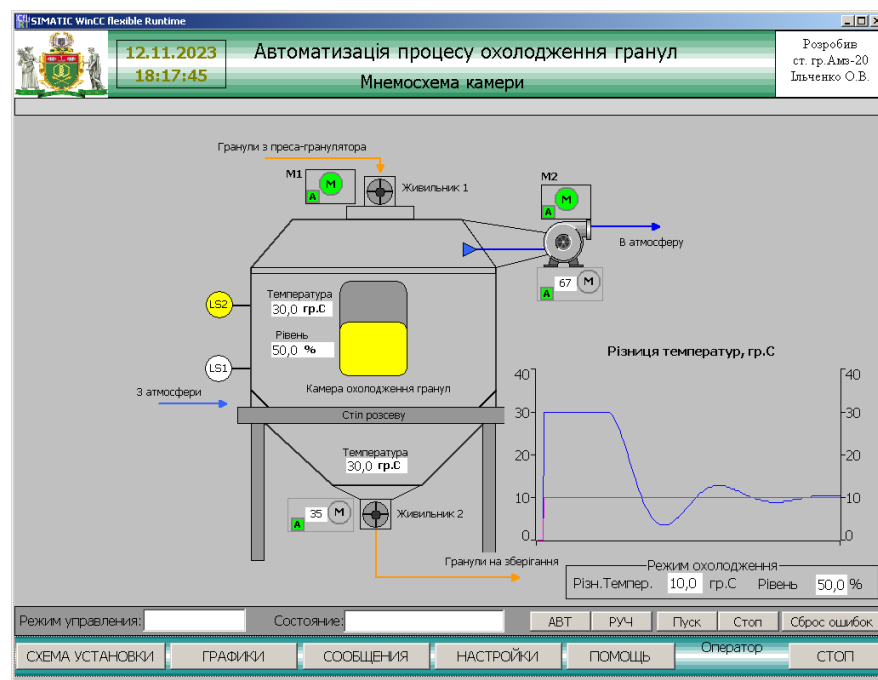


Рис. 4.31 – Результати тестування у вигляді перехідної характеристики моделі САР регулювання різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища (головний екран)

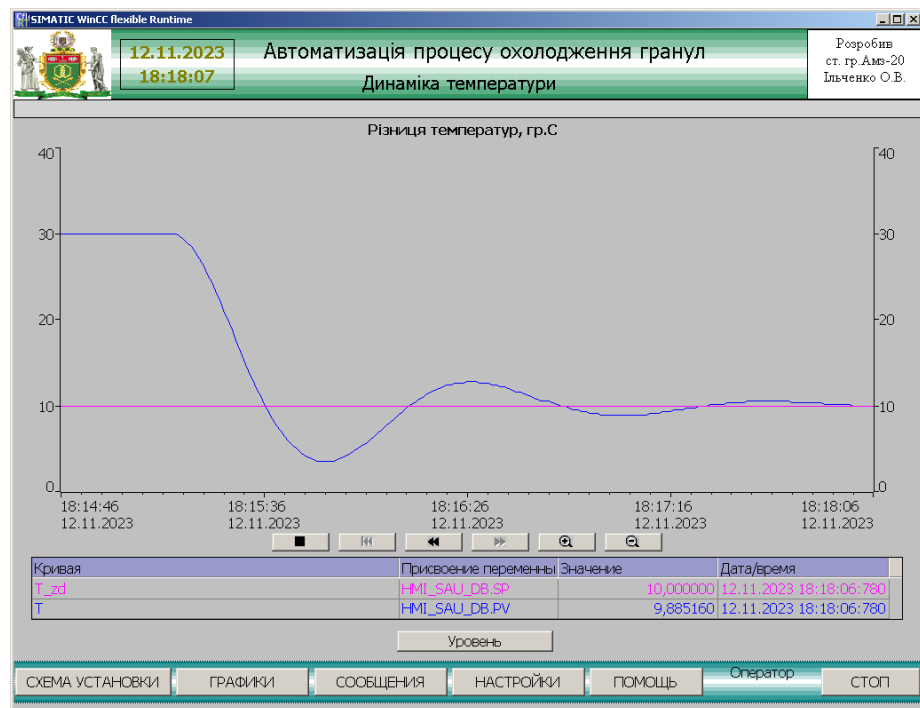


Рис. 4.32 – Результати тестування у вигляді перехідної характеристики моделі САР регулювання різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища (екран тренди)

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

4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок

За результатами моделювання можна зробити висновки що підвищення динамічної точності САР різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища на основі компенсації запізнення у власному русі системи та принципу інваріантності до контрольованих збурень дозволяє знизити вихід дрібної фракції комбікорму яка повертається на повторне гранулювання з 10% відсотків до 2-3%. Тобто знизити брак продукції. Зменшення кількості комбікорму що повертається на повторне гранулювання

дозволяє знизити витрати електричної енергії, а також підвищити продуктивність ділянки гранулювання.

