

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 шоккової заморозки м'яса»

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) Терещенко Р.О.

(прізвище, ініціали)

II курсу Ам-20 групи

Керівник к.т.н., доц. Левінський В.М.

(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: _____

(посада, прізвище та ініціали)

(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

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

Завідувач(ка) кафедри АТПіРС

(назва кафедри)

(підпис)

Світій І.М.

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС
В.А. Хобін

22» грудня 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Терещенко Ростислав Олександрович

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування шоковою заморозкою м'яса»

Затверджена наказом ОНТУ №877-03 від 29.11.22 р.

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

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

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

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

Розділ 1. Технологічний процес шокової заморозки м'яса, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП шокової заморозки м'яса.

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

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

Розділ 5. Реалізація та підготовка до впровадження на підприємстві («Альфайн» (Данненберг, Німеччина)»»)

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

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

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

7. Дата видачі завдання «30» листопада 2023 р.

Керівник
Завдання прийняв до виконання

Левінський В.М.
Терещенко Р.О.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач-дипломник Терещенко Р.О. Керівник роботи Левінський В.М.

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 Терещенко Р.О.
ПІБ Підпис

АНОТАЦІЯ

Терещенко Р.О. «Підвищення ефективності автоматичного керування шокової заморозки м'яса»

Кваліфікаційна робота магістра. – Одеса: ОНТУ 2024. – 146с.

Бібліогр.: 42_. Іл.: 132_. Табл. 10_.

Мета дослідження - модернізація САК процесом заморожування курятини. САК реалізує нову функцію оптимізації температури заморозки в камері з метою збільшити продуктивність фризера. Функція реалізована на основі алгоритмів екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Реалізація цієї функції забезпечує підвищення ефективності процесу заморожування курятини в умовах змінних властивостей сировини та параметрів енергоносіїв за рахунок відстеження дрейфуючого значення екстремуму функції ефективності та підтримки поточного значення показника ефективності в околиці екстремального значення. Надалі були синтезовані моделі САУ з нечіткими регуляторами та з нейрорегулятором що визначена як нейромережева система управління. Також була розроблена модель САУ з комбінованим регулятором, що є синтезом традиційного ПД-регулятора та штучної нейронної мережі. Для подальшої параметричної оптимізації САУ, за характеристиками нечітких регуляторів було виконано тренування визначених штучних нейронних мереж, які можуть виконувати роль нейрорегуляторів

Ключові слова: заморожування курятини, алгоритми екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму, підвищення ефективності, нечіткі регулятори та з нейрорегулятором.

ЗМІСТ

	стор.
Перелік умовних позначень, символів і одиниць.....	8
Вступ.....	9
Розділ 1 Технологічний процес заморожування курятини і задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.....	13
1.1 Короткий опис технологічного процесу заморожування курятини 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	17
1.3 Аналіз існуючих САК технологічного процесу заморожування курятини..	20
1.4 Комплекс математичних моделей ТП заморожування курятини як об'єкту регулювання, їх реалізація в формі імітаційних моделей і результати тестування моделей	21
1.5 Типові структури і алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, результати їх параметричної оптимізації і перевірка на робастність (грубість).....	24
1.6 Висновки за розділом.....	30
Розділ 2 Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП заморожування курятини	31
2.1 Специфічні особливості ОР і обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення їх динамічної точності	31
2.2 Доопрацювання математичної моделі ОР до моделі ОО на вирішення завдання оптимального управління.....	32
2.3 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.....	33
2.4 Оптимальний параметричний синтез САР базової структури та аналіз результатів синтезу	34
2.5 Недоліки існуючих САК і формулювання мети вдосконалення системи автоматичного керування процесом заморозки м'яса.....	42
2.6 Висновки за розділом.....	43
Розділ 3 Вдосконалення алгоритмів, які реалізують функції регулювання САК технологічного процесу випічки хліба, на основі застосування логічного регулятора та штучних нейронних мереж	44
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління побудованих на базі апарата нечіткої логіки та штучної нейронної мережі для розглянутого об'єкта керування	44
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB/Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійними статичними характеристиками	45
3.3 Параметричний синтез САР з традиційними ППД регуляторами для об'єкта з нелінійними характеристиками за каналом регулювання.....	47

3.4 Розробка моделі САУ з нечіткими регуляторами (НР) для об'єкта з нелінійними характеристиками за каналом регулювання.....	51
3.5 Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів управління.....	65
3.6 Синтез моделі САУ з нейрорегуляторами.....	67
3.7 Синтез САУ з альтернативними варіантами нейромережі	79
3.8 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегуляторами.....	87
3.9 Аналіз функціонування САУ за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють.....	92
3.10 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.....	96
3.11 Висновки за розділом.....	100
Розділ 4 Розробка концептуальної моделі об'єкту керування шоккової заморозки м'яса.....	102
4.1 Опис загальних принципів побудови системи гарантуючого керування...	102
4.1.1 Постановка задачі.....	102
4.1.2 Системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму.....	113
4.2 Доопрацювання математичної моделі ОР до моделі ОО на вирішення завдання оптимального управління.....	105
4.3 Розробка структурної схеми САУ та опис принципу її дії.....	106
4.4 Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів управління..	109
4.5 Розробка імітаційної моделі екстремальної системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму та дослідження її роботи.....	109
4.6 Висновки за розділом.....	120
Розділ 5 Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи на підприємстві «Альфайн» (Данненберг, Німеччина)».....	121
5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом керування шоквим заморожуванням курятини і формування задачі по її розвитку для впровадження розробок.....	121
5.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів управління.....	126
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	140
5.4 Висновки за розділом.....	140
Висновки.....	141
Список використаної літератури.....	143

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

- ОК – об'єкт керування;
- САК – система автоматичного керування;
- САР – система автоматичного регулювання;
- САУ – система автоматичного управління;
- ОУ – об'єкт управління;
- ПХ – перехідні характеристики;
- ЕОМ – електрична обчислювальна машина;
- СКЗ – спрощений корегуючий зв'язок;
- НР – нечіткі регулятори;
- ШНМ – штучні нейронні мережі;
- НК – нейроконтролер;
- НМ – нейронна мережа;
- СЕР – система екстремального регулювання;
- САО – система автоматичної оптимізації;
- ОО – об'єкт оптимізації;
- ИУ – інтегратор управління;
- ДВС – детектор зростаючого сигналу;
- УР – пристрій реверсу;
- ФНЧ – фільтр низьких частот;
- ЗН – зона нечутливості;
- ОР – об'єкт регулювання;
- ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом;
- ТП – технологічний процес;
- ПДТ – підвищена динамічна точність;
- РП – регулюючий пристрій;
- САР – система автоматизованого регулювання;
- ПІД – регулятор – пропорціональне – інтегрально – диференційний регулятор;
- ПІ – регулятор – пропорціональне – інтегральний регулятор;

ВСТУП

М'ясо в усьому світі займає одне з перших місць у харчуванні людини, оскільки в його складі є майже всі необхідні для організму поживні речовини, в тому числі вуглеводи, білки, жири, вітаміни, мінеральні речовини, харчові волокна тощо.

М'ясо відноситься до продуктів, що швидко псуються. З метою його тривалого зберігання використовують заморожування м'яса. При заморожуванні, під дією низької температури, вода, що знаходиться в м'ясі, перетворюється на кристали льоду, завдяки чому ферментативні процеси і життєдіяльність мікроорганізмів істотно сповільнюються.

Найбільш перспективним сьогодні є застосування шокового - максимально швидкого заморожування, яке дозволяє зберегти природні властивості м'яса, забезпечити бактеріологічну чистоту, звести до мінімуму втрати маси.

Як технологічні агрегати для заморожування застосовують, зокрема, спіральні фризери. Для забезпечення високої ефективності ведення процесу заморожування його автоматизують. Однак відомі системи автоматичного керування (САК) спіральними фризерами не забезпечують точного виконання регламенту і високої ефективного ведення технологічного процесу заморожування м'яса. В результаті цього м'ясопереробні підприємства зазнають фінансових втрат.

Істотного зростання економічних показників функціонування м'ясопереробних підприємств можна досягти шляхом модернізації існуючих САК, яка вимагає невеликих витрат і зупинки підприємства на короткий термін, у порівнянні з повною заміною обладнання.

Тому побудова ефективної САК спіральним фризером для шокового заморожування м'яса з використанням сучасних технологій та засобів автоматизації є актуальною задачею. Крім того, підходи щодо модернізації спірального фризера можна застосовувати і для схожих фризерів.

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

Робота виконана в Одеському національному технологічному університеті (ОНТУ) та відповідає напряму №4 наукової діяльності ОНТУ «Створення нового

високоєфективного обладнання, автоматизація виробничих процесів харчових і зернопереробних виробництв», тематиці наукової школи ОНТУ: «Моделювання та оптимальне керування технологічними процесами зберігання та переробки сільськогосподарської сировини», а також науковому напрямку діяльності «Автоматичне керування технологічними процесами» навчально-наукового інституту комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П. М. Платонова.

Мета дослідження – підвищення ефективності автоматичного керування шоковою заморозкою м'яса, шляхом удосконалення інтелектуального рівню САК в результаті підвищення його динамічної точності, а також використання спеціальних методів теорії автоматичного керування та теорії нечітких множин і нейронних мереж

Завдання дослідження, які було вирішено для досягнення поставленої мети:

- 1) розробити загальну концепцію побудови ефективної САК процесу шокової заморозки м'яса у спіральному фризери, включаючи концептуальну модель об'єкту керування (ОК);
- 2) розробити та реалізувати у середовищі Matlab Simulink математичну модель технологічного процесу шокової заморозки м'яса як ОК;
- 3) провести експерименти на математичній моделі та, за їх результатами, ідентифікацію моделей динамічних властивостей каналів керування;
- 4) розробити алгоритми керування, що забезпечують підвищення динамічної точності стабілізації регульованих змінних;
- 5) розглянути можливість підвищення ефективності САК засобами автоматичного керування;
- 6) розробити та дослідити алгоритми керування на базі апарату нечітких множин та нейронних регуляторів;
- 7) розробити та дослідити САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію;
- 8) розробити програмно-технічне забезпечення, що реалізує розроблені алгоритми;
- 9) провести підготовку до впровадження результатів проведеного дослідження.

Об'єкт дослідження – технологічний процес шокового заморожування м'яса в спіральному фризери.

Предмет дослідження – САК процесом шокового заморожування м'яса в спіральному фризери, включаючи моделі процесу як ОК.

Методи дослідження:

- метод системного аналізу;
- методи активного та пасивного експерименту, метод типової статистичної ідентифікації та інженерні методики ідентифікації моделі ОК;
- методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методики параметричного синтезу САР, оптимальний параметричний синтез, методи підвищення динамічної точності;
- метод імітаційного моделювання систем керування;
- спеціальні методи теорії автоматичного керування;
- методи теорії нечітких множин та нейронних мереж.

Наукова новизна отриманих результатів:

вперше обґрунтовано:

- загальна концепція побудови ефективної САК процесом шокового заморожування м'яса в спіральному фризери, включаючи концептуальну модель ОК;
- можливість регулювання технологічних параметрів процесу заморожування;
- доцільність застосування нейромережових алгоритмів та алгоритмів нечіткої логіки для регулювання технологічних параметрів заморожування;
- доцільність використання спеціальних методів теорії автоматичного керування;

вперше розроблено:

- математична модель процесу шокового заморожування м'яса в спіральному фризери, яка дозволяє проводити комп'ютерні експерименти з налагодження та параметричної оптимізації алгоритмів керування і з порівняльного аналізу каналів;
- система автоматичного регулювання технологічних параметрів шокового заморожування м'яса на основі нейромережевого алгоритму регулювання;
- система автоматичного керування з використанням алгоритмів на основі нечітких множин.

- система автоматичного регулювання підвищеної динамічної точності;
- система автоматичного керування на основі використання спеціальних методів теорії автоматичного керування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- підвищенні технологічної ефективності керування процесом шокового заморожування м'яса в спіральному фризери;
- підвищенні енергетичної ефективності ведення технологічного процесу;
- підвищенні якості готової продукції шляхом підвищення ефективності регулювання технологічних параметрів.

Апробація результатів дослідження. Результати дослідження обговорювалися на науково-технічних конференціях здобувачів вищої освіти ОНТУ.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто сформульовані найбільш загальні особливості процесу шокового заморожування м'яса в спіральному фризери як ОК, його структура та задачі керування; визначена концептуальна структура шокового заморожування як ОК, виявлено взаємозв'язки між змінними процесу; описано на якісному рівні властивості о каналів регулювання; обґрунтована процедура ідентифікації моделі процесу; модель реалізована в середовищі імітаційного моделювання; обґрунтована функціональна організація САК, алгоритми керування; розроблені принципи побудови та програмно-технічне забезпечення для реалізації каналів вимірювання та регулювання, розроблено САК з використанням спеціальних методів теорії автоматичного керування, розроблено САК на основі теорії нечітких множин та нейронних мереж.

Публікації. Підготовлений пакет документів до подачі в УКРНОІВІ для одержання патенту на корисну модель «Спосіб автоматичного керування шоковим заморожуванням м'яса», підготовлено науково-технічну статтю «Автоматизація процесу керування шоковим заморожуванням м'яса» для подачі в журнал ОНТУ «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів».

Структура і об'єм роботи. Випускна робота складається з вступу, основної частини, яка включає 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ЗАМОРОЖУВАННЯ КУРЯТИНИ І ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Короткий опис технологічного процесу заморожування курятини і основного обладнання

М'ясо займає одне з перших місць у харчуванні, так як в їх складі є майже всі необхідні для організму людини поживні речовини.

Суть заморожування полягає в тому, що під дією низької температури вода, що знаходиться і м'ясі, перетворюється на кристали льоду, і з-за цього ферментативні процеси і життєдіяльність мікроорганізмів істотно сповільнюються. Заморожування м'яса використовують з метою його тривалого зберігання.

В якості технологічного агрегату для заморожування застосовують, зокрема, спіральні фризери. Для оснащення фризера якісною системою автоматичного регулювання температури заморозки і температури готового продукту необхідно побудувати математичну модель процесу заморожування курятини.

Система управління спіральними фризерами часто не забезпечує виконання регламентів і ефективного ведення технологічного процесу. В результаті цього підприємства зазнають фінансових втрат.

У той же час, модернізація системи управління вимагає невеликих витрат і зупинки підприємства на короткий термін (у порівнянні з заміною обладнання), при цьому можна добитися значного зростання економічних показників.

Тому для підвищення якості управління найбільш доцільно використовувати автоматизовані системи управління, з використанням сучасних засобів автоматизації.

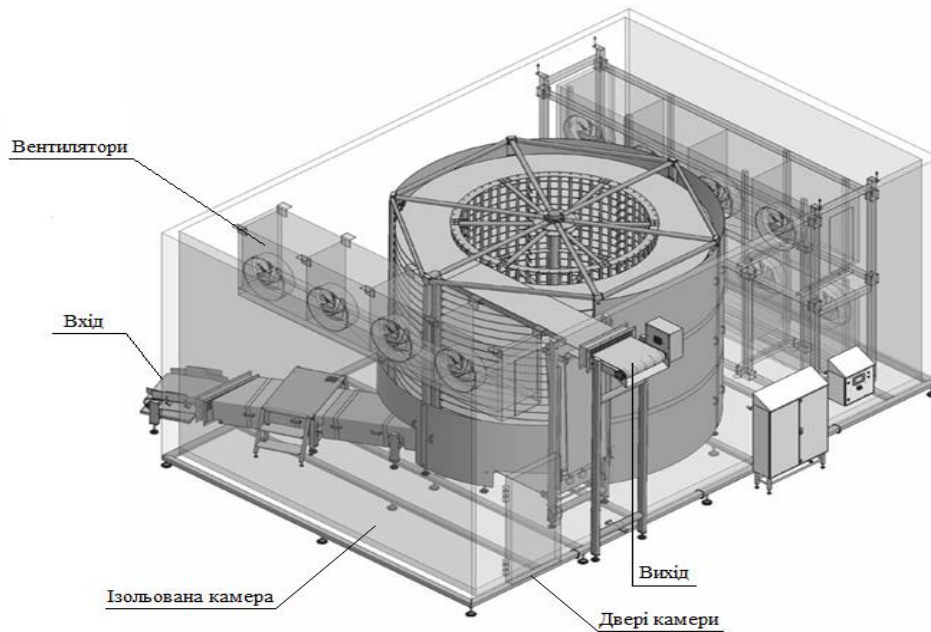


Рис. 1.1 Спіральний морозильний апарат

Шоковий фризер неперервної дії складається з чотирьох основних елементів: транспортер, морозильна камера, теплообмінник, вентилятори. Продукт подають за допомогою транспортера до морозильної камери. В середині морозильної камери знаходяться теплообмінник з вентиляторами які є системою розподілу повітря. Температуру заморожування в камері забезпечує теплообмінник з хладогентом, а підтримання сталої температури в морозильній камері забезпечують вентилятори

Мета ведення процесу – отримання заданих продуктів із заданими властивостями (показниками якості). При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдано тільки тоді, коли технологічний процес має сенс реалізувати, коли виконується цілий ряд вимог до технологічного процесу.

Найчастіше зустрічаються такі з них:

- кількість виробленого в одиницю часу продукту не повинно бути менше встановленої межі;
- втрати сировини і (або) продукту не повинні перевищувати нормативних значень;
- питомі, тобто на одиницю продукції, витрати енергії на процес не повинні перевищувати нормативних значень;
- режими роботи технологічного обладнання не повинні виходити за гранично-допустимі;

- шкідливий вплив технологічного процесу на людину і навколишнє середовище не повинен перевищувати нормативних значень;
- порушення режимів ведення технологічного процесу і роботи обладнання, що призводять до аварійних ситуацій, переростання в яких аварію призводить до суттєвих економічних втрат або навіть до катастрофічних наслідків, повинні бути досить рідкісними подіями і повинні бути передбачені заходи щодо запобігання переростання аварійних ситуацій в аварію.

Технологічний процес заморожки курятини доцільно реалізовувати, якщо:

- є достатній запас курятини на 1 годину роботи, тобто, якщо буде запас курятини не менш 3000 кг.
- достатній тиск холодоагенту в магістралі;
- повинна бути електроенергія в колах вентиляторів і конвеєра з середньостатистичними параметрами мережі;
- слід мати місце для відвантаження готового продукту.

Технологічний процес заморожування курятини є тепловим процесом, пов'язаним з передачею тепла від хладагенту шляхом його подачі до випарника. Важливою умовою нормального функціонування технологічного процесу є заповнення магістралі хладагентом.

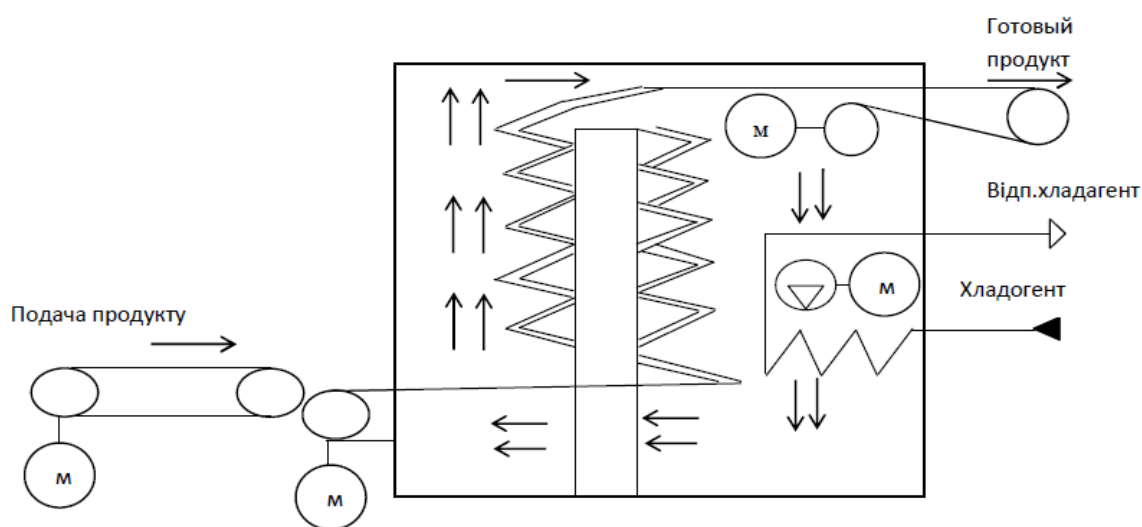


Рис. 1.2 Технологічна схема заморожування курятини

Охолоджена курка до температури $+5^{\circ}\text{C}$ і витратами 3000 кг/год за допомогою транспортера подається до морозильної камери. В середину морозильної камери подається холодагент до теплообмінника. Завдяки обдуву теплообмінника вентиляторами підтримується температура в камері -36°C . У морозильній камері продукт повинен охолотитися до температури -18°C .

Заморожування забезпечує запобігання розвитку мікробіологічних процесів і різке зменшення швидкості ферментативних і фізико-хімічних реакцій, в зв'язку з цим його використовують в основному при необхідності тривалого зберігання м'яса. В результаті заморожування волога кристалізується. Кількість вільної вологи в клітинах зменшується, завдяки чому, по мірі вимерзання вологи життєдіяльність мікрофлори знижується, а потім і зупиняється.

Процес заморожування курятини включає послідовне виконання таких технологічних операцій:

- Транспортування продукту;
- Підготовка сировини до виробництва: зберігання, змішування і дозування, підготовка питної води, приготування водного розчину суміші солі;
- Транспортуванні продукту по каскадному транспортеру;
- Транспортування продукту в спіральний фризер, де відбувається основна заморозка;
- Транспортування продукту на фасування;
- Дозування;
- Упаковка: продукт упаковують в картонні ящики, потім транспортують на контрольні ваги і маркують, транспортують на склад.

Початкові стадії технологічного процесу виробництва заморозки курячого м'яса виконуються за допомогою транспортерів. Це конвеєрні стрічка, а також обладнання для дозування. Наступний комплекс виконує попередню підготовку продукту до заморожування. Він складається з контактного фрізера.

Ведучий комплекс обладнання лінії призначений для отримання замороженої продукції.

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

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

Технологічний регламент – визначає умови, при яких в результаті технологічного процесу буде отримано продукт із заданими властивостями.

Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналу технологічних параметрів. Для технологічного процесу заморожування курятини такими параметрами є температура готового продукту $\Theta_{гп}$, температура заморозки $\Theta_{з}$

Експлуатаційний регламент - визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів технологічного обладнання. Для спірального фризера таким параметром є струм двигунів I_1, I_2, I_3, I_4 .

Техніко-економічний та екологічний регламент - визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір номінальних і гранично-допустимих значень техніко-економічних та екологічних параметрів. До цієї групи параметрів можна віднести:

- $F_{гп}$ - Витрати готового продукту.
- $F_{ох}$ - Витрати відпрацьованого охолоджувача.
- $\Theta_{ох}$ - Температура відпрацьованого теплоносія.

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

Відхилення температури заморожування курятини нижче гранично допустимих значень може призвести до недомороження продукту і виникнення в ньому великих кристалів льоду, а перевищення температури верхнього гранично допустимого значення може призвести до переморозки продукту і його деформації.

В обох випадках порушення регламенту веде до погіршення якості готового продукту і навіть до збільшення виходу браку.

Допуски на відхилення поточних (режимних) регламентованих значень параметрів від номінальних прийнято розділяти і задавати у вигляді допусків на тривалі і короткочасні відхилення. Аналіз нормативів ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання оформимо у вигляді таблиці регламентів 1.1.