4.4 Висновки за розділом

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

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

Запропонований варіант побудови АСУ ТП на базі МПК серії SimaticS7-313-с 2dp є інвестиційно привабливими, так як розширення функцій системи керування не потребує істотної зміни технічної структури системи і дозволяє залишити базовий контролер без змін. Тому модернізація САУ на базі Siemens окуповується досить швидко.

ВИСНОВКИ

Детально проаналізувавши вибраний об'єкт регулювання, можна зробити висновок, що зміна температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки досить сильно має значний вплив на різницю між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища. Цей перехресний зв'язок в ОК знижує динамічну точність САР.

Основним шляхом підвищення динамічної точності даної САР являється побудова САР інваріантної до цих збурень. У основу підвищення динамічної точності САР буде покладений принцип двоканальності Петрова, суть якого у введенні додаткового каналу дії « $\theta_k - \Delta\theta$ » через корегуючий зв'язок. А це потребує доробки моделі ОР.

В даній роботі розроблена САР різниці між температурами гранульованого комбікорму на виході з охолоджувальної колонки та температурою навколишнього середовища з упереджувачем Сміта та інваріантністю до змін температури гранульованого комбікорму на вході до охолоджувальної колонки. Результати моделювання показують, що введення коригуючих зв'язків дозволило істотно зменшити прямі та інтегральні показники якості тобто підвищилась динамічна точність САР.

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

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

Була розроблена технічна структура мікропроцесорного ядра системи керування та програмне забезпечення системи автоматичного керування ТП охолодження гранульованих комбікормів.

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

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» – Одеса: ДАПТ, 2000. – 16 с.
2. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з Ідентифікації та моделювання технологічних об'єктів – Одеса 1999. – 78 с.
3. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Теорія автоматичного управління» – Одеса: ОДАПТ, 2000. – 16 с.
4. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 1. – Одеса 2013. – 110 с.
5. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 2. – Одеса 2012. – 59 с.
6. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту [Текст] / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
7. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
8. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
9. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления (для специалистов в области теории управления, аспирантов и студентов старших курсов технических университетов) [Текст] / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М.: Горячая линия. Телеком, 2004. – 144 с.
10. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети [Текст] / Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. – М. : Физматлит, 2001. – 302 с.
11. Архангельський В.І. і др. Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] – К. : техніка, 1999. – 364с.

12. Васи́лець Т. Ю. и др. Синтез нейромережевого регулятора для електромеханічної системи з пружними зв'язками в кінематичних передачах //Системи обробки інформації. – 2018. – №. 2. – С. 7-17.

13. Сергей А. Терехов Лаборатория Искусственных Нейронных Сетей НТО-2, ВНИИТФ, Снежинск / [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://b-ok.org/book/530233/94a2fe>, <https://www.twirpx.com/file/600450/>, <https://studfiles.net/preview/986654/>

14. User's Manual .WinCC flexible 2008 Compact / Standard / Advanced.

15. «MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики». – Дьяконов В.П., Круглов В.В М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.

16. Каталог ІК РІ «Промышленная связь для систем автоматизации и приводов». – Siemens AG, 2005. – 666с.

17. Каталог ST70 «SIMATIC – Компоненты для комплексной автоматизации». – Siemens AG, 2007. – 862с.

18. «Автоматизация с помощью программ Step 7 LAD и FBD». – Ганс Бергер, 2001. – 605с.

19. «Економіка підприємства: Підручник» / За заг. редакторка С.Ф. Покропивного-Вид. 2-ге, перероб. але доп. – К.: Київ, 2000. – 528 с.

20. UA 53818 А. Спосіб охолодження гранульованих матеріалів / Д.О. Шаповаленко та ін. МПК А23К 1/00, А23N 17/00. Заявл. 29.09.00 № 2000095577. Опубл. 17.02.03. Бюл. №2. – 3с.

21. RU 2502319. Способ получения кормовой добавки для профилактики микотоксикозов у животных и птицы / К.Л. Косарев и др. МПК А23К 1/00. Опубл. 27.12.13. Бюл. №8. – 3с.