Таблиця 1.1 - Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання		Номінальне значення параметру або ф-ція зміни номінального значення	Припустимі відхилення від номіналу		
					Тривалі ($t \rightarrow \infty$)	Короткочасні ($0 < t \ll \infty$)	
					величина	величина	час, сек
Температура заморозки	Өз	$^{\circ}\text{C}$		-36	± 0.2	± 1.4	200
Температура готового продукту	Өгп	$^{\circ}\text{C}$		-18	± 0.2	± 1.2	500

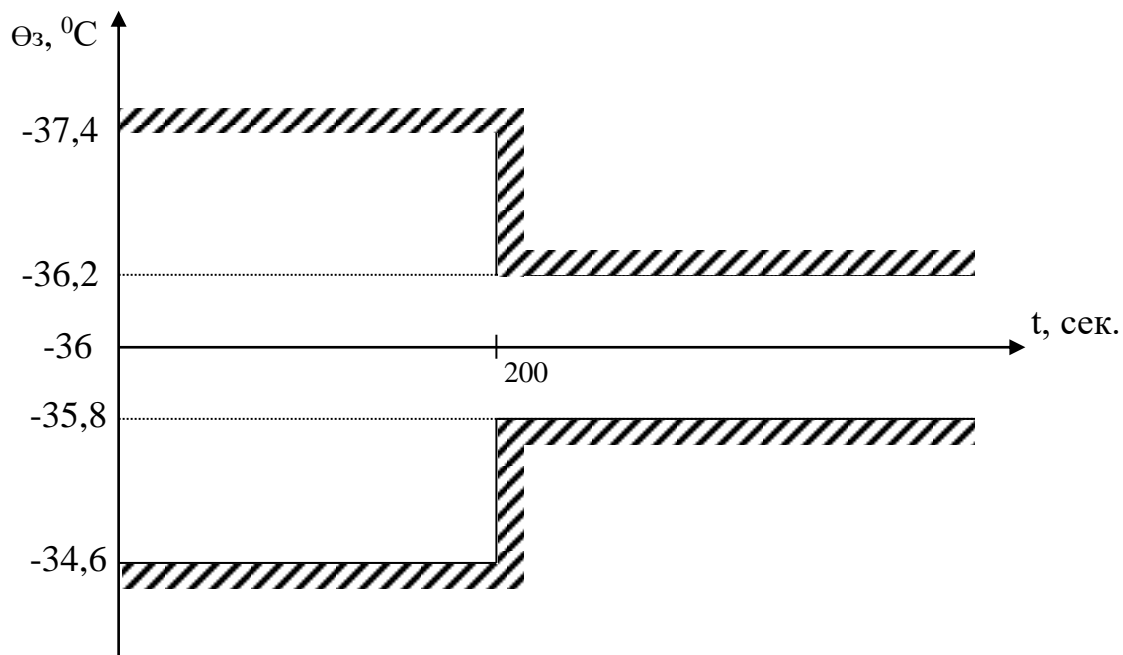


Рис. 1.3 – Регламентна зона для температури в заморозки

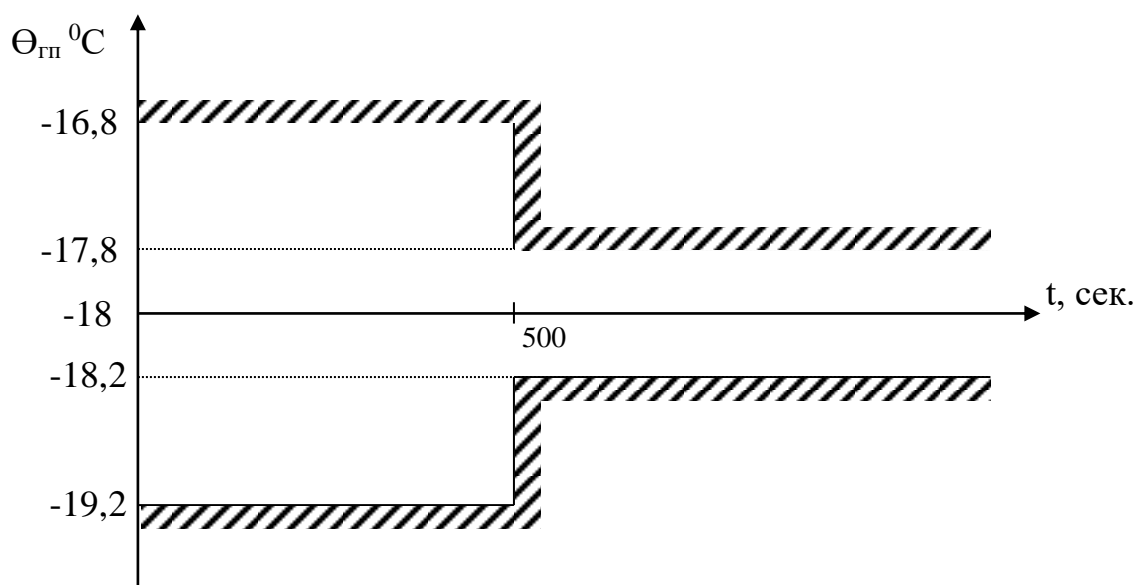


Рис. 1.4 – Регламентна зона для температури в готового продукту

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

Поточні значення нормативних параметрів завжди відрізняються від

номінальних (і можуть виходити за межі допусків) внаслідок зміни умов, в яких ведеться процес.

Ці умови також характеризуються певними параметрами і можуть бути (для зручності) згруповані за деякими ознаками.

Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. До цієї групи параметрів відносяться параметри незамороженого продукту ($F_{пр}$, $\Theta_{пр.вх}$)

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного обладнання ззовні і витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи ставляться тиск P_x і витрати F_x холодоагенту, напруга і частота мережі U, f .

Механічні або інші специфічні параметри технологічного обладнання характеризують стан її робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо конструктивні параметри спірального фрізера δ_1 , швидкість обертання конвеєра (u_1) і частоту обертання вентилятора (u_2).

1.3 Аналіз існуючих САК технологічного процесу заморожування курятини

На всіх етапах шокової заморозки м'яса для забезпечення його високої якості необхідно строго виконувати технологічний регламент заморозки. Зокрема підтримувати задану температуру у зонах температури замороження та температури готового продукту. Порушення регламенту може призводити до браку продукції та відповідно зниженню прибутку.

На етапах розробки САУ, в якості одного з головних критеріїв, що характеризують доцільність її створення і ефективність її застосування є оцінка якості виконання поставленого перед САУ завдання, зокрема, для завдань регулювання, підтримку параметрів технологічного процесу на заданих значеннях (в заданих діапазонах зміни).

На практиці, як показник якості САУ, найбільш часто використовують інтегральні критерії; причому, чим менше буде відхилення поточного значення регульованої змінної від заданого (передбаченого регламентом), тим показник якості буде кращим.

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 шокової заморозки м'яса як об'єкта керування.

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

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

Задачею функціонування спірального фрізера, є заморожування курятини, тому дотримання всіх регламентів функціонування у її роботі дуже важливе.

Ціллю управління об'єктом: не допустити вихід за допустимі значення технологічних параметрів, а саме:

- Температура готового продукту ($\theta_{гп}$);
- Температура заморозки ($\theta_з$);

Таким чином, проаналізувавши фрізер з точки зору задачі регулювання, можна сказати, що необхідно побудувати 2-х канальну систему автоматизованого регулювання перерахованих параметрів.

Структурна схема процесу заморожування курятини наведена на рис. 1.5

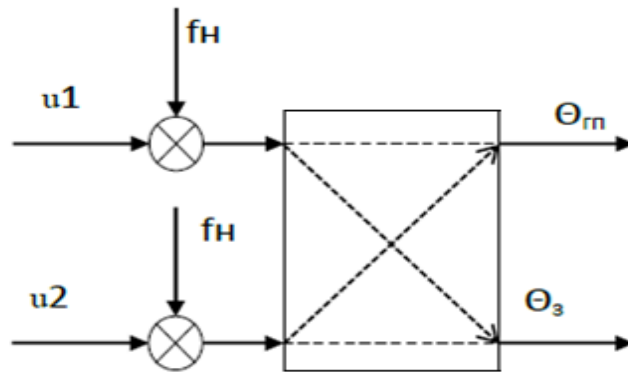


Рис 1.5– Структурна схема процесу автоматизації заморожування курятини як об'єкта регулювання

Позначення на структурній схемі:

u_1 – положення регулюючого органу, що регулює швидкість обертів спірального конвеєра;

u_2 - положення регулюючого органу, що регулює частоту обертів вентилятора;

f_1 - вектор неконтрольованих збурень;

f_2 - вектор неконтрольованих збурень;

$\theta_{гп}$ – температура готового продукту ;

$\theta_з$ - температура заморозки в камері

Ідентифікація моделей каналів перетворення об'єкта регулювання

Нам відомо, що температура готового продукту та температура заморозки змінюються в невеликих діапазонах, тому можна вважати їх моделі лінійними в цих діапазонах.

Для отримання необхідної інформації, а саме, отримання статичних характеристик каналів регулювання з подальшою процедурою ідентифікації доцільно проводити активний експеримент.

За допомогою зміни управляючого впливу (сигнал частотного регулятора на обертання вентилятора на 60%) досягти значення $\theta_з = -36^{\circ}\text{C}$, дочекатися закінчення перехідного процесу. Змінити управляючий сигнал на 10% ступінчатим образом, отримавши 70% частоти обертів вентилятора. При цьому значення $\theta_з$ буде

дорівнювати $-38,5^{\circ}\text{C}$. Після цього змінили положення регулюючого органу, досягнувши початкового значення.

За допомогою зміни управляючого впливу (сигнал частотного регулятора на швидкість обертання спірального конвеєра на 60%) досягти значення $\theta_{\text{гп}}=-18^{\circ}\text{C}$, дочекатися закінчення перехідного процесу. Змінити управляючий сигнал на 10% ступінчастим образом, отримавши 70% швидкості обертів спірального конвеєра. При цьому значення $\theta_{\text{гп}}$ буде дорівнювати -16°C .

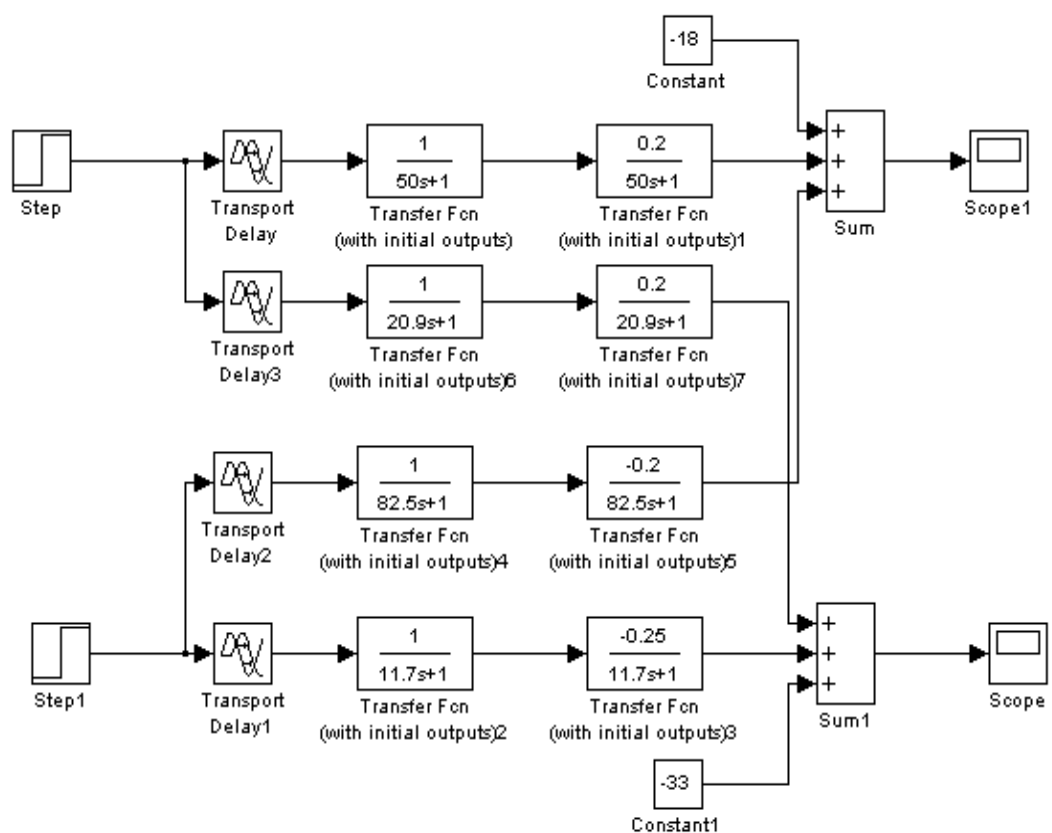


Рис.1.6– Схема моделювання повної моделі каналів ОК

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

Координатна схема процесу заморожування курятини наведена на рис. 1.5. У відповідності до замкненого принципу керування представимо схему САР базової (найпростішої) структури. Структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 1.7.

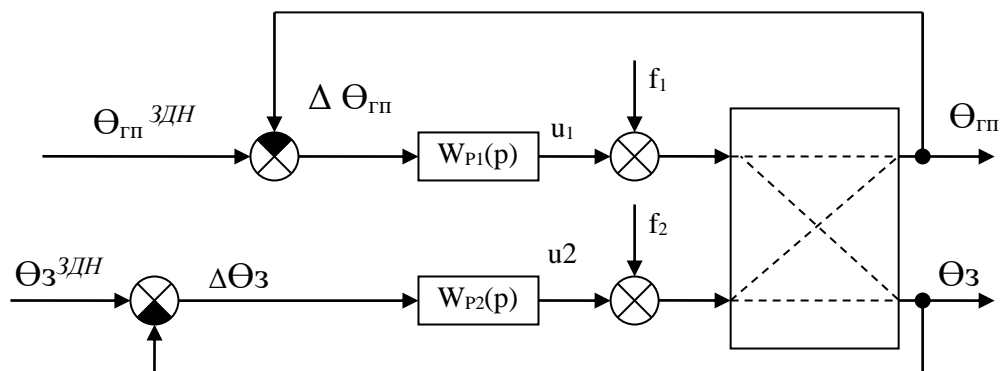


Рис. 1.7 – Структурна схема САР матиме вигляд

Позначення на схемі:

θ_3 - температура заморозки в камері, °С ;

$\theta_{гп}$ - температура готового продукту , °С ;

U_1 - положення регулюючого органу, що регулює швидкість обертів спірального конвеєра, %х.р.о.;

U_2 - положення регулюючого органу, що регулює частоту обертів вентилятора %х.р.о.;

f_1 і f_2 - вектори неконтрольованих збурень;

$W_{p1}(p)$ – передаточна функція регулятора обертів спірального конвеєра;

$W_{p2}(p)$ - передаточна функція регулятора частоти обертів вентилятора;

$\theta_{гп}^{здн}$ – задане значення температури готового продукту;

$\theta_3^{здн}$ – задане значення температури заморозки в камері;

$\Delta \theta_{гп}$ і $\Delta \theta_3$ – помилки регулювання.

Найбільш доцільним є розгляд і порівняльний аналіз ПІ й ПІД - алгоритмів регулювання, тому що з попередніх досліджень синтезу САР відомо, що найбільш ефективними є саме ці алгоритми регулювання.

Рівняння руху ПІ-регулятора

$$W_P(p) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{ИЗ}p} \right)$$

Передаточна функція ПІД-регулятора

$$W_{ПИД}^P(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{ИЗ}p} + T_{ПР}p \right).$$

Скористаємося методикою розрахунку настроювальних параметрів регулятора Копеловича А.П. Тому що об'єкт регулювання є статичним і ми вибрали коливальний перехідний процес із $R_{п} = 20\%$, настроювальні параметри ПІД-регуляторів будемо знаходити по наступним формулам:

Одержимо передатну функцію регулятора по каналам

Розрахунок початкових наближень параметрів ПІ-регулятора:

Для „u1- $\theta_{ГП}$ ”:

$$K_P = \frac{0,8 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{0,8 \cdot 70}{0,2 \cdot 94} = 3 \frac{\%x.p.o.}{^{\circ}C} \quad T_{ИЗ} = 2,5 \cdot \tau_O = 2,5 \cdot 94 = 235 c$$

Для „u2- θ_3 ”:

$$K_P = \frac{0,8 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{0,8 \cdot 16,56}{0,25 \cdot 17,6} = 3 \frac{\%x.p.o.}{^{\circ}C} \quad T_{ИЗ} = 2,5 \cdot \tau_O = 2,5 \cdot 17,6 = 44 c$$

Розрахунок початкових наближень параметрів ПІД-регулятора:

Для „u1- $\theta_{ГП}$ ”:

$$K_P = \frac{1 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1 \cdot 70}{0,2 \cdot 94} = 3,72 \frac{\%x.p.o.}{^{\circ}C}$$

$$T_{ИЗ} = 2 \cdot \tau_O = 2 \cdot 94 = 188 c$$

$$T_{ПР} = \tau_o = 94 c$$

Для „u2- θ_2 ”:

$$K_P = \frac{1 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1 \cdot 16,56}{0,25 \cdot 17,6} = 3,76 \frac{\%x.p.o.}{^{\circ}C}$$

$$T_{ИЗ} = 2 \cdot \tau_O = 2 \cdot 17,625 = 32,25 c$$

$$T_{ПР} = \tau_O = 17,6 c$$

Для оптимального параметричного синтезу САР заморозування курятини з ПІ-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 1.8. Результати оптимізації налаштувань ПІ-регулятора наведені на рис. 1.9.

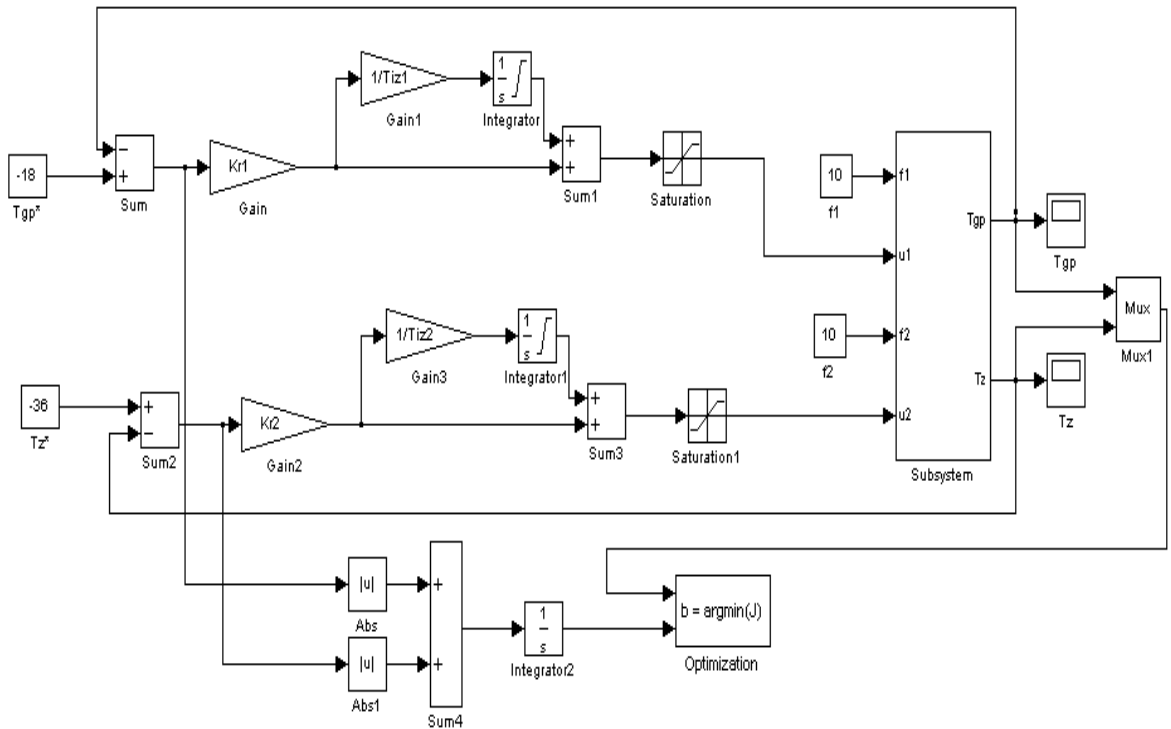


Рис 1.8– Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором

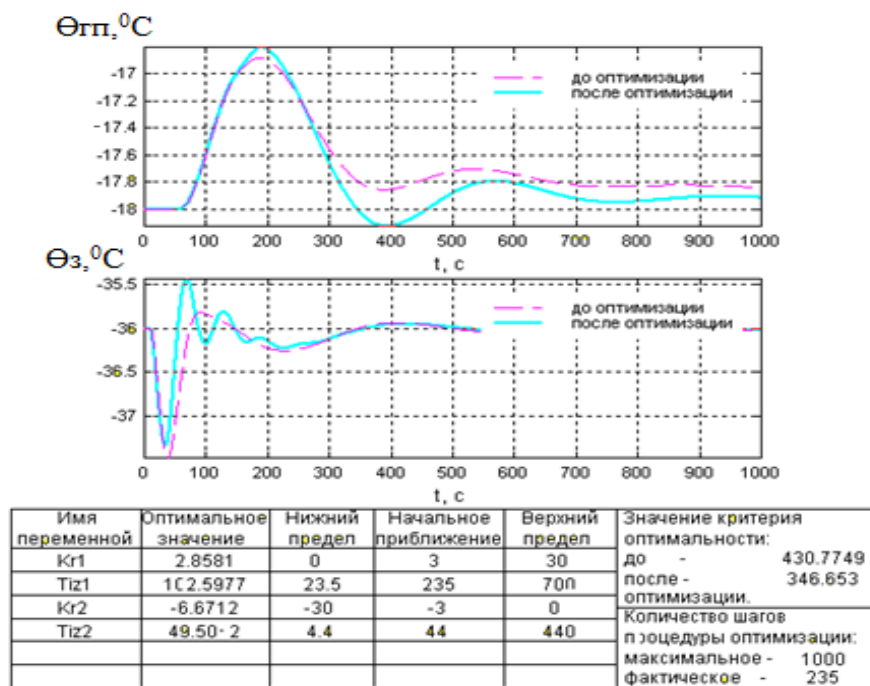


Рис 1.9 – Результати оптимізації ПІ – регулятора

Для оптимального параметричного синтезу САР заморожування курятини з ПД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 1.10. Результати оптимізації налаштувань ПД-регулятора наведені на рисунку 1.11.

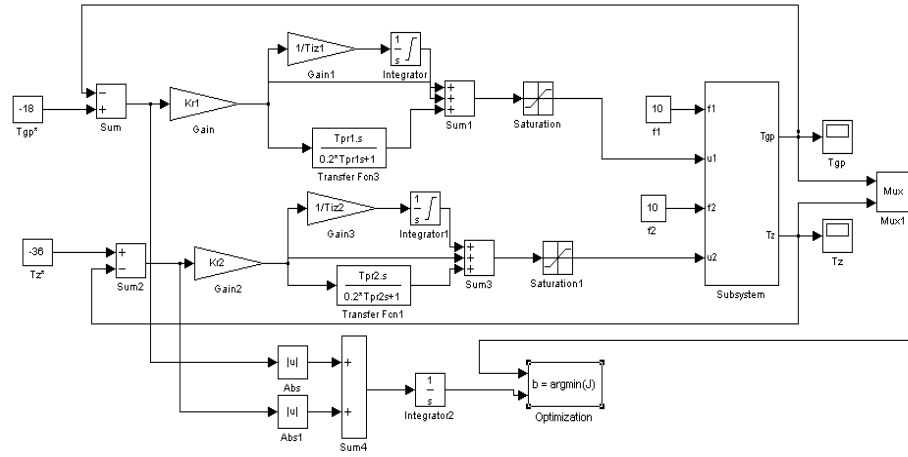
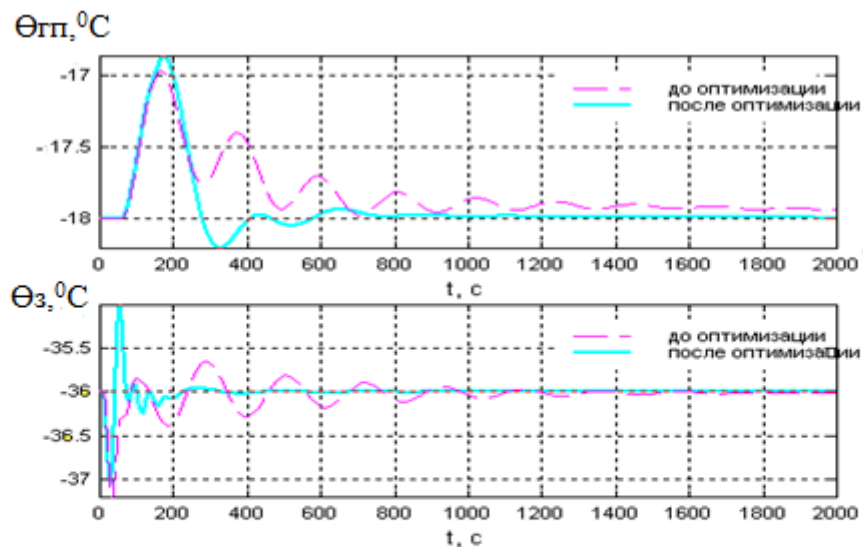


Рис 1.10 - Схема оптимізації САР з ПД – регулятором



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr1	4.1052	0.372	3.72	37.2	до - 535.5991
Tiz1	63.0545	18.8	188	1888	после - 237.9682
Tpr1	50.329	9.4	94	940	оптимизации.
Kr2	-8.156	-37.6	-3.76	0	Количество шагов
Tiz2	10.1713	3.325	32.25	322.5	процедуры оптимизации:
Tpr2	10.6739	1.76	17.6	176	максимальное - 1000
					фактическое - 956

Рис 1.11 - Результаты оптимізації ПД – регуляторів

Порівняльний аналіз перехідних процесів в параметричних оптимальних системах за значенням критерію оптимальності та показниками, для яких встановлені гранично-допустимі значення. Результати порівняння варіантів САР наведені на рис. 1.12, 1.13 і в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Порівняння показників якості роботи каналів

Канали	Δ Θ^{\max}	$t_{\text{рег}}$	Крите рій
ПІ-регулятор			
„u1- $\theta_{\text{гп}}$ ”	1,2	560	412,6
„u2- θ_3 ”	1,4	230	
ПІД-регулятор			
„u1- $\theta_{\text{гп}}$ ”	1,1	320	238
„u2- θ_3 ”	1,05	110	

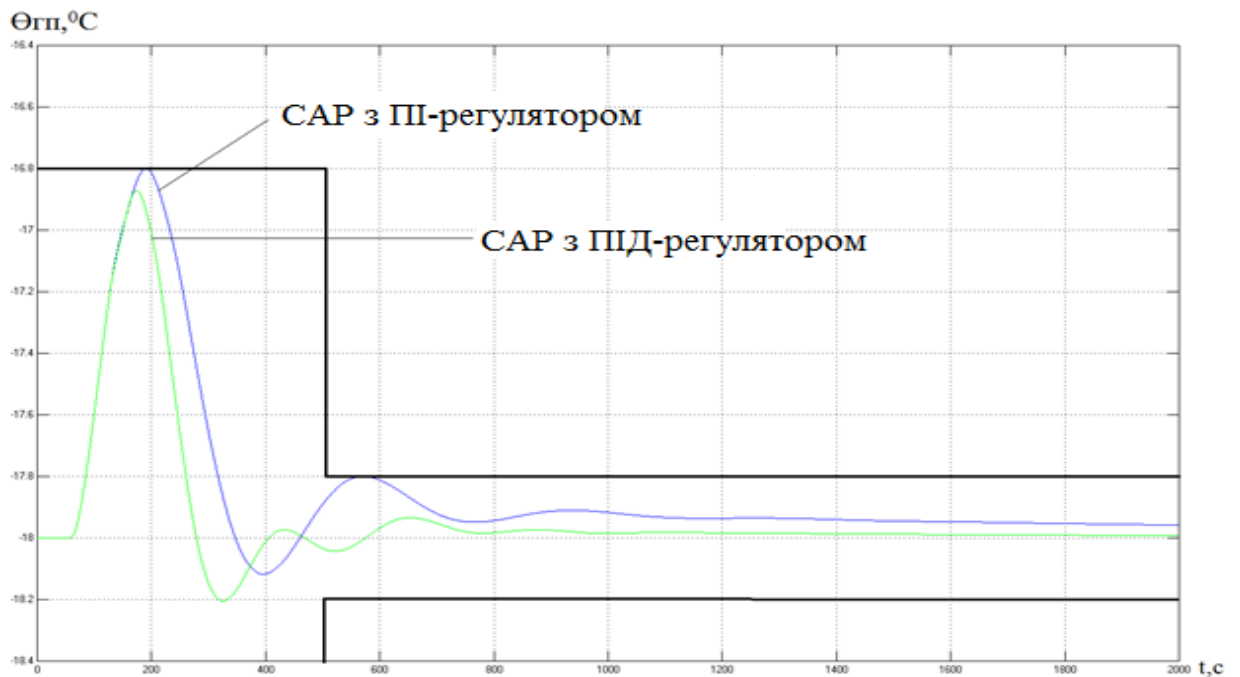


Рис 1.12 – ПХ САУ з оптимальними настройками ПІ і ПІД-регуляторів по каналу „u1- $\theta_{\text{гп}}$ ”

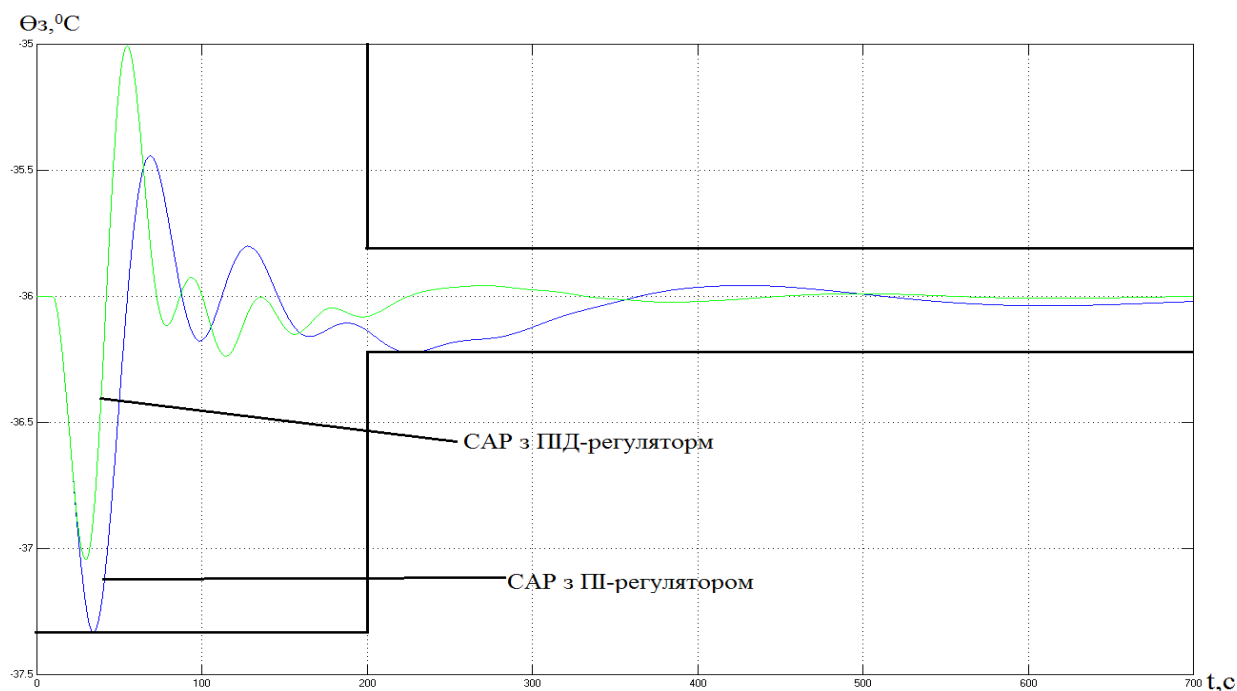


Рис 1.13 – ПХ САУ з оптимальними настройками ПІ і ПД-регуляторів по каналу „ $u_2 - \theta_3$ ”

Проаналізувавши отримані результати, можемо зробити висновок, що САУ з ПД- регуляторами більш працездатна, ніж САУ з ПІ-регуляторами. Знаючи фізичні властивості об'єкта, можемо припустити, що властивості ОУ не змінюються у великих діапазонах, тому доцільно перевіряти грубість системи при варіації параметрів об'єкта $\pm 20\%$. Варіативними параметрами будуть коефіцієнт передачі і час запізнювання ОУ. Активний експеримент по оцінці грубості будемо проводити на ЕОМ за допомогою блоку оптимального параметричного синтезу САУ та аналізу її грубості.

Представимо результати машинного експерименту перевірки на грубість САУ з ПД - алгоритмом управління:



Рис 1.14 – Результат перевірки системи на грубість.

Виходячи з результатів перевірки системи на грубість, можна зробити висновок про працездатність розглянутої системи автоматичного регулювання.

Проведемо аналіз грубості сталих процесів в САР при стохастичних входніх впливах.

1.6 Висновки за розділом

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

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП ЗАМОРОЖУВАННЯ КУРЯТИНИ

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

Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САУ процесом заморозки м'яса.

В умовах, коли змінюються характеристики сировини, параметри енергоносіїв найкращий режим заморозки м'яса з підвищенням швидкості спірального конвеєра та швидкістю вентиляторів, який забезпечує мінімум питомих витрат електричної енергії на сушіння (або максимум кількості замороженої курятини на одиницю витраченої електричної енергії) заздалегідь не відомий і потрібно забезпечити його пошук.

Тобто для забезпечення максимальної ефективності роботи заморозки м'яса недостатньо реалізації функцій регулювання, необхідно забезпечити пошук найкращого, за конкретних умов роботи, заморозки м'яса (температури в камері на вході заморозки при фіксованому значенні витрат електроенергії) Цей пошук і складатиме сутність функції оптимізації, яка буде реалізована процесом заморозки м'яса, що розробляється САУ. Додатково приймаємо, що в процесі пошуку найкращого підвищення продуктивності заморозки м'яса в фризери не порушуватиметься.

Так як показник ефективності (кількість заморозки м'яса на одиницю витраченої електричної енергії) функції від швидкості спірального конвеєру має екстремальний характер, завдання оптимізації є однокритеріальним, об'єкт оптимізації одномірний, то реалізацію функції оптимізації проведемо на основі системи екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму.

Етапи розробки модернізованої системи управління будуть розглянуті в наступних розділах.

2.2 Доопрацювання математичної моделі ОР до моделі ОО на вирішення завдання оптимального управління.

Для побудови екстремальної системи оптимізації з запам'ятовуванням екстремуму модель ОР була дороблена. Розроблений раніше об'єкт регулювання не передбачав нелінійні статичні властивості об'єкта регулювання за каналом $U_2 - \Theta_{гп}$, тому існуюча модель ОК була доповнена спрощеною моделлю статичної характеристики з екстремумом за каналом $U_2 - \Theta_{гп}$. Модель статички представлена наступною нелінійною квадратичною залежністю:

$$\Delta\Theta_{гп} = a*(U_2 - U_{2_e})^2 + \Delta\Theta_{гп_e}$$

Де

U_{2_e} і $\Delta\Theta_{гп_e}$ – координати екстремуму,

a – коефіцієнт крутості параболи.

2.3 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності

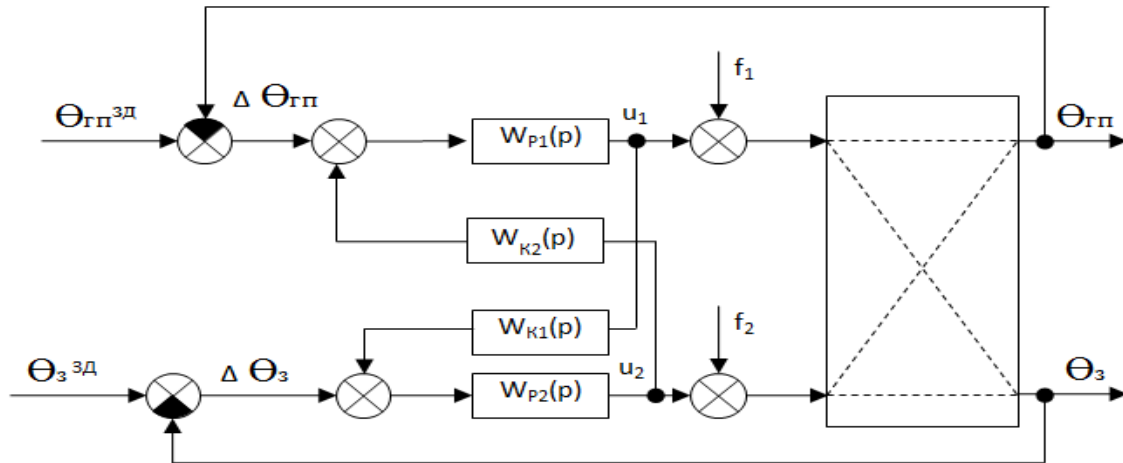


Рис 2.1 – Структурна схема двовимірної САР з між регуляторними коригуючими зв'язками

Позначення на схемі:

$\theta_з$ – температура заморозки в камері, °С ;

$\theta_{ГП}$ – температура готового продукту , °С ;

U_1 – положення регулюючого органу, що регулює швидкість обертів спірального конвеєра, %х.р.о.;

U_2 – положення регулюючого органу, що регулює частоту обертів вентилятора %х.р.о.;

f_1 і f_2 – вектори неконтрольованих збурень;

$W_{P1}(p)$ – передаточна функція регулятора обертів спірального конвеєра;

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

$W_{K2}(p)$ – передаточна функція коригуючого зв'язку;

$W_{P2}(p)$ - передаточна функція регулятора частоти обертів вентилятора;

$\theta_{ГП}^{зд}$ – задане значення температури готового продукту;

$\theta_з^{зд}$ – задане значення температури заморозки в камері;

$\Delta\theta_{ГП}$ і $\Delta\theta_з$ – помилки регулювання.

Запишемо передавальну функцію між регуляторного перехресного зв'язку, що забезпечує автономність сепаратних САР для розглянутої САР.

$$W_{K_1}(p) = -\frac{W_{u1-T_3}^o(p)}{W_2^p(p) \cdot W_{u2-T_3}^o(p)}$$

$$W_{u1-T_3}^o(p) = \frac{0,2 \cdot e^{-45.5p}}{28.75p + 1}$$

$$W_{u2-T_3}^o(p) = \frac{-0.25 \cdot e^{-17.6p}}{16.56p + 1}$$

$$W_2^p(p) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{из}p} + T_{пр}\right) = -3.76 \cdot \left(1 + \frac{1}{32.25p} + 17.6p\right)$$

$$W_{K_1}(p) = -0.21 \frac{534.06p^2 + 32.25p}{16318.5p^3 + 1494.8p^2 + 61p + 1} \cdot e^{-27.9p}$$

$$W_{K_2}(p) = -\frac{W_{u2-T_{ГП}}^o(p)}{W_1^p(p) \cdot W_{u1-T_{ГП}}^o(p)}$$

$$W_{u2-T_{ГП}}^o(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-176p}}{176p + 1}$$

$$W_{u1-T_{ГП}}^o(p) = \frac{0.2 \cdot e^{-94p}}{70p + 1}$$

$$W_2^p(p) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{из}p} + T_{пр}\right) = 3.72 \cdot \left(1 + \frac{1}{188p} + 94p\right)$$

$$W_{K_2}(p) = 0.27 \frac{13160p^2 + 188p}{2160640p^3 + 40232p^2 + 308p + 1} \cdot e^{-84p}$$

2.4 Оптимальний параметричний синтез САР базової структури та аналіз результатів синтезу

Завдання визначення початкових наближень параметрів СКЗ вирішимо за допомогою оптимізаційної процедури, що забезпечує максимальне наближення перехідної характеристики СКЗ до перехідній характеристиці не спрощеної фізично реалізованої СКЗ.

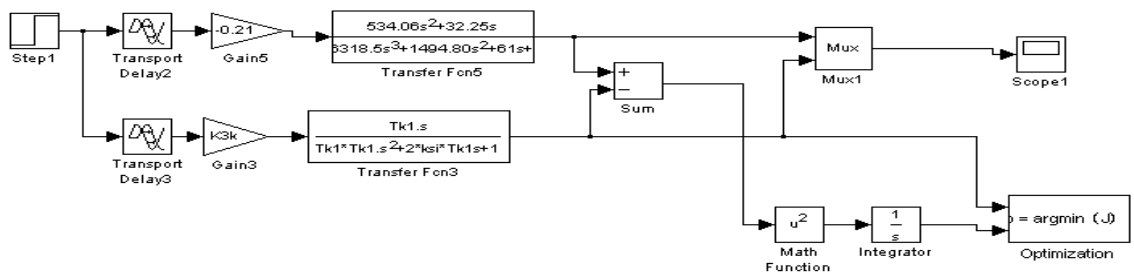
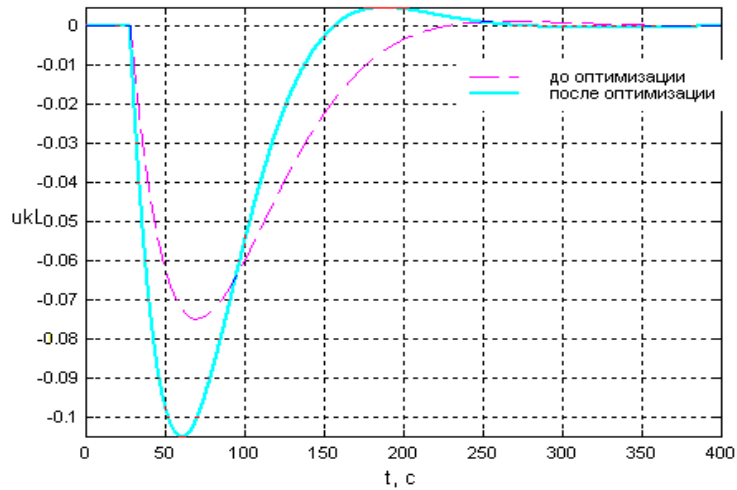


Рис 2.2 – Оптимізаційна процедура визначення початкових параметрів W_1^k



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kk	-0.22902	-1.75	-0.175	-0.0175	до - 0.065377
Tk1	28.9867	3.87	38.7	387	после - 0.00079283
ksi	0.70206	0.079	0.79	7.9	оптимизации.
					Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 75

Рис 2.3 – Результат процедуры визначення початкових параметрів W_1^k

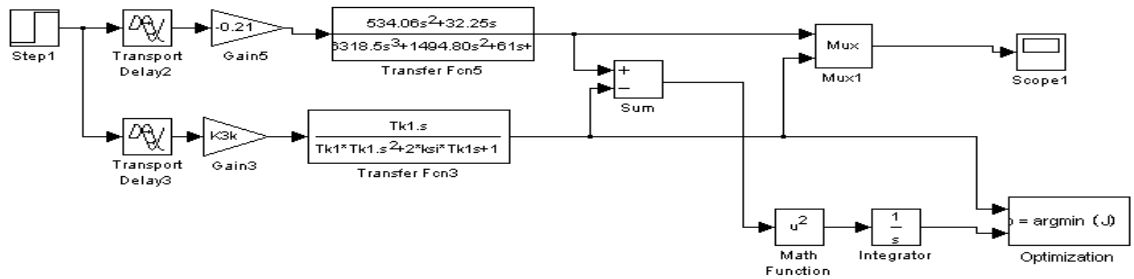
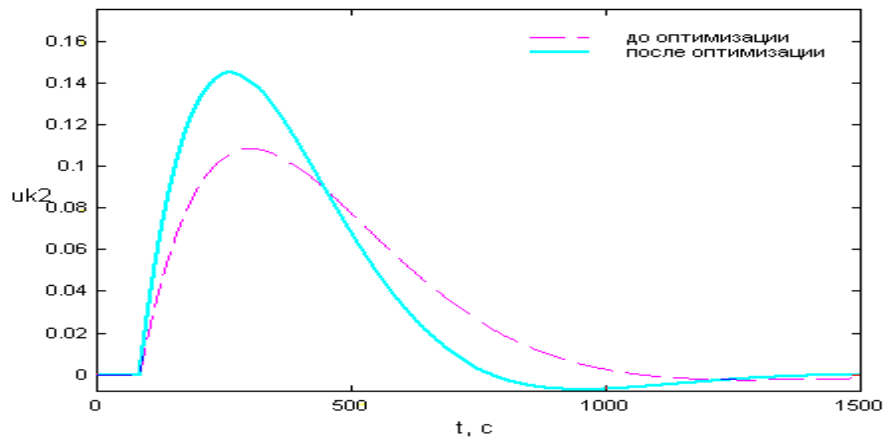


Рис 2.4 – Оптимізаційна процедура визначення початкових параметрів W_2^k



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kk	0.31356	0.025	0.25	2.5	до - 0.49411
Tk1	159.2148	20.06	200.6	2006	после - 0.0078043
ksi	0.69219	0.077	0.77	7.7	оптимизации.
					Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 89

Рис 2.5 – Результат процедуры визначення початкових параметрів W_2^k

Проведемо параметричний оптимальний синтез САР підвищеної динамічної точності для детермінованих (ступінчастих) вхідних впливів. Результати наведені на рис 2.6 – 2.7

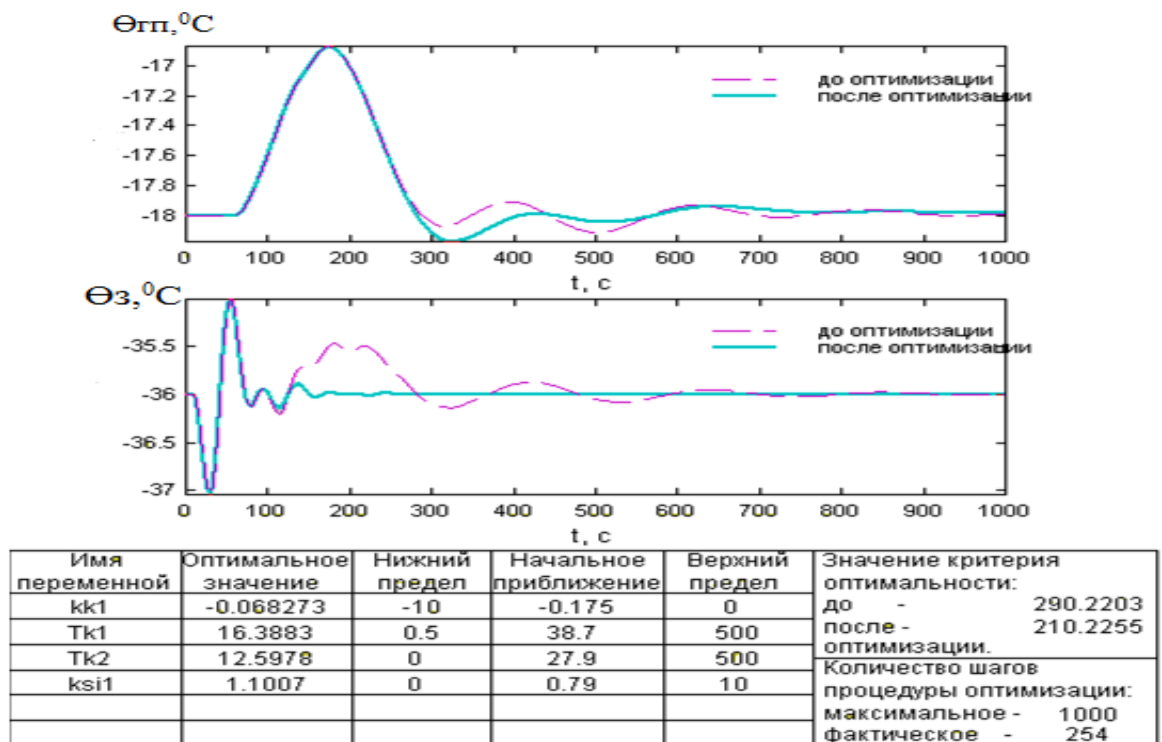


Рис 2.6 – Результати процедури оптимізації параметрів СКЗ

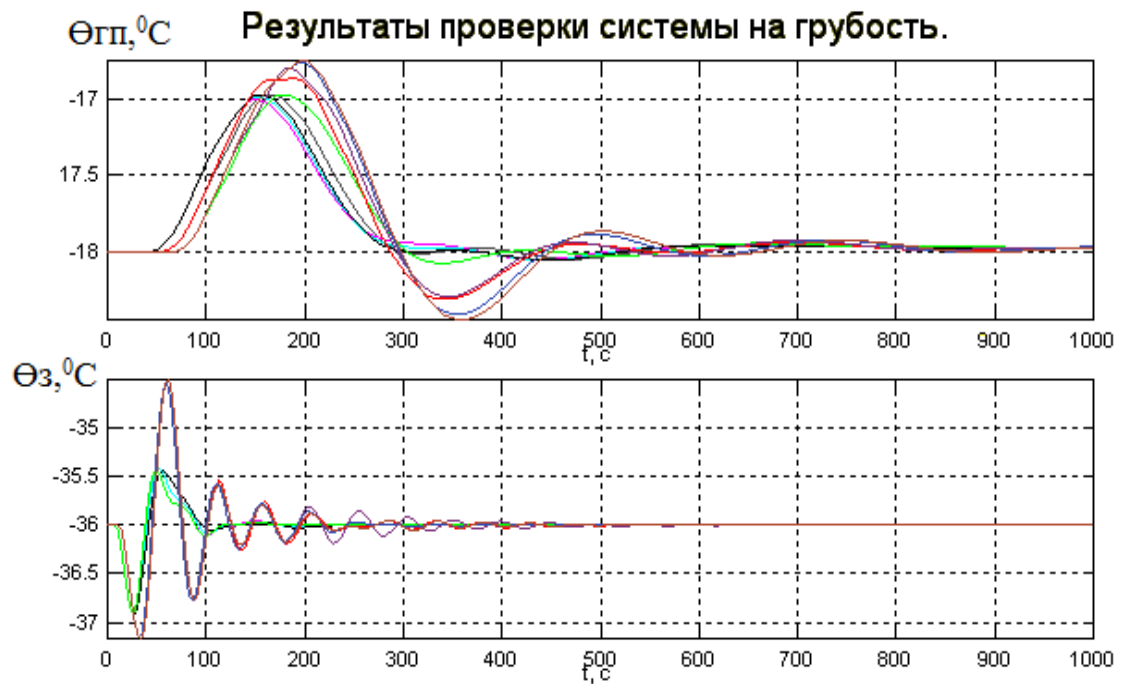


Рис 2.7 – Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість

Виходячи з результатів перевірки системи на грубість, можна зробити висновок про працездатності розглянутої системи автоматичного регулювання підвищеної динамічної точності.

Аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіації параметрів об'єкта регулювання.

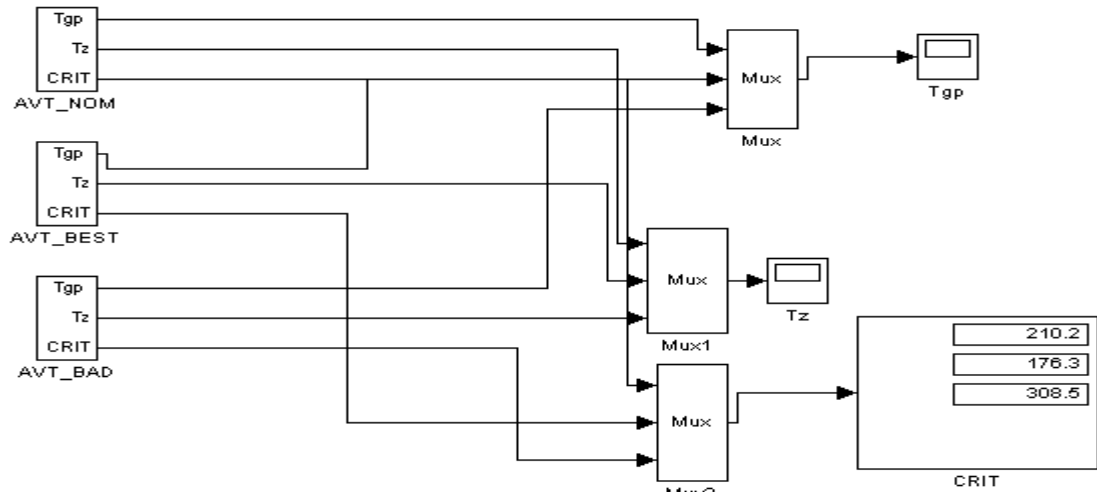


Рис 2.8 – Схема моделювання для аналізу грубості САР в сталих режимах

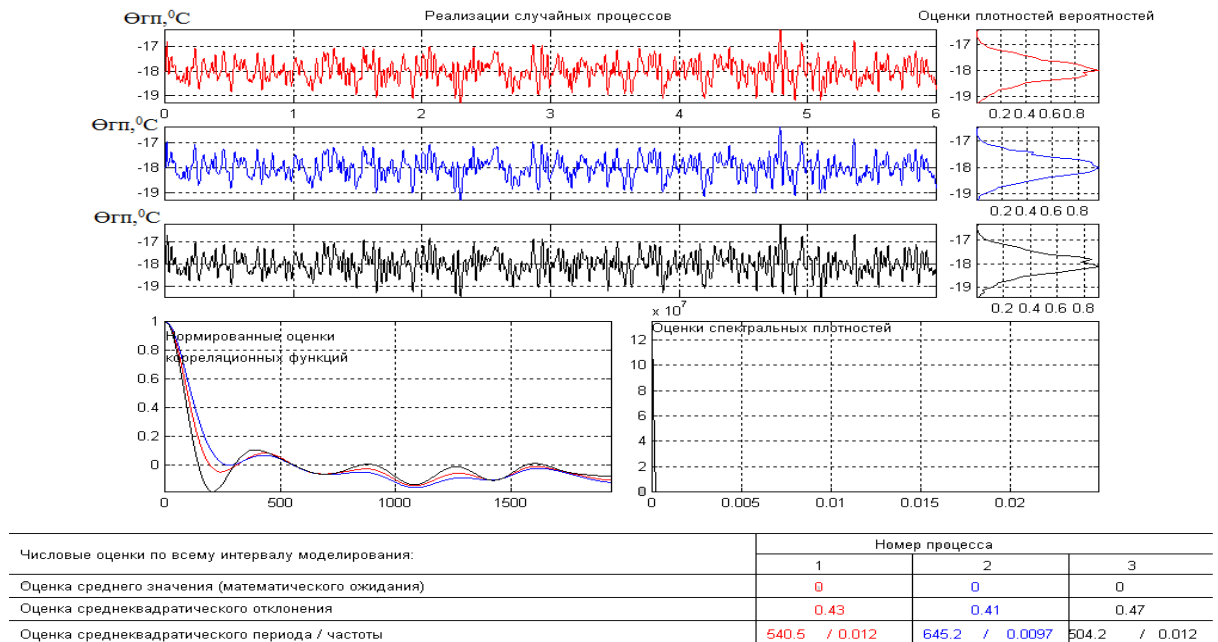
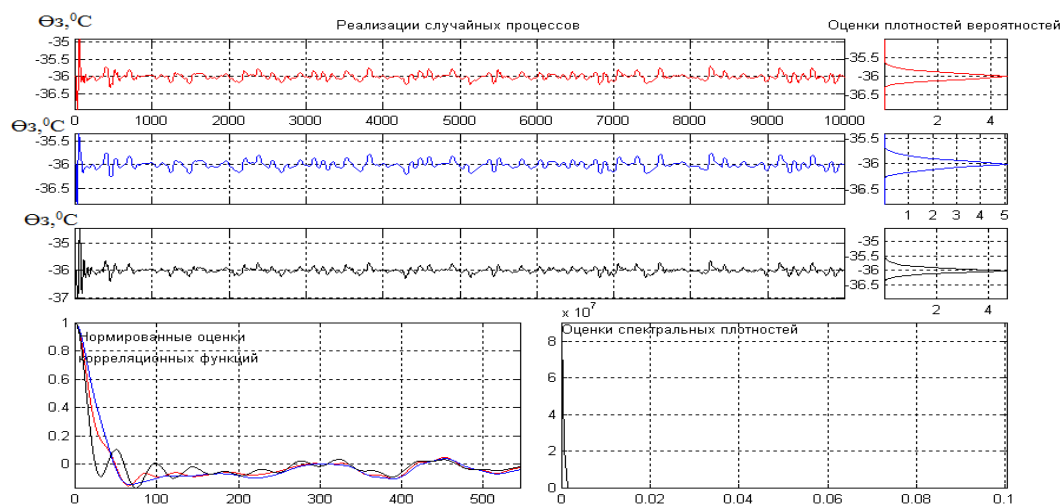


Рис 2.9 - Результат моделювання САР підвищеної динамічної точності по каналу

„ $u_1 - \theta_{gp}$ ”



Числовые оценки по всему интервалу моделирования:	Номер процесса		
	1	2	3
Оценка среднего значения (математического ожидания)	0	0	0
Оценка среднеквадратического отклонения	0.11	0.096	0.12
Оценка среднеквадратического периода / частоты	133.3 / 0.047	181.8 / 0.035	125.0 / 0.05

Рис 2.10 – Результат моделювання САР підвищеної динамічної точності по каналу „ $u_2-\theta_3$ ”

Таблиця 2.1 Результати оцінки САР підвищеної динамічної точності на грубість в сталих режимах

Показники якості	Регульовані координати					
	$\theta_{гп}$			θ_3		
	Сполучення параметрів ОУ					
	Номінальне	Несприятливе для	Найсприятливіше для	Номінальне	Несприятливе для управління	Найсприятливіше для управління
Оцінка математичного очікування	-18	-18	-18	-36	-36	-36
Оцінка середньо квадратичного відхилення	0,58	0,59	0,58	0,11	0,12	0,096
Оцінка середньо квадратичного періода	246,9	246,6	246,9	133,3	125	181,8

Порівняльний аналіз САР найпростішої структури і підвищеної динамічної точності.

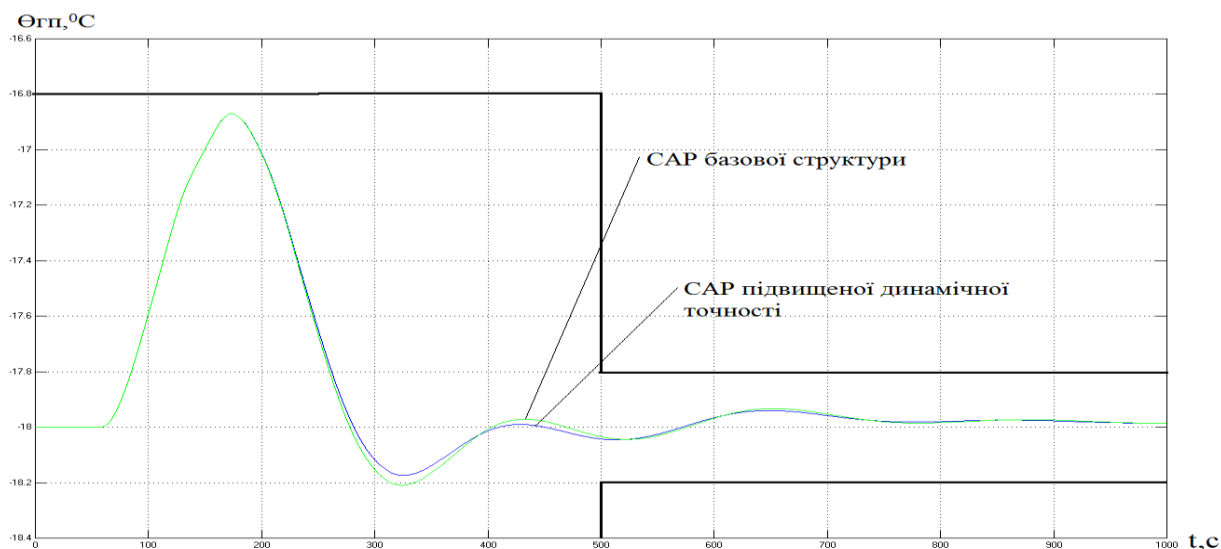


Рис 2.11 – Перехідні процеси звичайної САР и САР із СКЗ по каналу „ $u_1-\theta_{\pi}$ ”

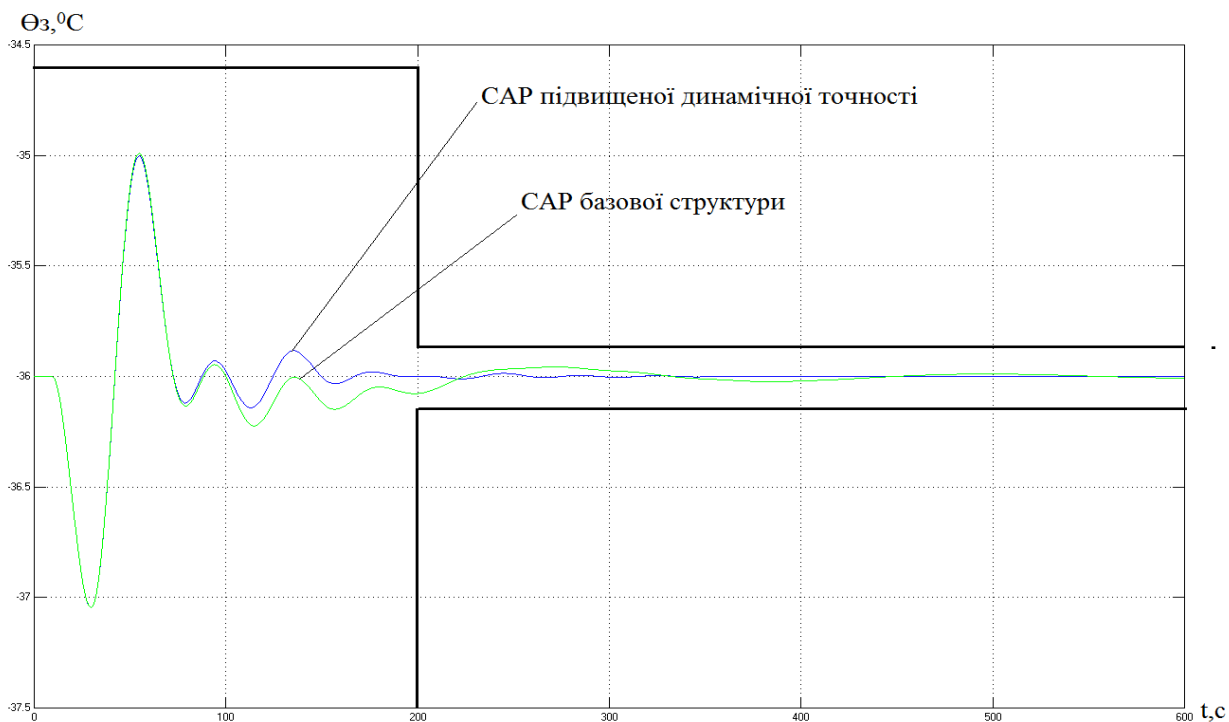


Рис 2.12 – Перехідні процеси звичайної САР и САР із СКЗ по каналу „ $u_2-\theta_z$ ”

Таблиця 2.2 - Порівняння показників якості роботи обох САР:

Канали	$\Delta \Theta_{\max}$	$t_{\text{пер}}$	Критерій
Базова САР			
„u1- $\theta_{\text{гп}}$ ”	1,1	320	238
„u2- $\theta_{\text{з}}$ ”	1,05	120	
Підвищеної динамічної точності САР			
„u1- $\theta_{\text{гп}}$ ”	1,1	262	210,2
„u2- $\theta_{\text{з}}$ ”	1,05	68,5	

Порівняльний аналіз сталих процесів в параметрично оптимальних (або детермінованих вхідних впливів) САР за інтегральними показниками та показниками, на які встановлено гранично-допустимі значення.

Для порівняння якості роботи САР базової структури і підвищеної динамічної точності в сталих режимах розроблена структурна схема моделювання, наведена на рис. 2.13. Результати порівняння наведені на рис. 2.14- 2.15 і в таблицях 2.3.

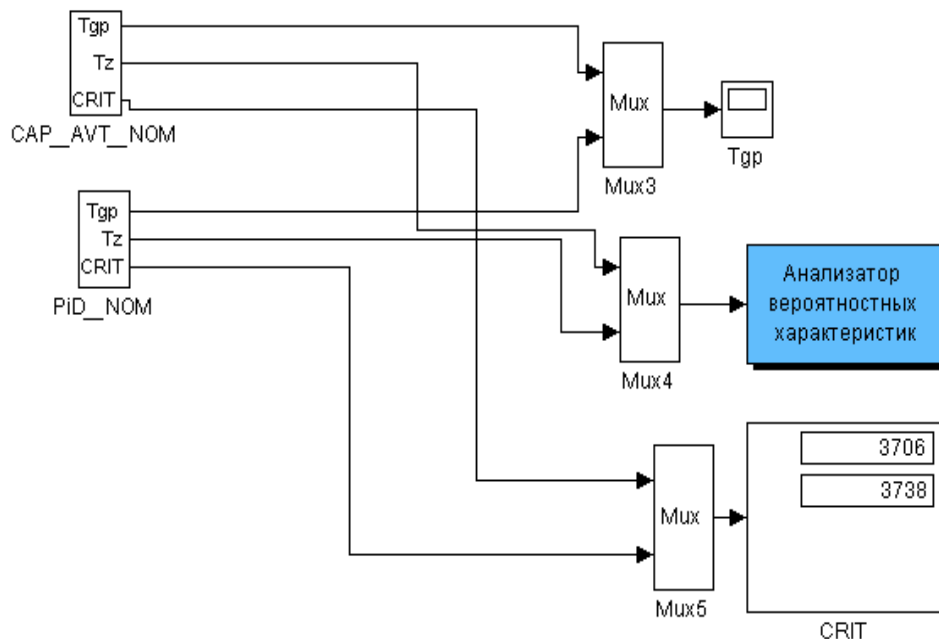
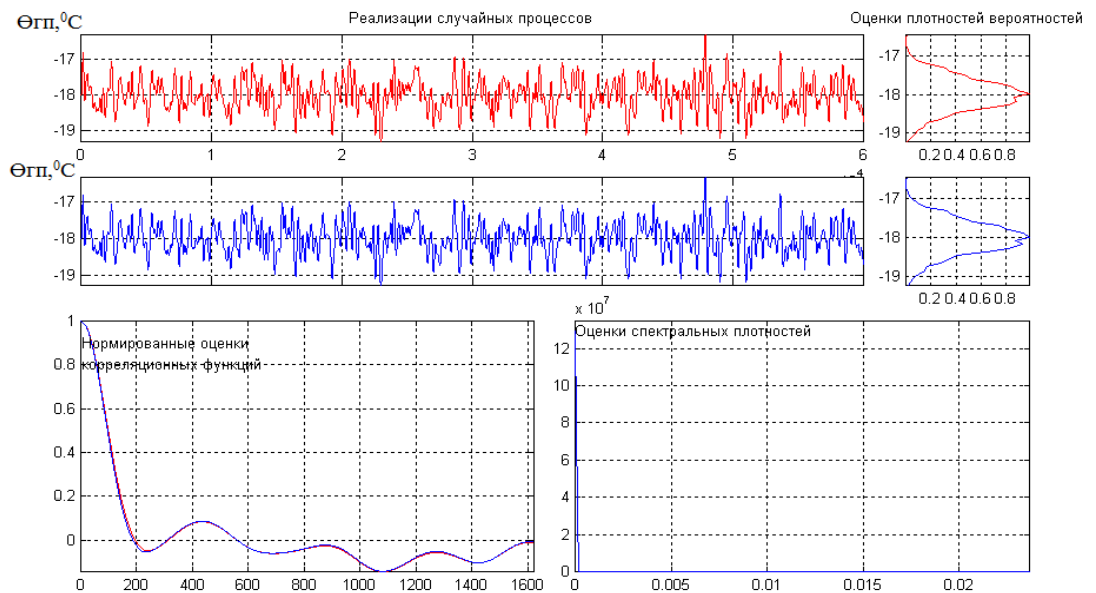
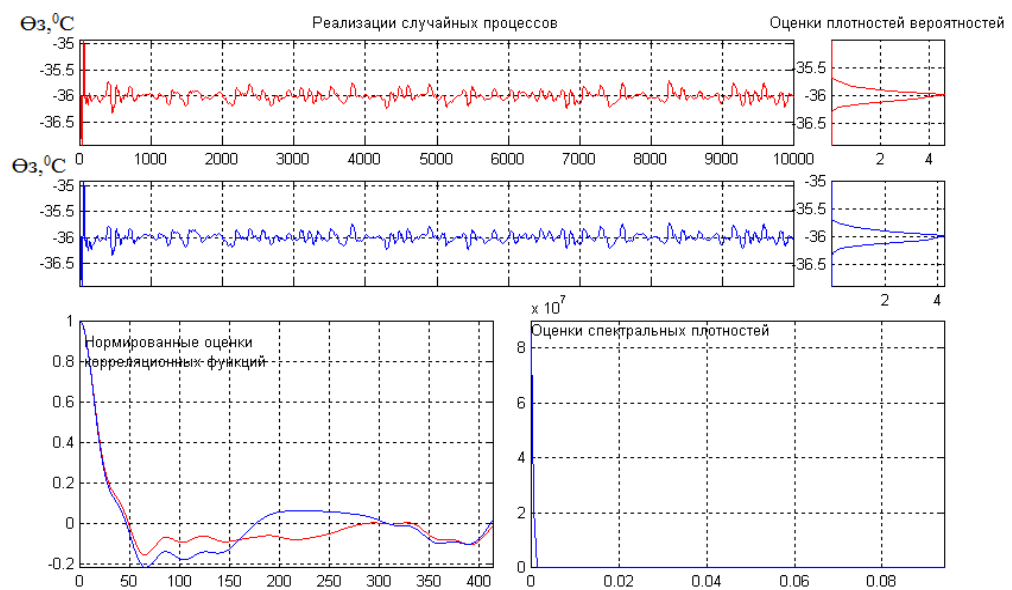


Рис 2.13 - Структурна схема моделювання



Числовые оценки по всему интервалу моделирования:	Номер процесса	
	1	2
Оценка среднего значения (математического ожидания)	0	0
Оценка среднеквадратического отклонения	0.43	0.43
Оценка среднеквадратического периода / частоты	540.5 / 0.012	531.0 / 0.012

Рис 2.14 Порівняльна характеристика САР з СКЗ та без СКЗ за каналом „ $u_1-\theta_{\pi}$ ”



Числовые оценки по всему интервалу моделирования:	Номер процесса	
	1	2
Оценка среднего значения (математического ожидания)	0	0
Оценка среднеквадратического отклонения	0.11	0.11
Оценка среднеквадратического периода / частоты	133.3 / 0.047	137.9 / 0.046

Рис 2.15 Порівняльна характеристика САР з СКЗ та без СКЗ за каналом „ $u_2-\theta_3$ ”

Табл.2.3- Результати порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах за каналом „ $u_1-\theta_{гп}$ ” та „ $u_2-\theta_3$ ”

По каналу „ $u_1-\theta_{гп}$ ”		
Показники якості	Структура САР	
	Базова	Підвищеної динамічної точності
Математичне очікування	-18	-18
Середньоквадратичне відхилення	0,43	0,43
Середньоквадратичний період	531/0,012	540/0,012
Інтегральний критерій	3738	3706
По каналу „ $u_2-\theta_3$ ”		
Показники якості	Структура САР	
	Базова	Підвищеної динамічної точності
Математичне очікування	-18	-18
Середньоквадратичне відхилення	0,11	0,11
Середньоквадратичний період	133,3/0,0 47	137,9/0,046
Інтегральний критерій	3738	3706

2.5 Недоліки існуючих САК і формулювання мети вдосконалення систем автоматичного керування процесом заморозки м'яса.

Розглянуті у пункті 1.5 варіанти САУ процесом заморозки м'яса обмежуються функціями регулювання подання м'яса в морозильну камеру та температури холодагенту, що надходить в випарник. Також передбачені різні функції блокування. Підвищення динамічної точності алгоритмів регулювання забезпечує підтримку регульованих змінних на заданих значеннях з меншими відхиленнями та дотримання технологічного та експлуатаційного регламентів.

Але в умовах, коли характеристики сировини змінюються екстремуми функцій ефективності, дрейфують стабілізуючі САР не дозволяють забезпечити найбільш ефективні режими роботи заморозки м'яса. Потрібно розширення функцій, що реалізуються САУ, наприклад, реалізація функції, що забезпечує цілеспрямоване підвищення техніко-економічних показників процесу заморозки м'яса, зокрема зниження питомих витрат електричної енергії на заморозку.

В фризерних камерах з використанням вентиляторів підвищення ефективності (зниження питомих витрат електричної енергії на заморозку) можливо за рахунок пошуку найкращого, у конкретних умовах роботи, режиму заморозки тобто значень холодного потоку який подається вентиляторами з випарника в камеру заморозки. Холодний потік визначається температурою у теплообміннику. Таким чином можна змінювати один з цих параметрів для зниження питомих витрат енергії на заморозку. Тому метою вдосконалення САУ процесом заморозки м'яса є: зниження питомих енерговитрат (питомих витрат електричної енергії) на заморозку за рахунок реалізації функції автоматичної оптимізації заморозки в камері з підвищенням швидкості спірального конвеєра та швидкістю вентиляторів

2.6 Висновки за розділом

У результаті синтезу САР підвищеної динамічної точності ми одержали систему, показники якості якої, з більше високою динамічною точністю в порівнянні із САР найпростішої структури, а головне більше грубу. Введення коригувального зв'язку в контурі регулювання, сприяє значному підвищенню динамічної точності і система стає більше працездатною й стійкою до різних змін параметрів ОУ. Зменшилися середньоквадратичне відхилення й середньоквадратичний період.

РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ШОКОВОЇ ЗАМОРОЗКИ М'ЯСА, 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

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. В цьому випадку слід використовувати у сфері управління нечітку логіку, на якій засноване нечітке управління що ближче за духом до людського мислення та природних мов, ніж традиційні логічні системи. Використання нечітких регуляторів забезпечує грубість і стабільну збіжність процесів, тому такий підхід слід вважати доцільним. Область ефективного застосування традиційних систем управління на основі стандартних ПД-регуляторів обмежена. Якщо складність об'єкта невелика але нема відповідного математичного опису каналів регулювання і при цьому є досвід управління то можливо побудувати нечітку систему. Нечітке управління виявляється особливо корисним, коли технологічні процеси надто складні для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів, або коли доступні джерела інформації інтерпретуються якісно, не точно, невизначено. 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, якщо статична характеристика об'єкта управління має де яку невизначену нелінійності але є досвід управління в окремому випадку це процесом заморозки курятини то можливо синтезувати нечітку системи управління. 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 достатньо добре представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку. Отже, спрощується і настроювання системи автоматичного регулювання.

3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійною характеристикою

При синтезі моделі процесу заморожування курятини визначено нелінійний характер статичної характеристики каналу регулювання за рахунок характеристики теплообмінного апарату що обдувається вентиляторами. Для такого процесу доцільно виконати синтез системи управління на базі апарату нечіткої логіки.

Для представлення нелінійної моделі об'єкта управління, до відповідних моделей каналів регулювання були визначені відповідні нелінійні ланки. Нелінійність було реалізовано 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, що визначають нелінійність статичних характеристик, представлена на рисунку 3.1. На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкту управління, яка є більш розширеною моделлю, завдяки включення додаткових нелінійних ланок. 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 випадку в результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_2 - \theta_3$ », 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 ПІД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

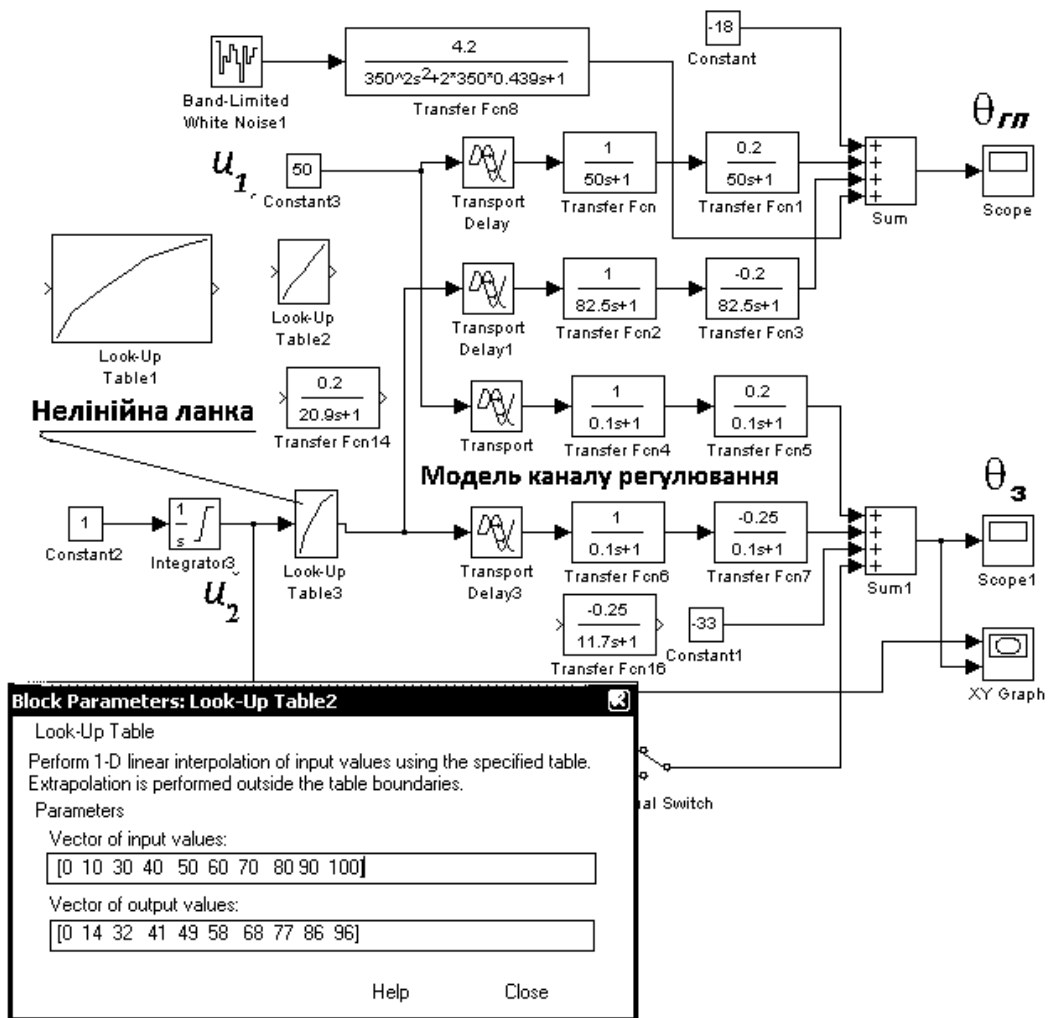


Рисунок 3.1. Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

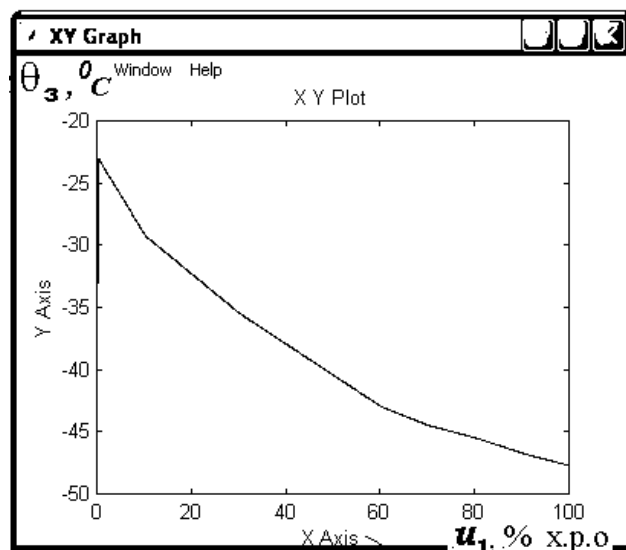


Рисунок 3.2. Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

3.3 Параметричний синтез САУ з традиційними ПД регуляторами для об'єкта з нелінійними характеристиками за каналом регулювання

У даній роботі був виконаний параметричний синтез САУ з традиційними – ПД регуляторами для об'єкта з нелінійними характеристиками за каналами регулювання. Слід зазначити, що нелінійність характеристик була реалізована в моделі, «гладкої» і несуттєвої для одержання стійких перехідних процесів при застосуванні традиційних – лінійних (П, ПІ, ПД) 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 при мінімізації за наступним інтегральним показником якості роботи системи:

$$J = \int_0^{t_M} (|\theta_3(t)| + |\theta_{ГП}(t)|) dt$$

$e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням температури заморозки в камері θ_3 ;

$e_2(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням температури готового продукту $\theta_{ГП}$.

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 настроювання регуляторів.

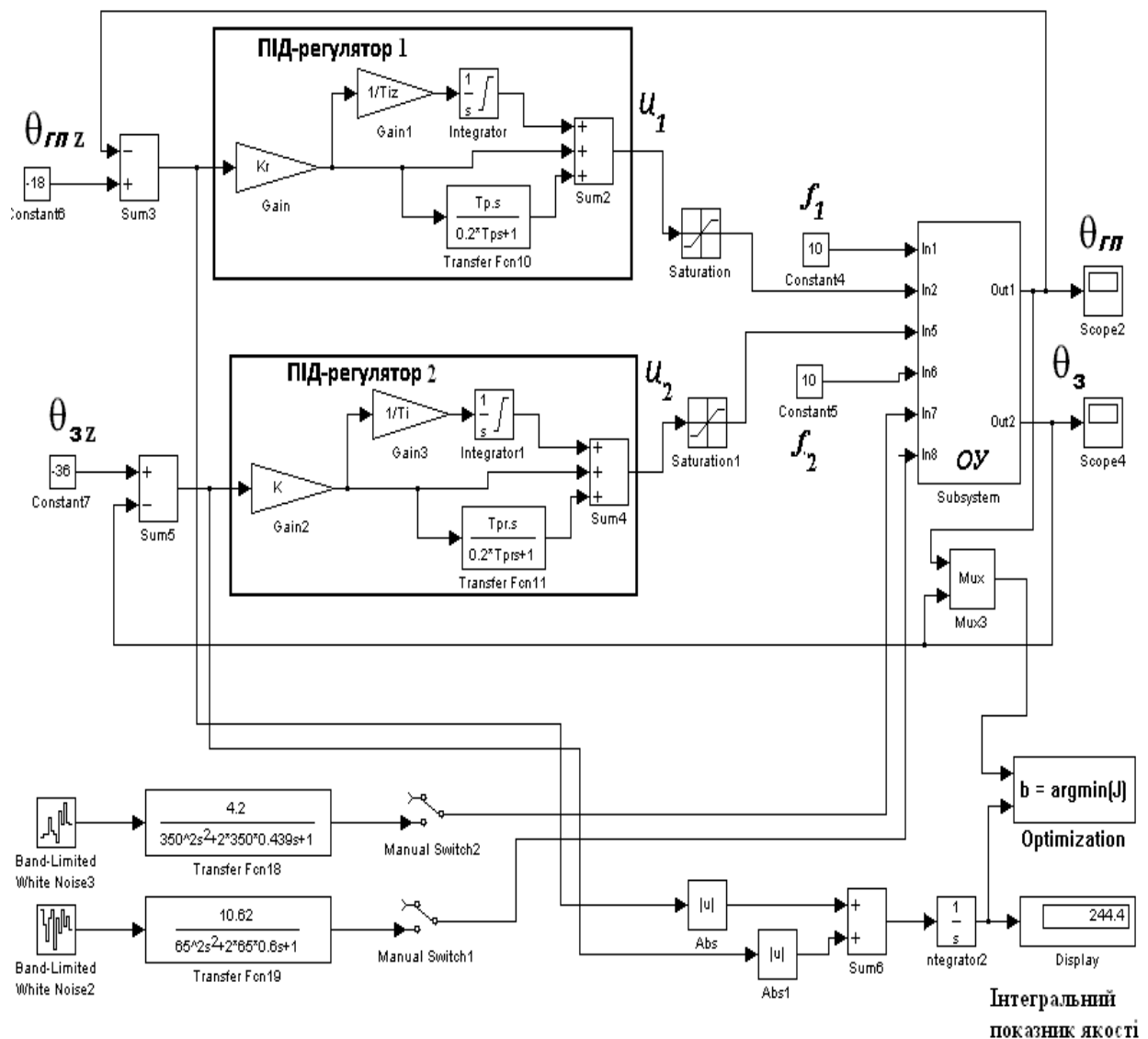


Рисунок 3.3. Структурна схема моделі САУ з традиційними ПІД-регуляторами і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB/Simulink

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів було встановлено задане значення регульованої зміни і визначені допустимі короточасні відхилення протягом часу не більше 200 секунд. Всі ці дані відповідають перехідній характеристиці представленої після оптимізації.

Відповідні початкові параметри оптимізації були введені у відповідному вікні за стандартними умовами (рисунок 3.4). Це 100 кроків оптимізації, достатньо великий діапазон пошуку значень оптимізуючи параметрів. Параметри канали регулювання були визначені при умові розгляду лінійний моделі отриманою в результаті відповідної ідентифікації.

Оптимізація

Конкретизація задачі оптимального параметричного синтезу (ОПС)

ОПС в умовах параметричної неопределенности ОУ.
 ОПС при фиксированных параметрах ОУ.

Параметри об'єкта управління (ОУ)

Ім'я параметрів:
Номинальные значения:
Нижние значения диапазонов:
Верхние значения диапазонов:

Параметри що оптимізуються (аргументи)

Ім'я параметрів:
Начальні приближення:
Нижні границі:
Верхні обмеження:

Умови оптимізації (Симплекс метод Нелдера-Мида)

Максимальна кількість кроків процедур оптимізації:
Минимальное приращение аргументов:
Минимально значимое приращение критерия:

Візуалізація результатів

Кількість графіків:
Имена переменных отображаемых на графиках:

Рисунок 3.4 Вікно вводу початкових параметрів для оптимізації САР з традиційними ПД регуляторами

Необхідно зазначити що оптимізацію проводили поетапно з урахуванням нелінійності характеристики каналу регулювання як за відповідним інтегральним показником якості роботи системи.

На рисунку 3.5 представлена вікно результату оптимізації за модульним показником на 100 кроків. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання, не помітно покращилася після оптимізації САУ. Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи управління. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

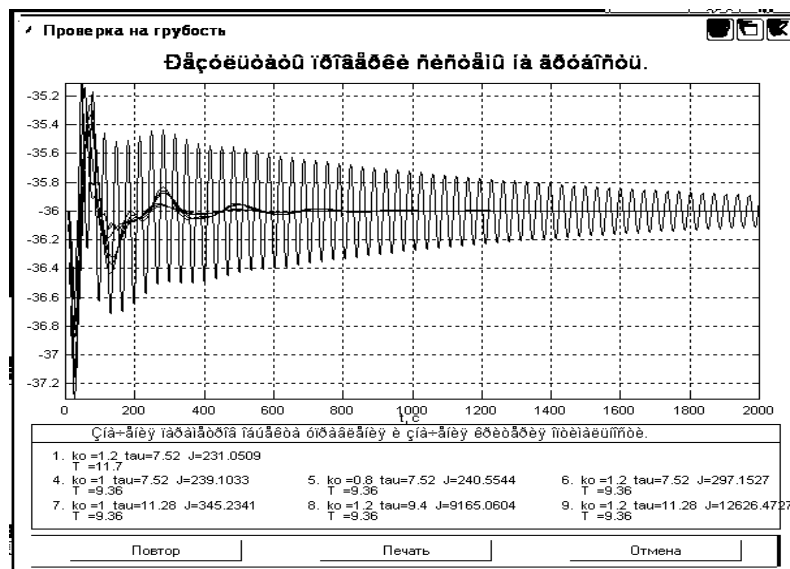


Рис. 3.6 – Результати перевірки САР на грубість

Згідно з результатами, що представлені на рисунку 3.6, можна зробити висновок що система груба при налаштуванні ПД-регулятора та оптимізації його параметрів за відповідним показником якості роботи системи.

3.4 Розробка моделі САУ з нечіткими регуляторами (НР) для об'єкта з нелінійними характеристиками за каналами регулювання

Нечітка логіка в ПД-регуляторах використовується переважно двома шляхами: для побудови самого регулятора і для організації підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора. Обидва шляхи можуть використовуватися в ПД-контролері одночасно. В нашому випадку нечітка логіка використовується для побудови самого регулятора за відомими схемами. 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 САУ із Fuzzy – нечітким регулятором.

В 1974 році Мамдани [Mamdani] показав можливість застосування ідей нечіткої логіки для побудови системи керування динамічним об'єктом, а роком пізніше вийшла публікація [Mamdani], у якій був описаний нечіткий ПІ-регулятор і його застосування для керування парогенератором. З того часу область застосування нечітких

регуляторів постійно розширюється, збільшується різноманітність їх структур і виконавчих функцій.

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазіуправління: фазіфікація, логічного висновку і дефазіфікація. Спрощена структурна схема розробляємо системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.7.

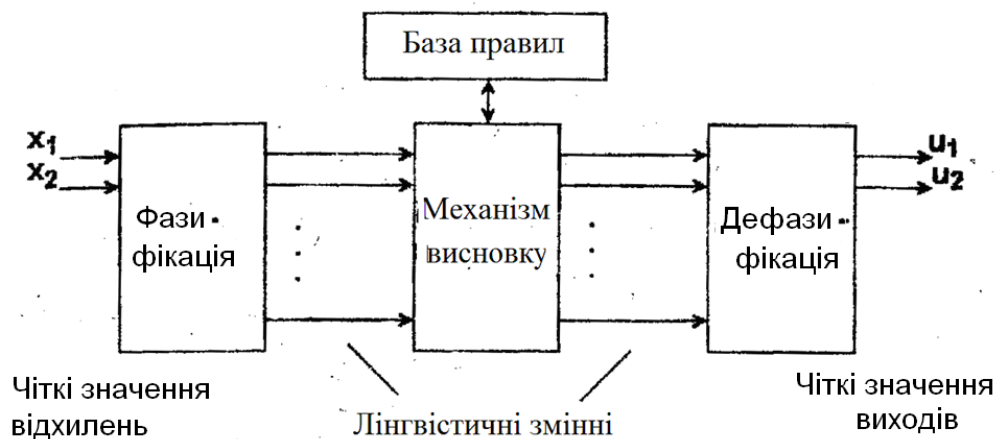


Рисунок 3.7. Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками. Всі визначені блоки (фазіфікація, блок логічного розв'язку, дефазіфікація), що представлені на рисунку 3.7, 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 3.8 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора температури заморозки в камері θ_3 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 $(x \in A_1 \mid y \in B_1)$, ТО, $z_1 = f(x_1, \dots, x_n)$,

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

де x, y - вхідні змінні, A_i, B_i - чисельні значення вхідних параметрів, $z_1 = f(x_1, \dots, x_n)$ - довільна чітка функція.

Згідно з алгоритмом вихідні правила мають функції: $z_1^* = a_1 \cdot x_0 + b_1 \cdot y_0$ та $z_2^* = a_2 \cdot x_0 + b_2 \cdot y_0$. Таким чином, результат дефазифікації обчислюється наступним чином:

$$z_0 = \frac{c_1 \cdot z_1^* + c_2 \cdot z_2^*}{c_1 + c_2}.$$

Якщо як опція f використовується поліном $f(x) = C$, то говорять про *алгоритм Сугено 0-порядку*. Тоді правила будуть мати наступний вигляд:

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

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

де C_1, C_2 □ звичайні (чіткі) числа.

Далі алгоритм виконується за наступними етапами:

1. Фазифікація вхідних змінних. На цьому етапі всім відомим конкретним значенням вхідних змінних системи нечіткого виведення ставиться у відповідність нечітку множину, тобто множина значень A_1, A_2, B_1, B_2 .

2. Агрегування передумови в нечітких правилах продукцій. Для знаходження ступеня істинності умов всіх правил нечітких продукцій, як правило, використовується логічна операція *мін-кон'юнкції*. Ті правила, ступінь істинності умов яких відмінна від нуля, вважаються активними і використовуються для подальших розрахунків.

3. Активізація висновків в нечітких правилах продукцій. Для заданого (чіткого) значення аргументу $x = x_0, y = y_0$ знаходяться ступеня істинності для передумов кожного правила. Далі знаходяться значення ступенів істинності всіх висновків

правил нечітких продукцій з використанням методу min-активізації:

$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)),$$

$$\alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)).$$

4. Акумуляція висновків нечітких правил продукцій. Фактично відсутня, оскільки розрахунки здійснюються із звичайними дійсними числами y_j .

5. Дефазифікація вихідних змінних. Використовується модифікований варіант у формі методу центру тяжіння для одноточкових множин:

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

де n – загальна кількість активних правил нечітких продукцій

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

П1: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика позитивна PE»

і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_1 = w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w_2$;

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

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

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

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

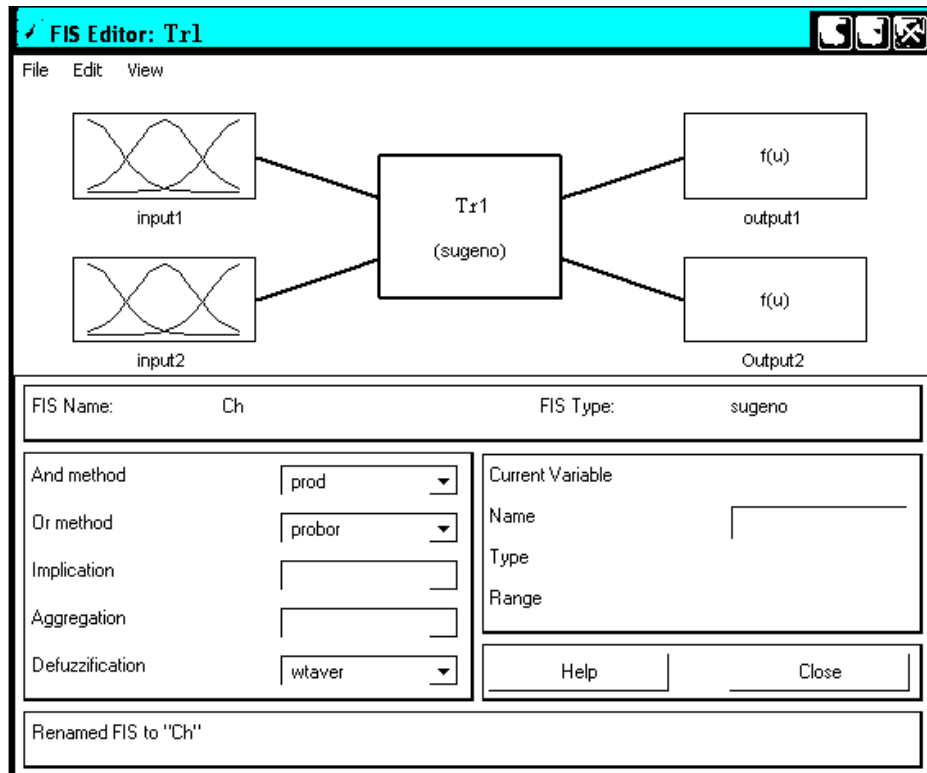


Рисунок 3.8. Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

Відповідно вище представленим правилам складемо таблицю баз знань для НЛР температури заморозки в камері θ_3 .

Як видно з рисунку 3.8, 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

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.9 зображено вікно налаштування функцій

приналежності $mf1$, $mf2$, $mf3$ до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна», «приблизно нульова», «велика позитивна» відповідно. Також були визначені функції принадлежности $mf1$, $mf2$, $mf3$ до нечітких множин приріст похибки регулювання «великий негативний», «приблизно нульовий» та «великий позитивний», які представлені на рисунку 3.10.

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 3.11.

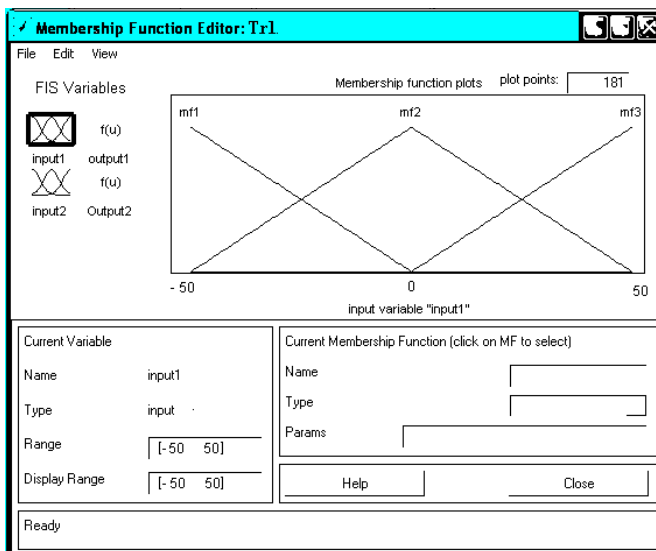


Рисунок 3.9. Вікно формування функцій принадлежности до нечітких безліч похибка регулювання PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

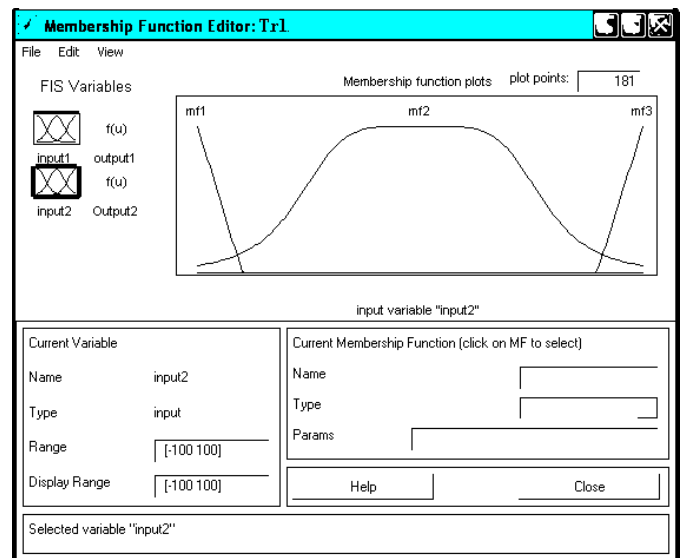


Рисунок 3.10. Вікна формування функцій принадлежности до нечітких безліч збільшення значення похибки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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;

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

У даному випадку вихідні значення сигналів C_i згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на рисунках 3.12 і 3.13. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну І-складову регулятора, а «output2» – відповідно П-складову.

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора температури заморозки в камері θ_3

e_1 \ Δe_1	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = 45$; $\Delta u_1 = 0,57$;	–
Z	$u_1 = 45$; $\Delta u_1 = 0,57$;	$u_1 = 0$; $\Delta u_1 = 0$;	$u_1 = -45$; $\Delta u_1 = -0,57$;
PE	–	$u_1 = -45$; $\Delta u_1 = -0,57$;	–

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.

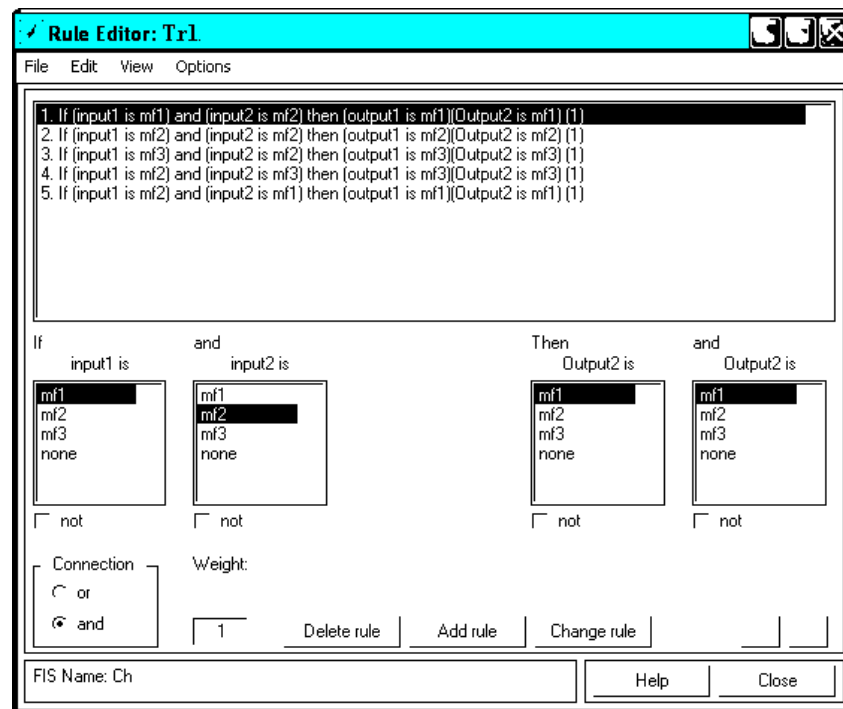


Рисунок 3.11. Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

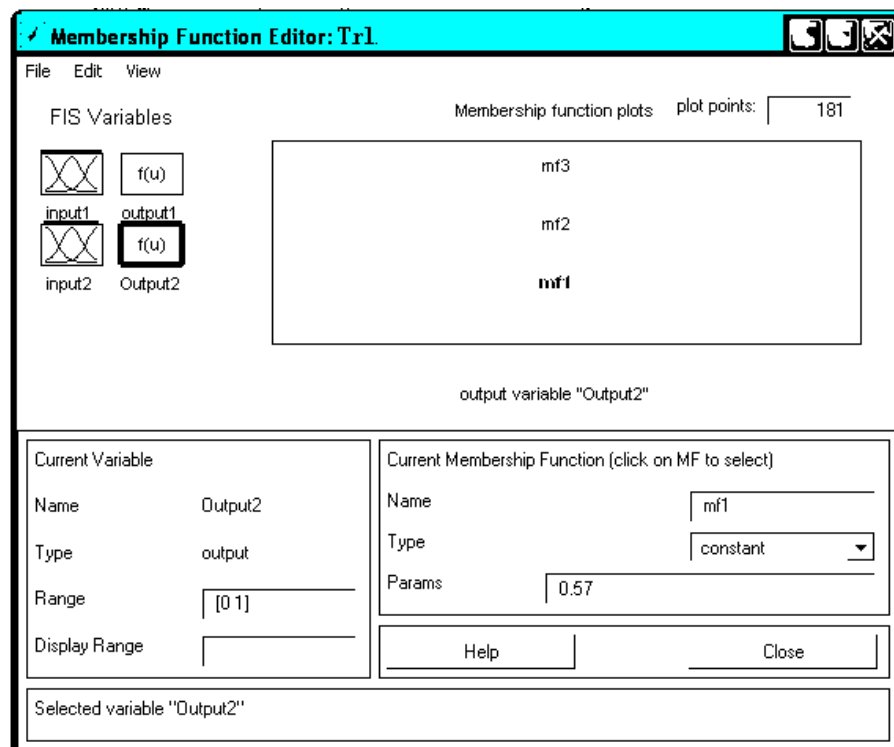


Рисунок 3.12. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з нечітким регулятором, яка представлена на рисунку 3.14. З рисунку 3.14 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 .

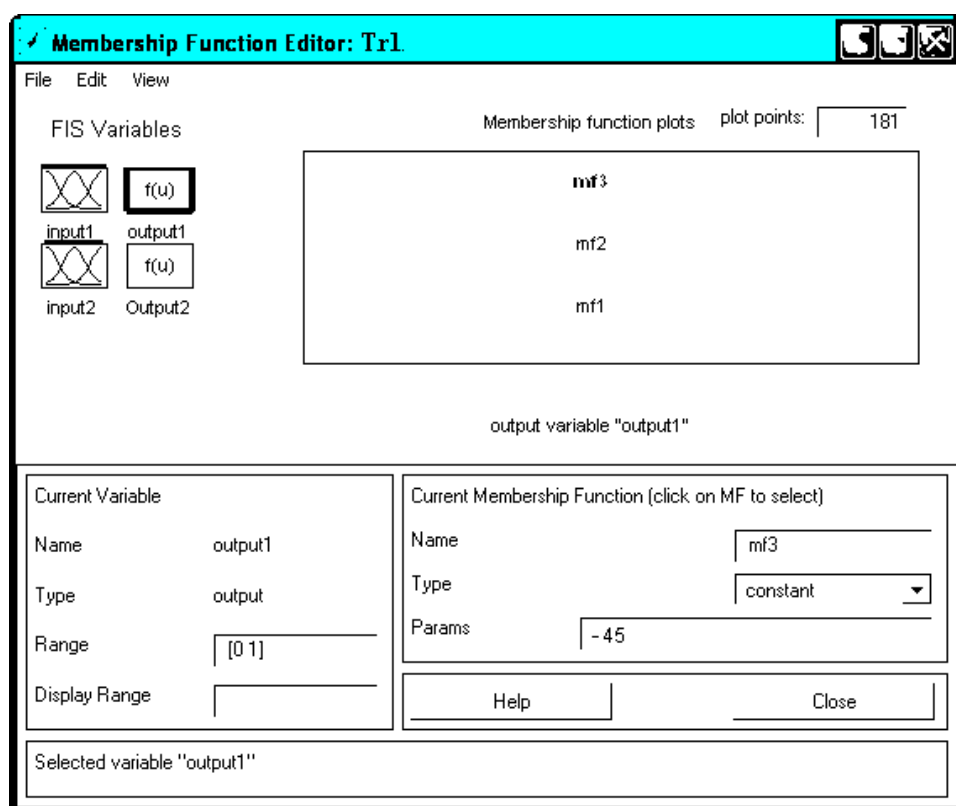


Рисунок 3.13. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

Аналогічним чином можливо синтезувати нечіткий регулятор для регулювання температури готового продукту $\theta_{ГП}$. Функції приналежності в цьому випадку мають вигляд відповідно до іншого діапазону регулювання. База правил функціонування згідно з нечітким висновком Сугено 0-порядку така ж сама як у нечіткого регулятора температури заморозки в камері θ_3 , але вихідні лінгвістичні зміни мають інші значення. Для порівняльного аналізу, в результаті моделювання були отримані

графіки перехідних процесів при східчастому впливі що збурує які приставлені на рисунку 3.15. На основані рисунку 3.15 можна зробити висновок що САУ з нечітким регулятором працює трохи гірше ніж САУ зі стандартними ПІД-регуляторами. Це зрозуміло тому що для синтезу нечіткого регулятора використовувалися експертні данні що коректувалися методом «проб та похибок» в процесі моделювання. Покращення якості регулювання можливе при перетворенні нечіткого регулятора в регулятор на базі штучної нейронної мережі.

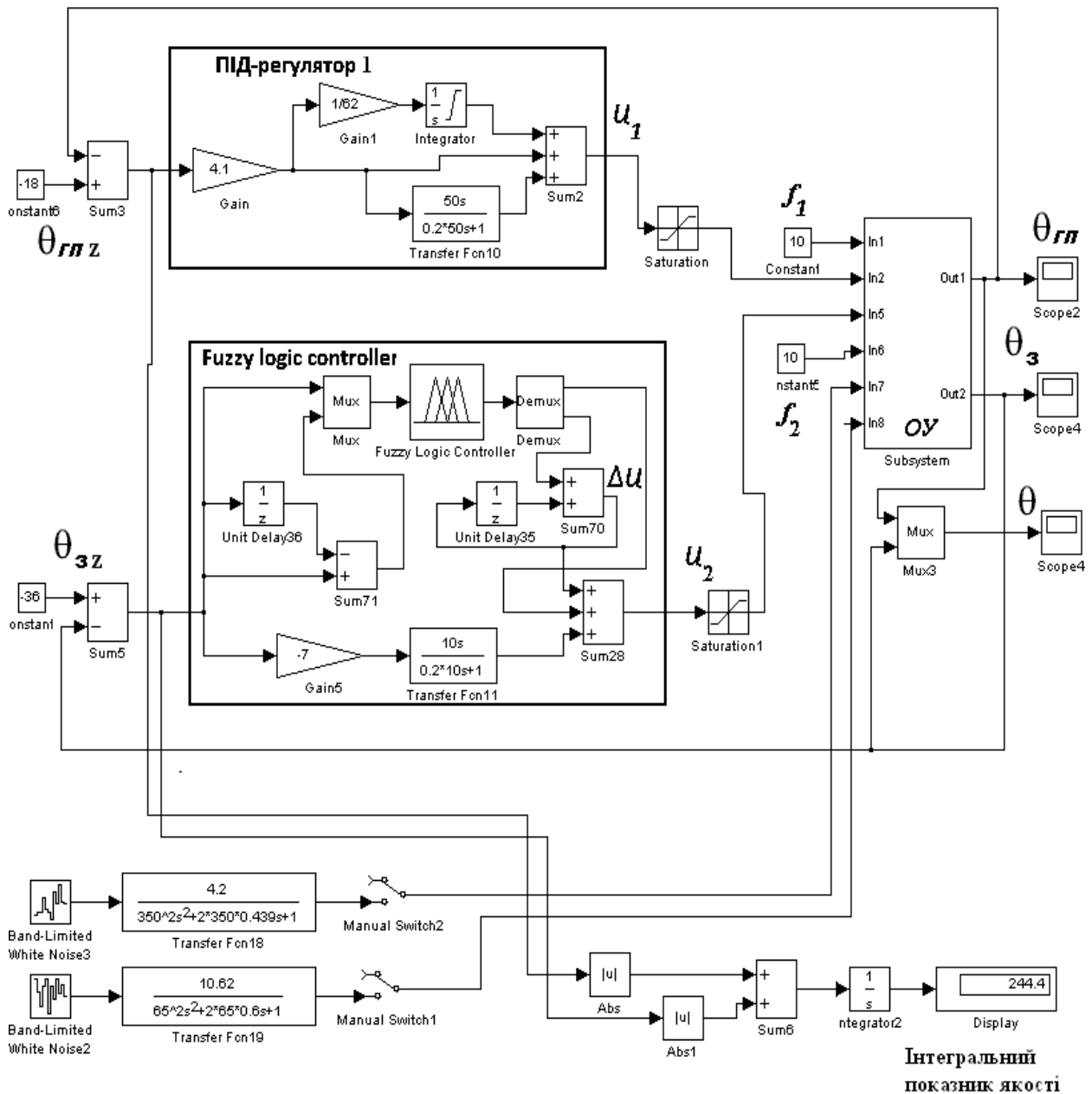


Рисунок 3.14 – Структурна схема моделі САУ з нечітким регулятором температури заморозки в камері θ_3 і ПІД регулятором температури готового продукту $\theta_{гп}$, що реалізована засобами середовища MATLAB\Simulink

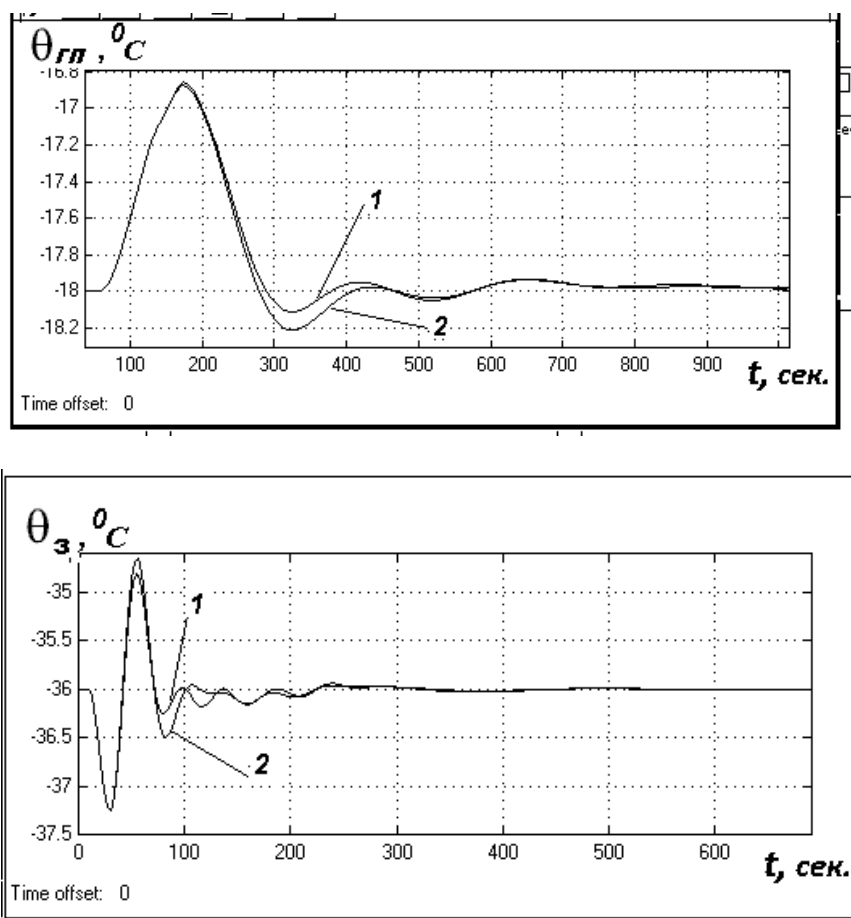


Рисунок 3.15. Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графіки 1– перехідний процес у САУ з ПД регулятором; 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором температури заморозки в камері θ_3

Іншому випадку реалізація нечіткого регулятора може бути виконано при умові якщо відомі не вихідні значення регулятора при відповідних похибках регулювання а вихідні функції приналежності значень управляючого впливу. В даному випадку теж необхідно визначити функції приналежності до нечітких множин температура M «велика» PE, «нормальна» Z, та «занадто мала» NE. А далі висновок може бути зроблений згідно з алгоритмом Мамдані.

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

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

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

.....

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

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

У представленій 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 $X_i = (x_0)$.

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

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

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

де через \wedge позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

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

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

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

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

Таким чином, для переходу від Сугено 0-го порядку до алгоритму Мамдані необхідно визначити вихідні функції приналежності $C_1(z)$, $C_2(z)$, $C_3(z)$ замість відповідних значень W_2 , $-W_2$, та C_1 , C_2 . На рисунках 3.16 та 3.17 представлені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам – «приріст управляючого впливі» великій (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 $\mu_{\Sigma}(z)$.

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 ; $\mu(x)$ – 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 .

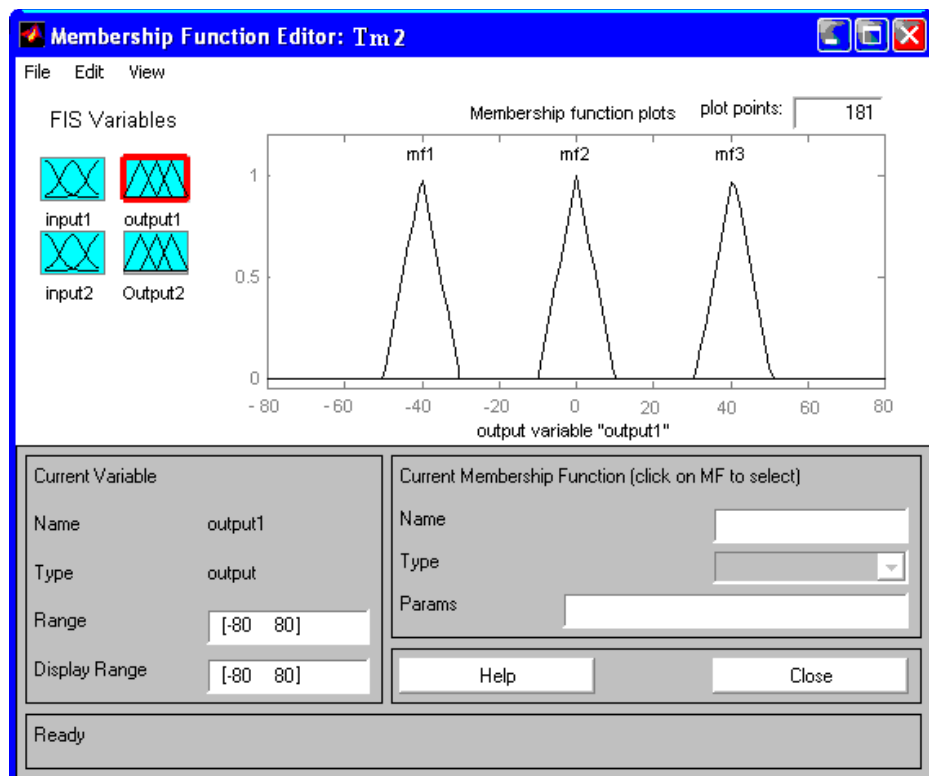


Рисунок 3.16 Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безлічей – «управляючий вплив PE, Z, NE» для алгоритму Мамадані

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

Перехідні процеси що були отримані при моделюванні САУ з нечітким регулятором що має нечіткий висновок Мамдані не відрізняються від інших отриманих при моделюванні САУ з ПІД-регулятором

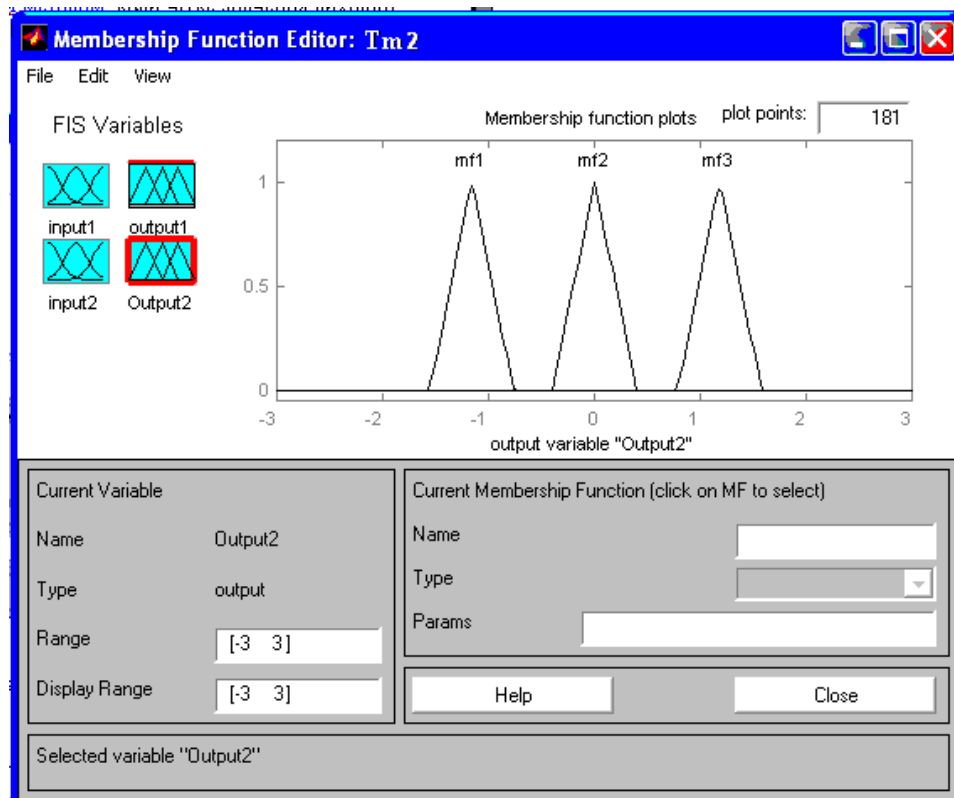


Рисунок 3.17 Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

Таким чином буде подальше перетворення нечіткого регулятора за нечітким висновком Сугено 0-порядку в нейрорегулятор для реалізації процесу оптимізації та покращення якості регулювання.

3.5 Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління

В історії розвитку теорії автоматичного керування чітко виділяються три етапи. Першим був етап класичної детермінованої теорії автоматичного регулювання, що охопив період часу з кінця XIX по 40-і роки XX століття. У цей період основними завданнями керування було забезпечення стійкості і відповідної якості перехідних процесів. Другий етап теорії керування почався в 40—50-х роках XX-го століття і тривав приблизно до середини 70-х років. Це — етап класичної стохастичної теорії автоматичного регулювання. Він характеризується новою постановкою основного завдання теорії керування: врахувати випадкові збурювання, що діють на систему, і забезпечити якісну роботу в умовах постійно діючих перешкод.

Наприкінці XX-го століття в розвитку теорії автоматичного керування почався новий етап, пов'язаний з адаптивною постановкою основного завдання керування. Його особливість полягає у відсутності споконвічних знань про математичну модель об'єкта керування, будь то диференціальні рівняння або щільності ймовірностей випадкових зовнішніх впливів. Об'єкт — це чорний ящик, що зазнає невідомі випадкові впливи. Нам доступні тільки його входи і виходи. Ціль системи керування (СК) полягає в тому, щоб уже в процесі функціонування визначити закон регулювання, що забезпечує оптимальну поведінку об'єкта. Для розв'язання цього завдання на додаток до основного контуру до системи керування вводиться контур адаптації (Рисунок 3.18).

З самого початку третього етапу величезна увага приділялася адаптивному керуванню лінійними стаціонарними об'єктами з невідомими параметрами (наприклад, широко використовуються методики, що опираються на побудову спостерігачів). У рамках цього підходу в 80-х роках почалося використання ШНМ для розв'язання завдань керування. Отримані результати показали, що ШНМ являють собою не просто нову методику в теорії автоматичного керування, а цілу парадигму. Для нового напрямку в теорії керування була введена окрема назва — нейроуправління (neurocontrol).

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

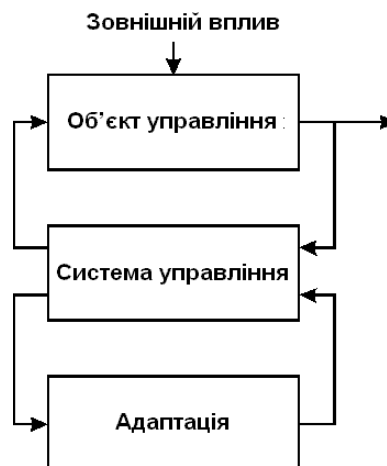


Рисунок 3.18. Загальна схема адаптивної системи керування

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

3.6 Синтез моделі САУ з нейрорегуляторами

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

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятор 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 ($\tanh(x)$). 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 3.19.

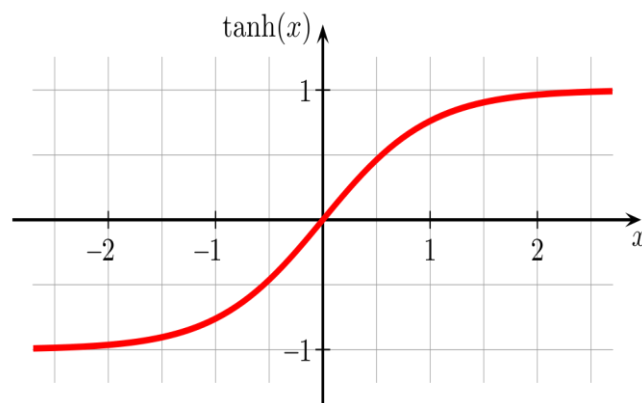


Рисунок 3.19. Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

В одній з перших робіт з нейроуправління представляється дискретна СУ із НК, що одержує на вхід сигнал керування системою $u_r(k)$ і затримані в кілька разів сигнали з виходу об'єкта керування. У загальному випадку НК такого типу може одержувати і затримані сигнали зі свого виходу (рисунок 3.20). Таким чином, він формує керуючий вплив за наступним законом:

$$\mathbf{u}(k) = NN(\mathbf{y}(k), \mathbf{y}(k-1), \dots, \mathbf{y}(k-l_1), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{u}(k-2), \dots, \mathbf{u}(k-l_2), \mathbf{u}_r(k)), \quad (5)$$

де l_1 і l_2 — глибини затримок зворотних зв'язків за виходом і входом об'єкта керування відповідно.

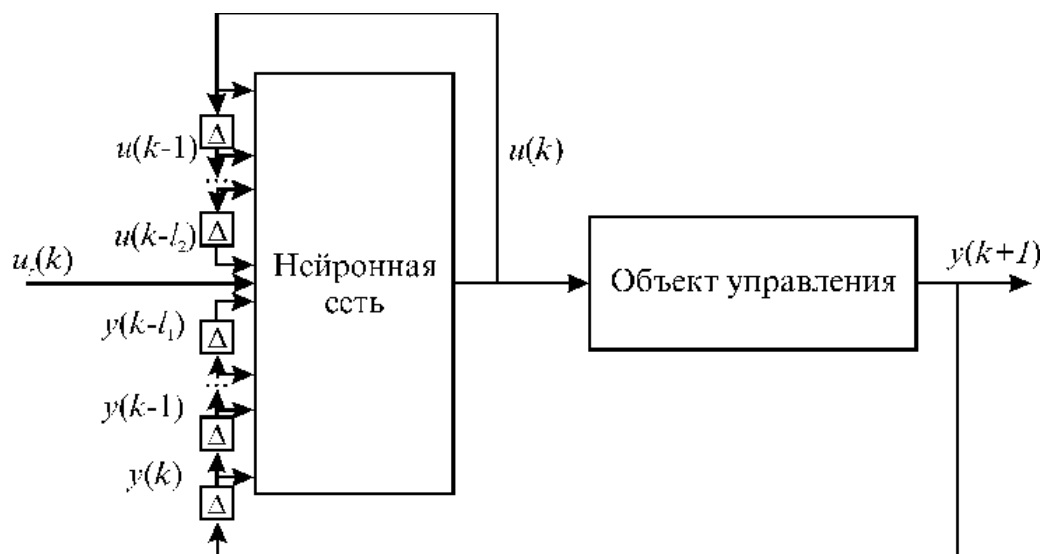


Рисунок 3.20 Система керування з нейроконтролером

Якщо САУ з комбінованим регулятором є компромісним розв'язком у рамках класичного підходу, то другий тип що представлений на рисунку 3.20 побудований тільки на ШНМ.

В цьому другому випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.21.

Метою навчання НК, у даному випадку, є одержання закону керування, що забезпечує задане (звичайно екстремальне) значення деякого функціонала якості I :

$$\mathbf{u}(t) \Rightarrow I\{\mathbf{y}(t)\} \rightarrow \text{ext}$$

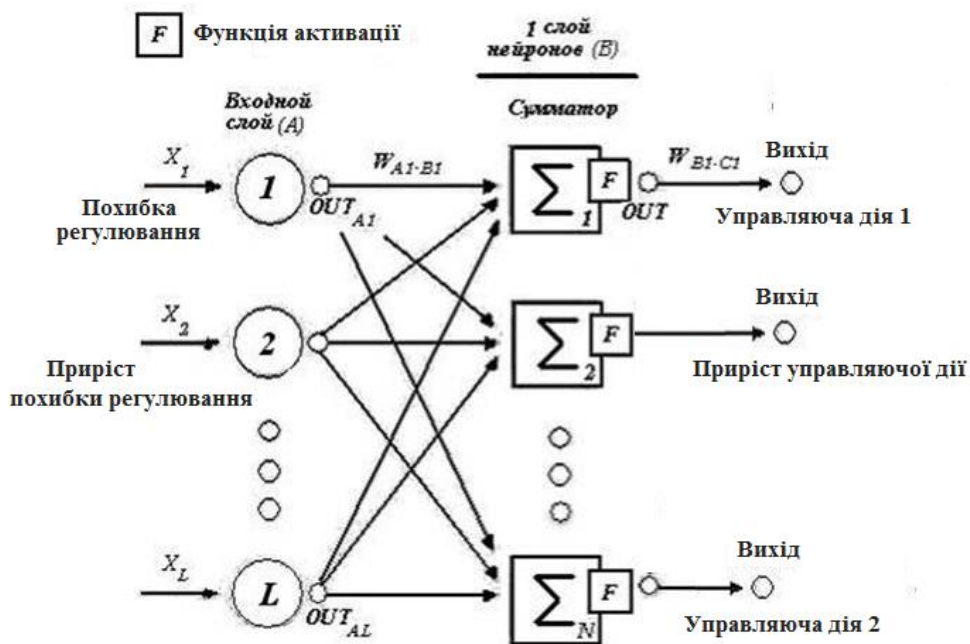


Рис. 3.21 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

Такий функціонал відповідає за поточний стан системи як показано на рисунку 3.22.

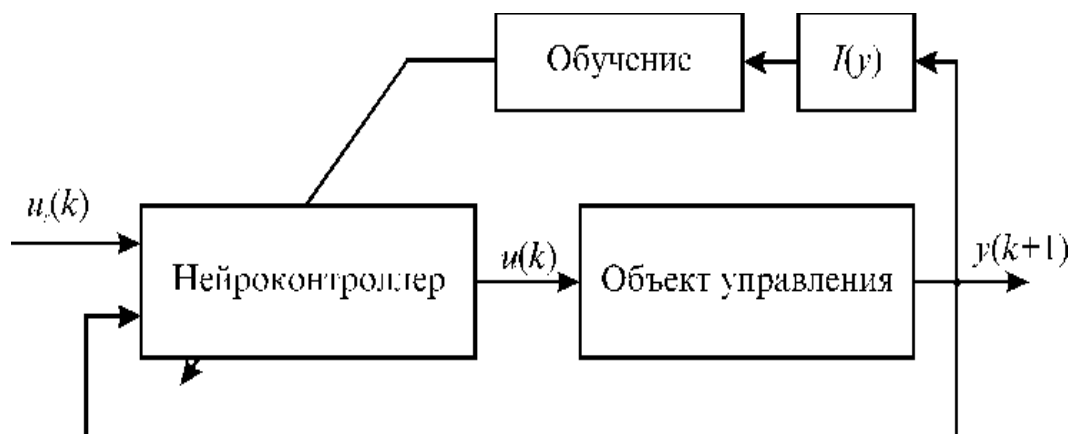


Рисунок 3.22 Нейромережева система керування з екстремальним показником якості регулювання

Якщо розглядати другий варіант нейромережевого алгоритму управління то нейрорегулятор можливо спочатку налаштувати також за методом зворотного поширення. В цьому випадку треба визначити кількість визначених похибок регулювання для тренування нейронної мережі. На рисунку 3.23 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.

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

Штучна нейронна мережа, що виконує роль регулятора, синтезується на базі характеристик нечіткого логічного регулятора. Ці характеристики представляються у табличній формі у вигляді вхідних і вихідних значень нечіткого регулятора (таблиця 3.2). Дані, представлені у таблиці 3.2, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

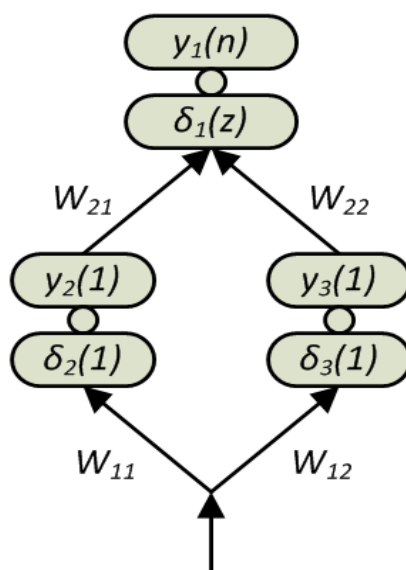


Рисунок 3.23 Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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 3.24.

Таблиця 2.2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	I	u	Δu
1	-80	55	0,95
2	-20	16,2	0,35
3	-1	0.5	0,013
4	0	0	0
5	1	-0.5	-0,013
6	20	-14,3	-0,35
7	80	-53	-0,98

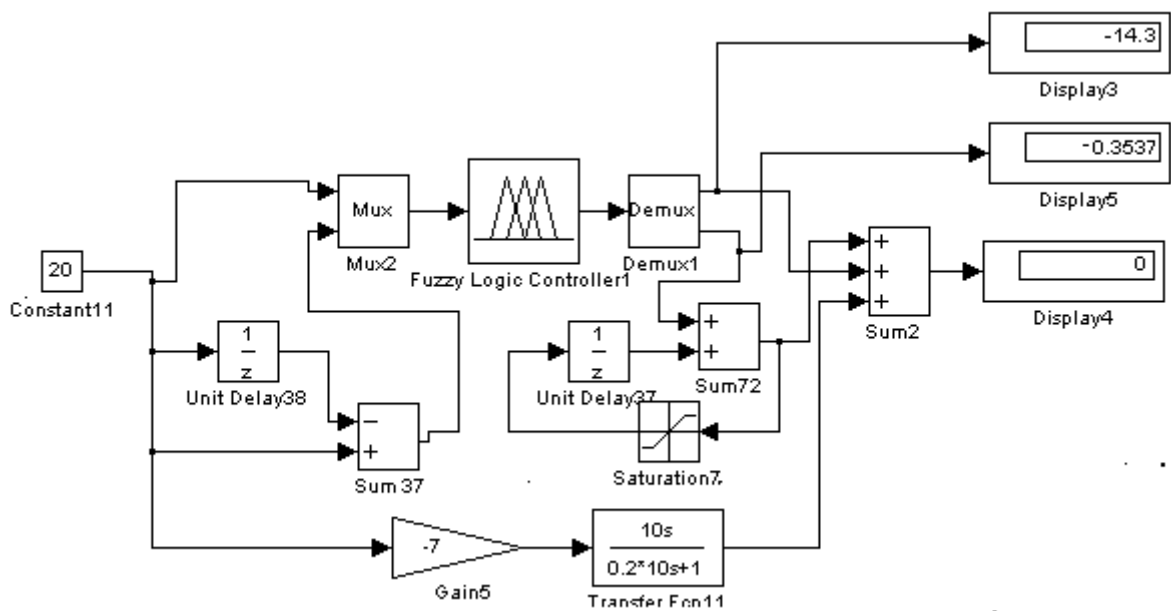


Рисунок. 3.24 – Схема моделювання для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.25 і 3.26 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 її у вікні Simulink.

```

» P=[-30 -10 -1 0 1 10 30];
» T=[0.55 0.162 0.005 0 -0.005 -0.143 -0.53];
» net = newff([-30 30],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.675933/0, Gradient 29.8082/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 0.000731494/0, Gradient 1.00142/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 0.000489133/0, Gradient 0.0930774/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 0.000466313/0, Gradient 0.00513158/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 0.000461397/0, Gradient 0.00186235/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 1.98391e-006/0, Gradient 0.00113059/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 3.20822e-008/0, Gradient 2.32061e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 3.20748e-008/0, Gradient 2.4504e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
    0.5500    0.1620    0.0052   -0.0004   -0.0048   -0.1430   -0.5300
» gensim(net)
»

```

```

- MATLAB Command Window
File Edit Window Help
» P=[-30 -10 -1 0 1 10 30];
» T=[0.55 0.162 0.005 0 -0.005 -0.143 -0.53];
» net = newff([-30 30],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.675933/0, Gradient 29.8082/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 0.000731494/0, Gradient 1.00142/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 0.000489133/0, Gradient 0.0930774/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 0.000466313/0, Gradient 0.00513158/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 0.000461397/0, Gradient 0.00186235/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 0.000458897/0, Gradient 0.000994319/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 0.000451216/0, Gradient 0.00763348/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 1.96144e-005/0, Gradient 0.0485448/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 4.71368e-006/0, Gradient 0.00404962/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 1.98391e-006/0, Gradient 0.00113059/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 7.19486e-008/0, Gradient 0.00108561/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 3.20822e-008/0, Gradient 2.32061e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 3.20748e-008/0, Gradient 2.4504e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
    0.5500    0.1620    0.0052   -0.0004   -0.0048   -0.1430   -0.5300
» gensim(net)
»

```

Рисунок 3.25 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

» P=[-30 -10 -1 0 1 10 30];
» T=[0.095 0.035 0.0013 0 -0.0013 -0.035 -0.098];
» net = newff([-30 30],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.353024/0, Gradient 17.2871/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 4.78323e-006/0, Gradient 0.00237793/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 3.56575e-006/0, Gradient 0.000372704/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 3.32783e-006/0, Gradient 0.000150892/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 3.22598e-006/0, Gradient 8.16902e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 3.16943e-006/0, Gradient 5.10961e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 3.07661e-006/0, Gradient 1.47621e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 3.06571e-006/0, Gradient 1.17506e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 3.05694e-006/0, Gradient 9.53152e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 3.03393e-006/0, Gradient 0.000446054/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
0.0957 0.0324 0.0033 0.0001 -0.0032 -0.0326 -0.0989
» gensim(net)

```

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
» P=[-30 -10 -1 0 1 10 30];
» T=[0.095 0.035 0.0013 0 -0.0013 -0.035 -0.098];
» net = newff([-30 30],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.353024/0, Gradient 17.2871/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 4.78323e-006/0, Gradient 0.00237793/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 3.56575e-006/0, Gradient 0.000372704/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 3.32783e-006/0, Gradient 0.000150892/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 3.22598e-006/0, Gradient 8.16902e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 3.16943e-006/0, Gradient 5.10961e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 3.13348e-006/0, Gradient 3.48604e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 3.10864e-006/0, Gradient 2.52043e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 3.09047e-006/0, Gradient 1.89932e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 3.07661e-006/0, Gradient 1.47621e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 3.06571e-006/0, Gradient 1.17506e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 3.05694e-006/0, Gradient 9.53152e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 3.03393e-006/0, Gradient 0.000446054/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a = sim(net,P)
a =
    0.0957    0.0324    0.0033    0.0001   -0.0032   -0.0326   -0.0989

» gensim(net)

```

Рисунок 3.26 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.27, з яких можливо побачити, що десь на 100-м кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями було закінчено.

Остання команда яка вводиться для відтворення нейронної мережі в середовище Simulink це команда `gensim(net)`. В результаті виконання цієї команди мережі з'являється нейронна мережа як показано на рисунку 3.28.

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі після встановлення команди `a = sim(net,P)`. Така команда дає можливість оцінити якість навчання шляхом відповідного тестування мережі.

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі. На рисунках 3.46 та 3.47 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову та II – складову нейрорегулятора температури заморозки в камері θ_3 .

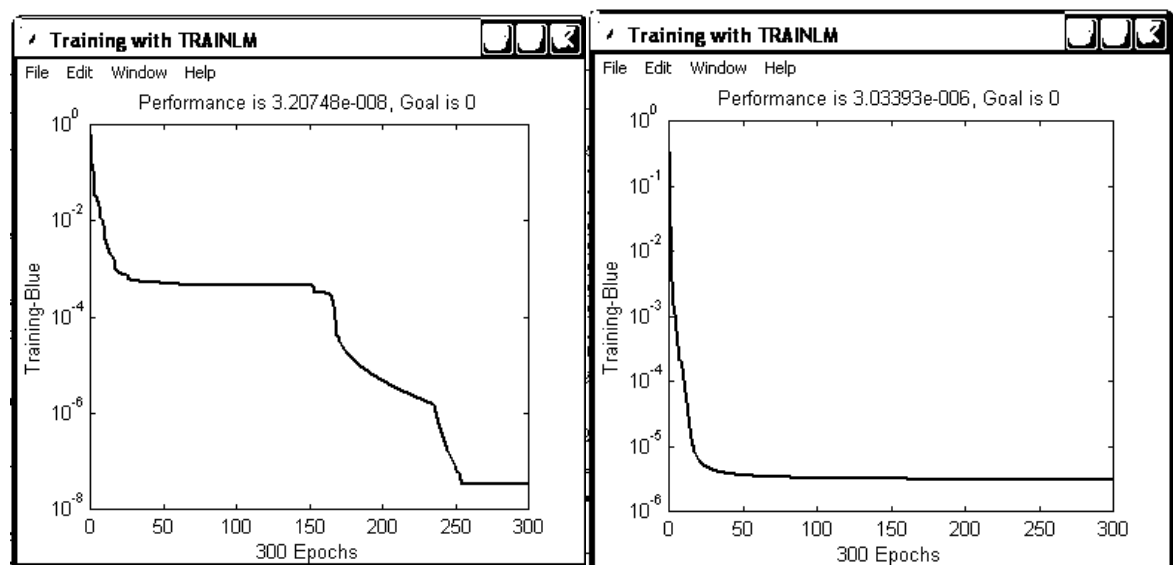


Рисунок 3.27 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених в програмах на рисунках 3.25 і 3.26, розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для і-тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі.

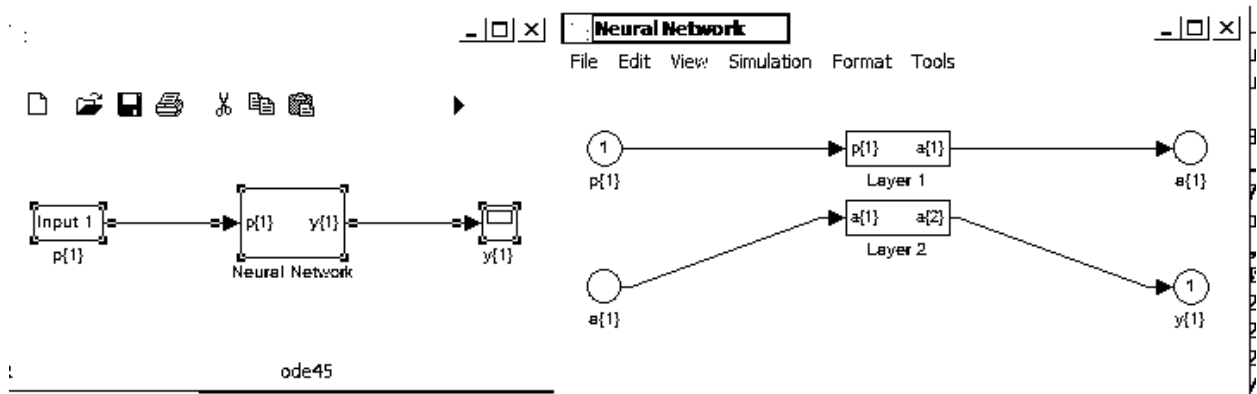


Рисунок 3.28 –Сформована нейронна мережа що представляє складову нейрорегулятора

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

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

де d_i – бажане значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі.
 y_i – фактичне значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі.
 Похибка для i -того нейрону прихованого шару розраховується за наступною формулою (2):

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

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

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

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 3.23:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0052 - 0.005) * (0.0052) * (1 - 0.0052) = 0.00000105 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для і-тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned}\delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) * 0.00000105 = \\ &= -0.0000000143\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) * 0.00000105 = \\ &= 0.0000000351\end{aligned}$$

Розрахунок помилок для І – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned}\delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0324 - 0.035) * (0.0324) * (1 - 0.0324) = 0.03330085\end{aligned}$$

Розрахунок помилки для і-тих нейронів прихованого шару:

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

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

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

Сформовані нейроні мережі були визначені у схемі моделювання замість нечіткого регулятора, як показано на рисунку 3.14. У такий спосіб була синтезована модель САУ з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.29.

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.30, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.29.

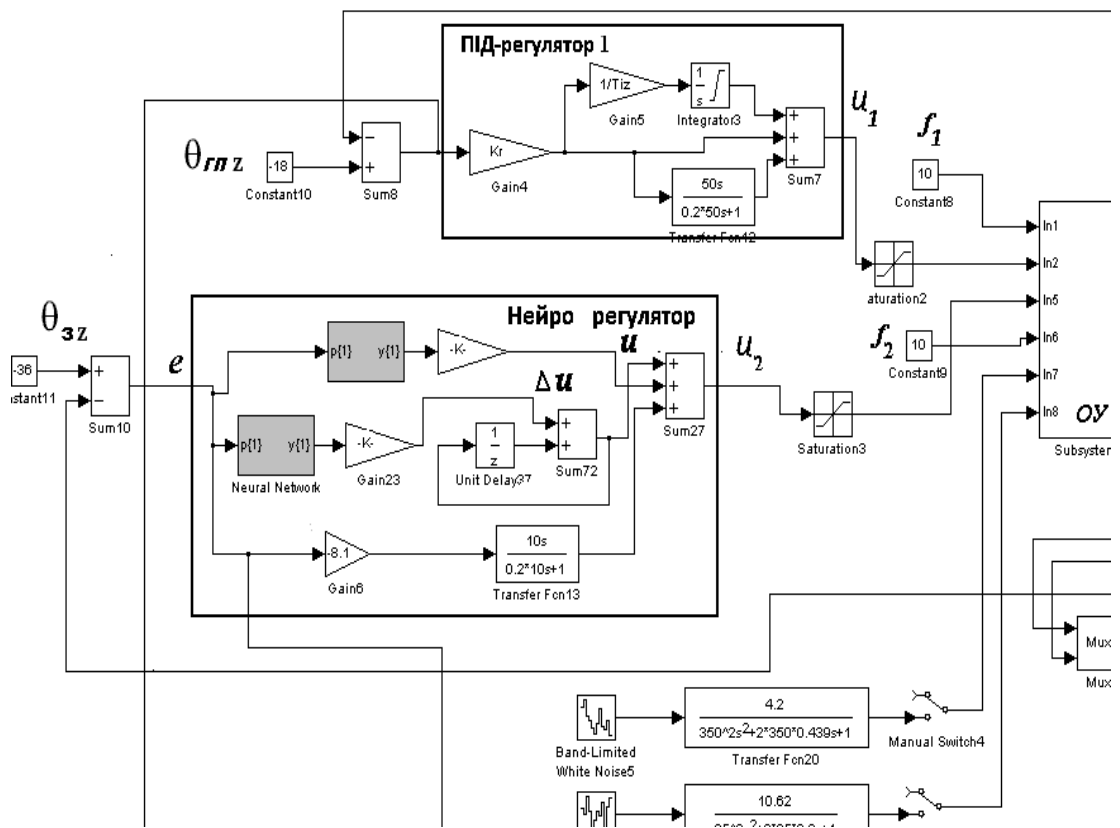


Рисунок 3.29 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

У результаті моделювання САУ з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САУ з нечітким регулятором та традиційним ПІД-регулятором. Ці графіки представлені на рисунку 3.31, 3.32. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором працює незначно гірше, ніж САУ з нечітким регулятором.

Час регулювання при східчастому впливі, що збурює складає 350 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПІД регулятором, і 300 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому збуренні однаково як в САУ з нейрорегулятором так в САУ з ПІД-регулятором як показано на рисунку 3.32. 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 3.30, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

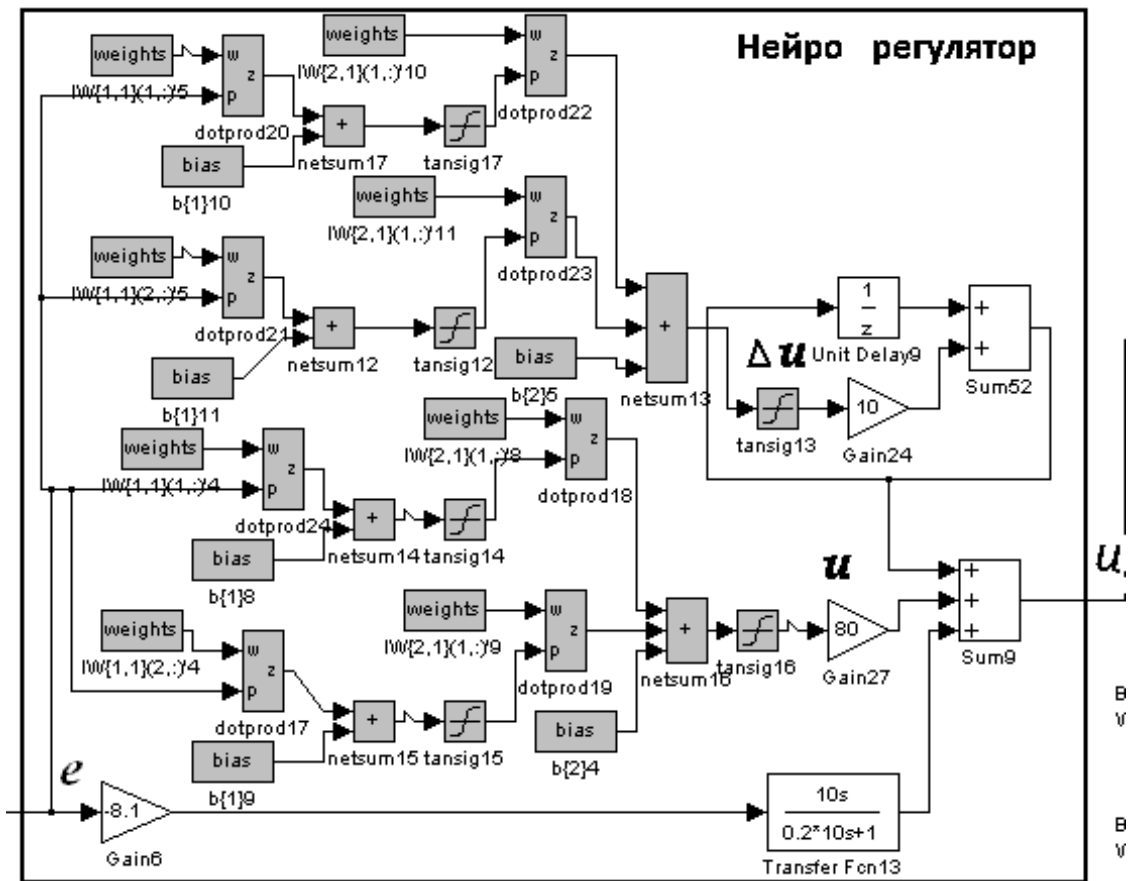


Рисунок 3.30 – Схема моделювання нейро-регулятора

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.

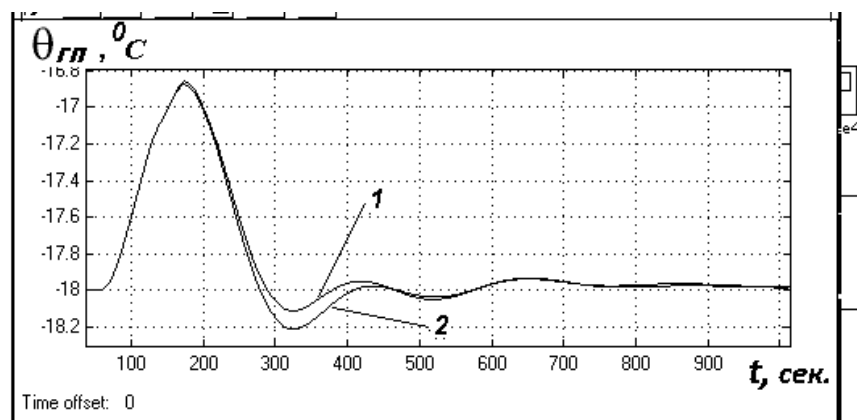


Рисунок 3.31. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з ПІД-регулятором;

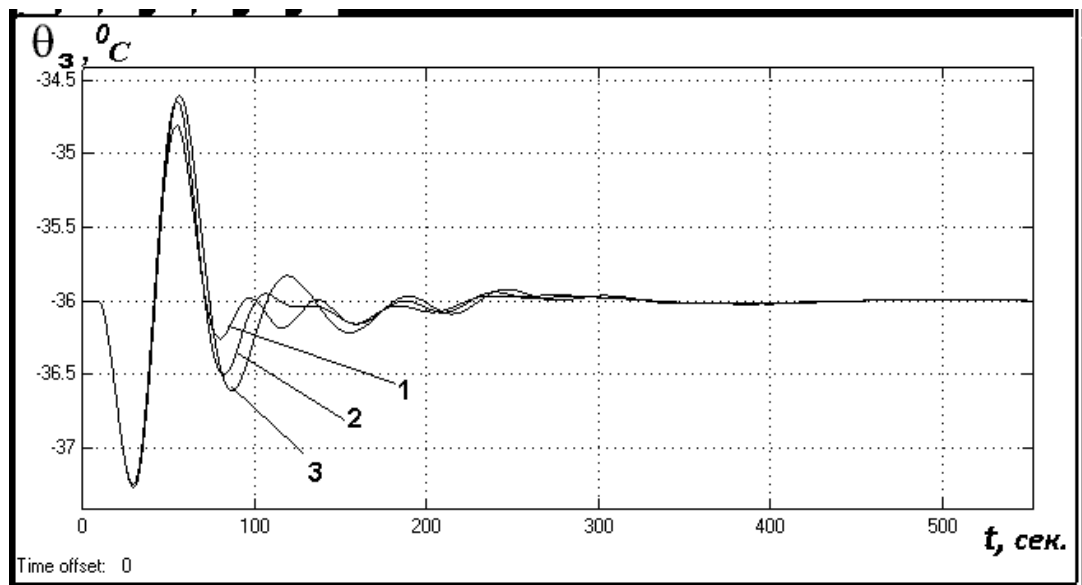


Рисунок 3.32. Графіки переходних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором; ; графік 3 – перехідний процес у САУ з нейрорегулятором;

3.7 Синтез САУ з альтернативними варіантами нейрорегуляторів

Одна із альтернативних досліджень нейромережевих алгоритмів управління пов'язана з регулятором з прогнозом. Регулятор з прогнозом NN Predictive Controller використовує модель об'єкта управління у вигляді нейронної мережі для того, щоб передбачати його майбутню поведінку. Алгоритм оптимізації обчислює управляючі сигнали, які мінімізують різницю між бажаними і дійсними змінами сигналу на виході моделі і таким чином оптимізує поведінку об'єкта на заданому інтервалі часу.

Проектування нейрорегулятора складається з двох етапів: етап ідентифікації об'єкта управління нейрорегулятора і етапу синтезу закону управління.

На етапі ідентифікації розробляється модель об'єкта у вигляді нейронної мережі, яка на етапі синтезу використовується для синтезу регулятора. Схема підсистеми ідентифікації показана на рис. 3.33.

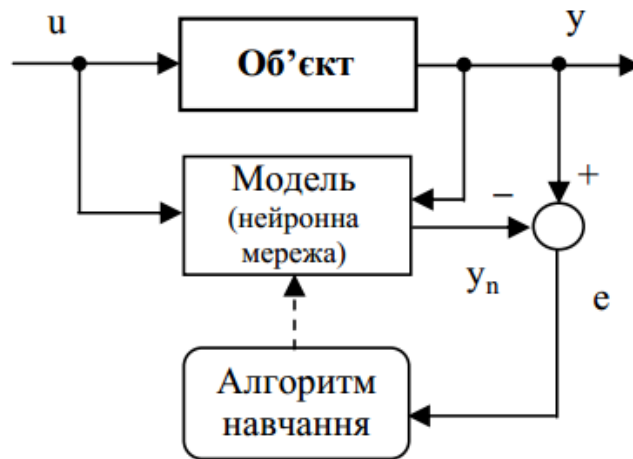


Рис. 3.33 Схема підсистеми ідентифікації

Вона включає модель об'єкта управління у вигляді нейронної мережі, яка повинна бути навчена в автономному режимі так, щоб мінімізувати помилку між реакціями об'єкта і моделі на послідовність пробних сигналів u . Структурна схема на рис.3.34 ілюструє процес управління з прогнозом. Регулятор складається з нейромережевої моделі керованого об'єкта і блоку оптимізації. Блок оптимізації визначає значення, які мінімізують критерій якості управління, а відповідний керуючий сигнал управляє процесом.

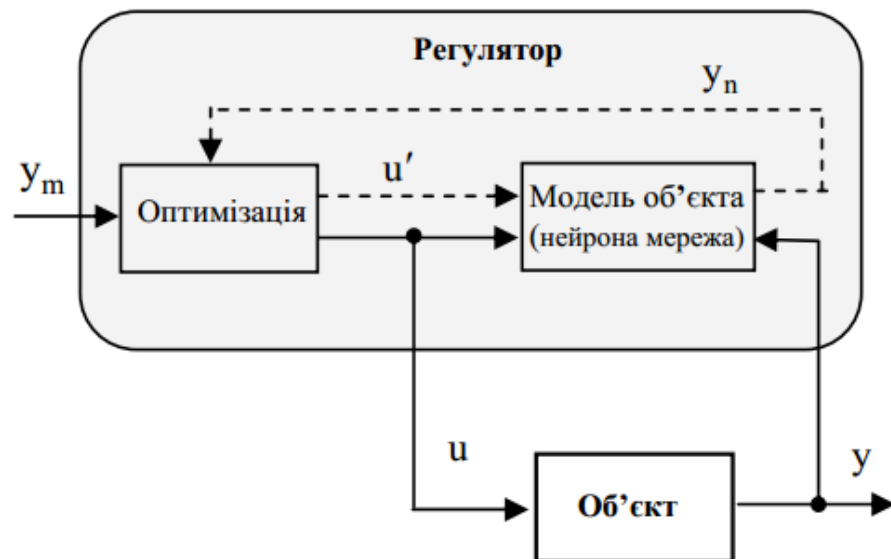


Рис. 3.34 Структурна схема системи з регулятором, що використовує принцип передбачення

Складність розробки САУ з нейроемулятором виникає при складному об'єкті високого порядку і дає де яких випадках незадовільні результати. Виходячи з цього був розглянутий більш простий альтернативний варіант з нелінійними перетворюючими на основі нейронних мереж.

Існує безліч підходів до застосування ШНМ у якості НК. Наприклад, пропонується використовувати ШНМ як нелінійні підсилювачі при інтегральній, диференціальній та пропорційній частинах ПД-регулятора (рисунок 3.35).

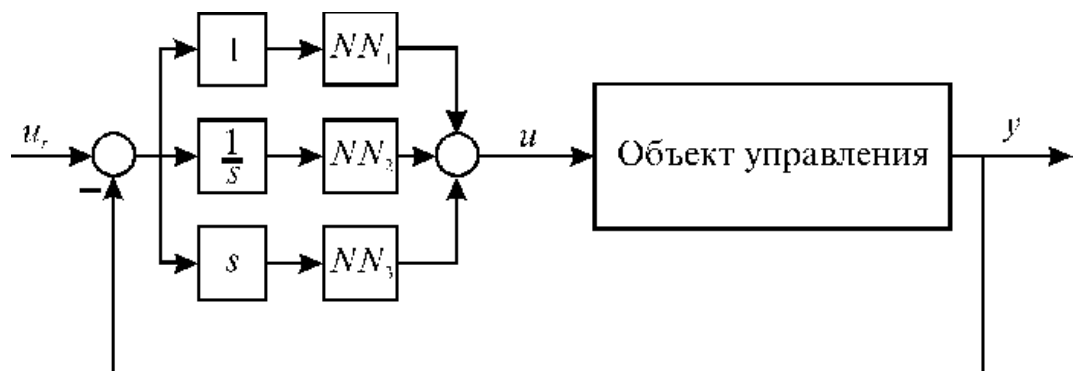


Рисунок 3.35 Система керування з комбінованим ПД-нейрорегулятором

В програмному середовищі MATLAB\Simulink була представлена модель САУ з комбінованим ПД регулятором. Структурна схема такої моделі представлена засобами MATLAB\Simulink, зображена на рисунку 3.36.

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

Була визначена програма, для формування нелінійного перетворювача на базі нейронної мережі, яка представлена на рисунку 1. Вхідними даними є значення похибки регулювання помноженої на параметр налаштування П складової регулятора, та значення управляючого впливу від 0 до 100%. Згідно з програмою параметри тренування зазначені на 100 кроків. У результаті виконання команди gensim(net) з'являється згенерована штучна нейрона в середовищі Simulink що може виконувати функції нелінійного перетворювача в комбінованому ПД регуляторі.

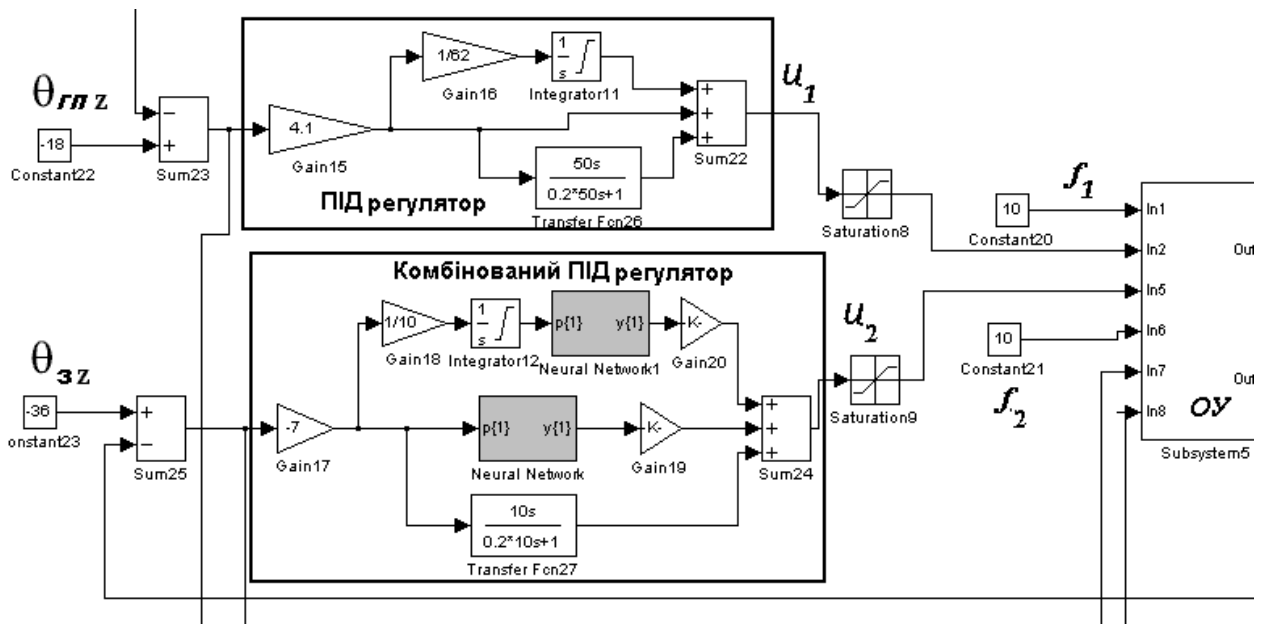


Рисунок 3.36 – фрагмент структурної схеми моделі САУ з комбінованим ПІД-регулятором, яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink .

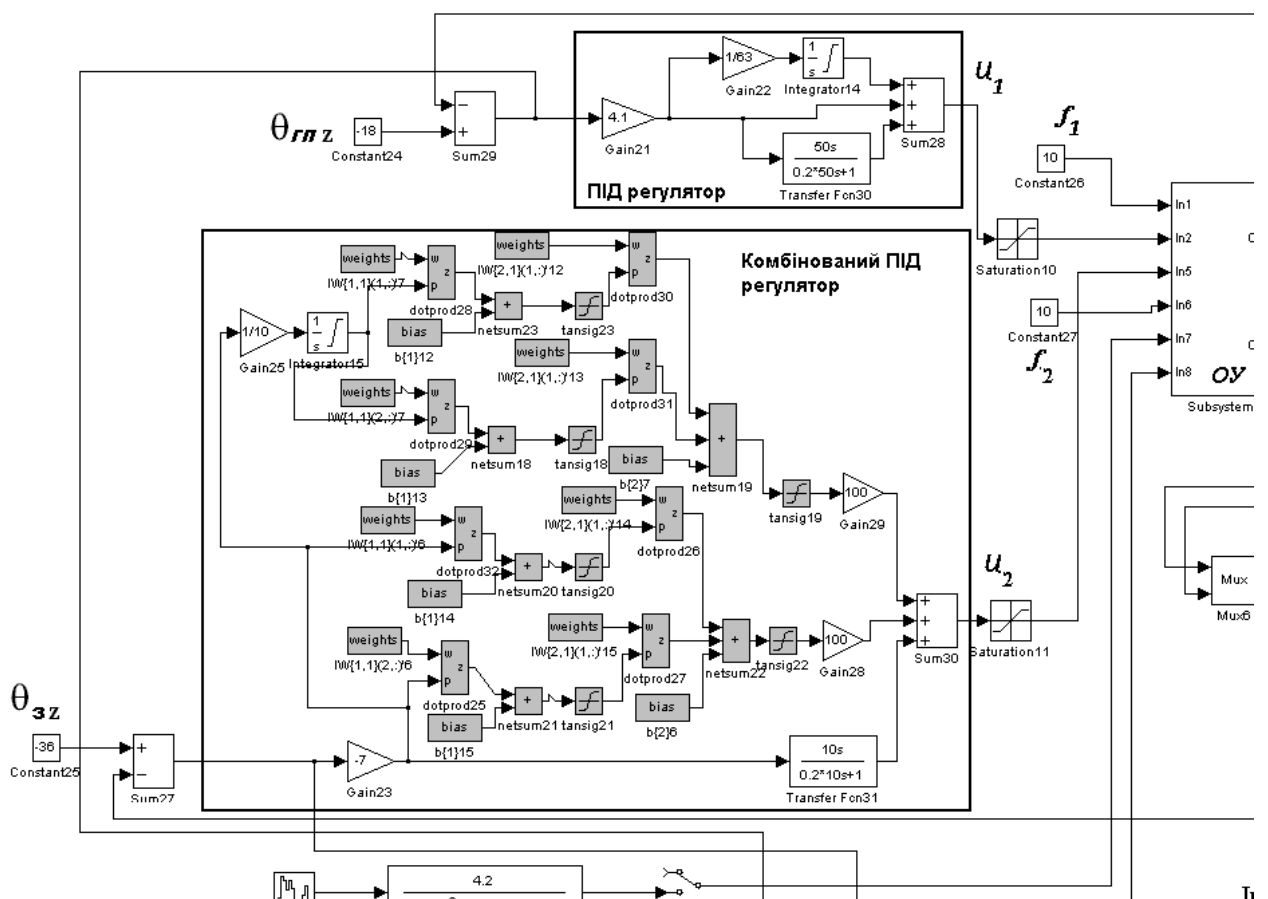


Рисунок 3.37 – фрагмент структурної схеми моделі САУ з комбінованим ПІД-регулятором, яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

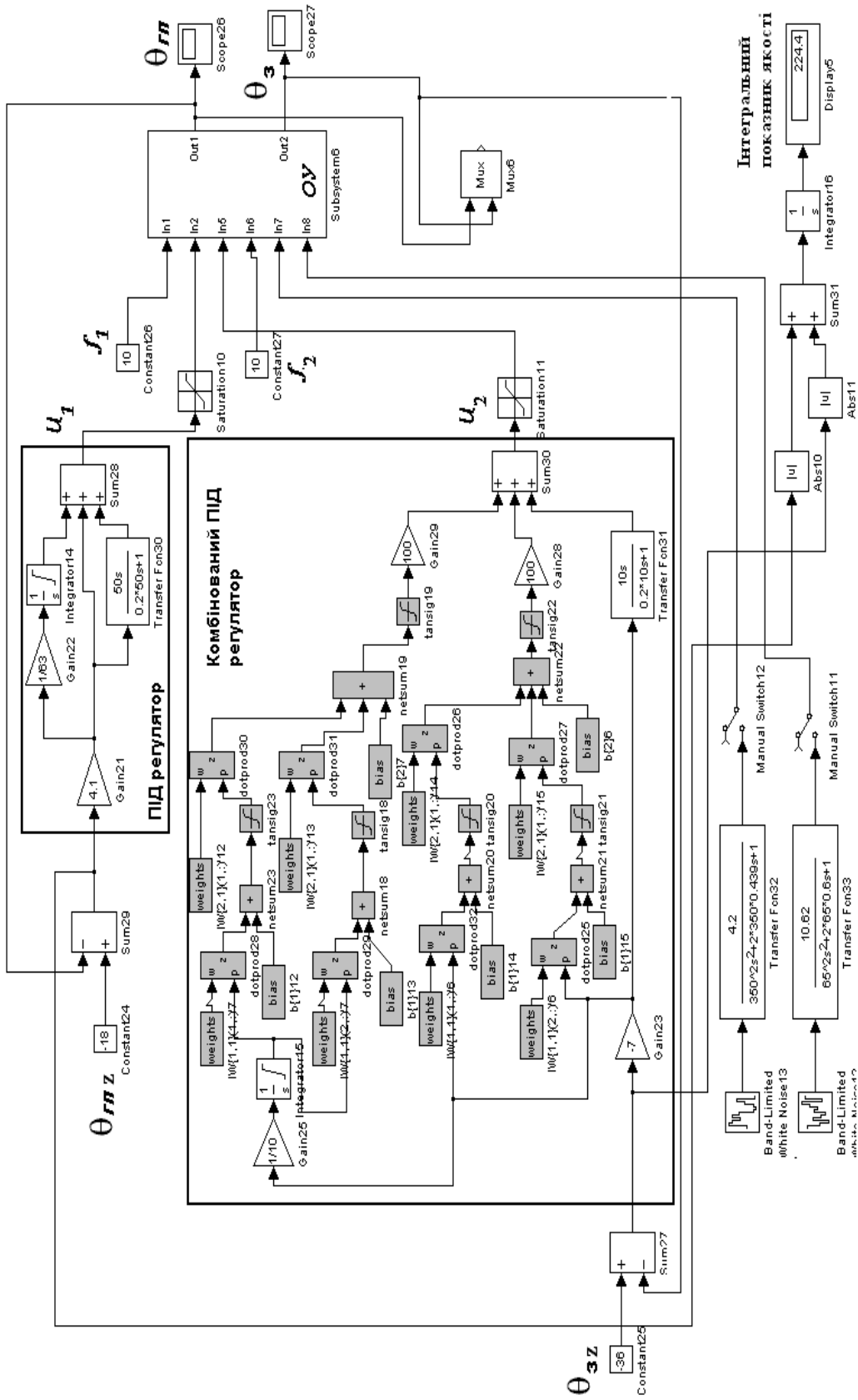


Рисунок 3.38 – Структурна схема моделі САУ з комбінованим ПІД регулятором, що реалізована засобами

MATLAB\Simulink

```

» p=[-100 -30 -20 -10 0 10 20 30 100];
» t=[-0.8 -0.2 -0.16 -0.08 0 0.08 0.16 0.2 0.8];
» net=newff([-100 100], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, p, t);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.594898/0, Gradient 84.8253/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 0.000156006/0, Gradient 0.00596447/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 0.000154866/0, Gradient 0.114572/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 0.000153129/0, Gradient 0.00296846/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 0.000152791/0, Gradient 0.00091788/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,p)
a =
Columns 1 through 7
-0.7994 -0.2164 -0.1420 -0.0703 -0.0000 0.0703 0.1420
Columns 8 through 9
0.2164 0.7994
» gensim(net)

```

The screenshot shows the MATLAB Command Window with the following content:

```

-.) MATLAB Command Window
File Edit Window Help
[Icons]
» p=[-100 -30 -20 -10 0 10 20 30 100];
» t=[-0.8 -0.2 -0.16 -0.08 0 0.08 0.16 0.2 0.8];
» net=newff([-100 100], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, p, t);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.594898/0, Gradient 84.8253/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 0.000156006/0, Gradient 0.00596447/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 0.000154866/0, Gradient 0.114572/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 0.000153129/0, Gradient 0.00296846/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 0.000152791/0, Gradient 0.00091788/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,p)
a =
Columns 1 through 7
-0.7994 -0.2164 -0.1420 -0.0703 -0.0000 0.0703 0.1420
Columns 8 through 9
0.2164 0.7994
» gensim(net)
»

```

Рисунок 3.39 Виконавчий код для генерації нейромережі, яка буде відтворювати нелінійне перетворення сигналів в алгоритмі управління

Остання команда яка вводиться для відтворення нейронної мережі в середовищі Simulink це команда `gensim(net)`. В результаті виконання цієї команди мережі з'являється нейронна мережа як показано на рисунку 3.39.

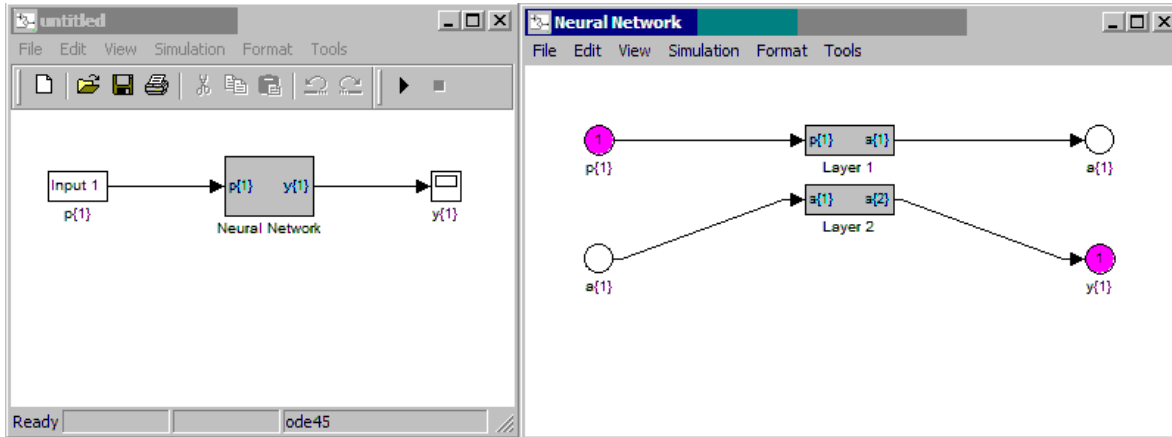


Рисунок 3.40. Відтворена нейронна мережа в середовищі Simulink після виконання відповідної програми

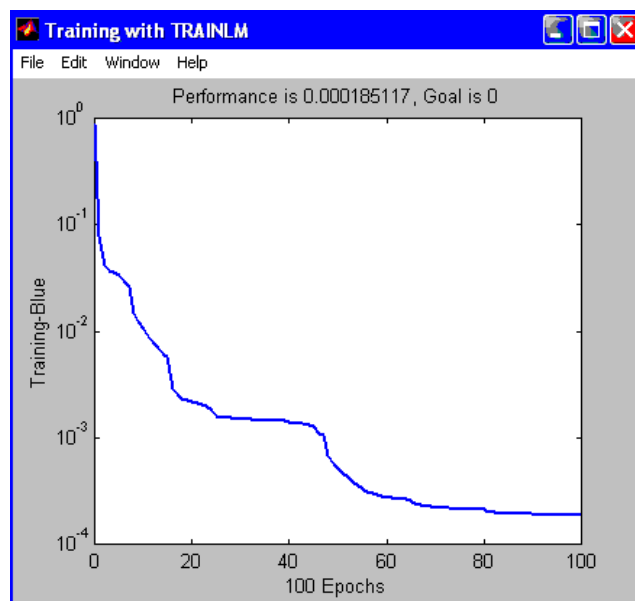


Рисунок 3.41. Характеристика точності навчання інтегральної складової нейрорегулятора

Згідно з рисунком 3.40 нейронна мережа складається з двох шарів layer 1 , layer 2 які будить синтезовані в системі регулювання. Для налаштування таких нелінійних перетворювачів необхідно виконати оптимізацію САР за відповідним критерієм якості регулювання.

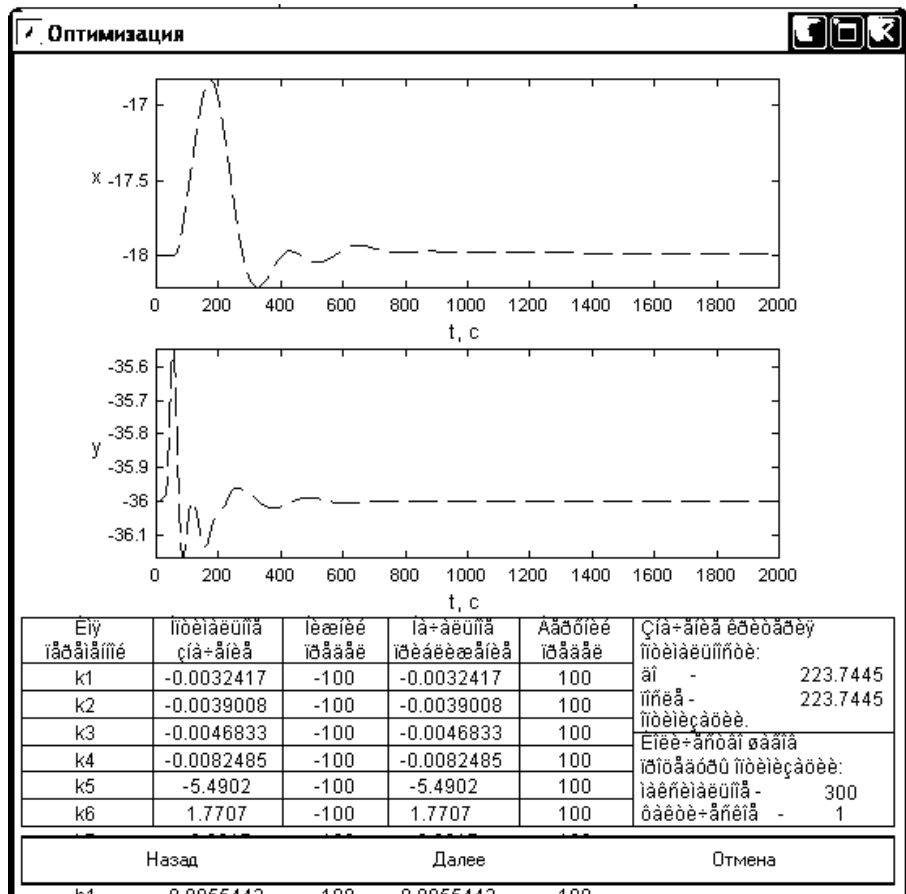


Рисунок 3.42 – Вікно результатів оптимізації параметрів комбінованого регулятора САУ

Після проведення процедури оптимізації значення інтегрального показника якості роботи системи значно зменшалось порівнюючи з типовою системою зі стандартними ПД регуляторами. Це можливо помітити з рисунків 3.5 та 3.42 при наявності нелінійності характеристики за відповідним каналом регулювання.

У результаті було виконано моделювання традиційної САУ зі стандартними ПД-регуляторами, неоптимізованої та оптимізованої САУ з комбінованим ПД регулятором. В результаті моделювання отримали відповідні перехідні характеристики. З цих перехідних процесів що представлені на рисунку 3.43 видно що максимально динамічне відхилення зменшилось десь у 1,5 – 2 рази, а час регулювання остався однаковий. Таки чином можна зробити висновок, що комбінований ПД-регулятор дає найкращі результати при нелінійні статичні характеристики у об'єкта управління.

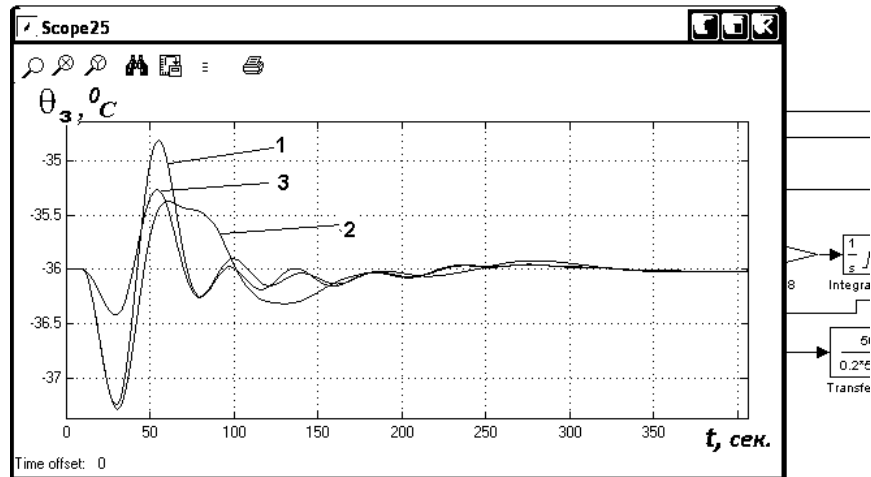


Рисунок 3.43. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з не оптимізованим комбінованим ПД регулятором , графік 3 - перехідний процес у САУ побудованим на базі штучних нейронних мереж з комбінованим ПД-регулятором

3.8 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегуляторами

Для покращення якості регулювання у роботі була проведена параметрична оптимізація САУ з нейронними регуляторами. Оптимізувались всі коефіцієнти міжнейронних зв'язків та зсуви в вихідному шарі нейронної мережі. Оптимізація нейронних регуляторів проводилась при таких же умовах, які були при оптимізації САУ з традиційним ПД регуляторами.

Таким чином, інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний відповідно таким же, як при оптимізації САУ з традиційним ПД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була спочатку визначена модель САУ з нейрорегулятором температури заморозки в камері θ_3 і параметричним оптимізатором, структурна схема яка відображена на рисунку 3.44. Таким чином, оптимізація проводилась одночасно. Оптимізувався нейрорегулятор температури заморозки в камері θ_3 і ПД-регулятор температури готового продукту $\theta_{ГП}$. Оптимізувались параметри нейрорегулятора і ПД –регулятора при фіксованих значеннях параметрах Д складових що були визначені при синтезі традиційної САУ з ПД регуляторами.

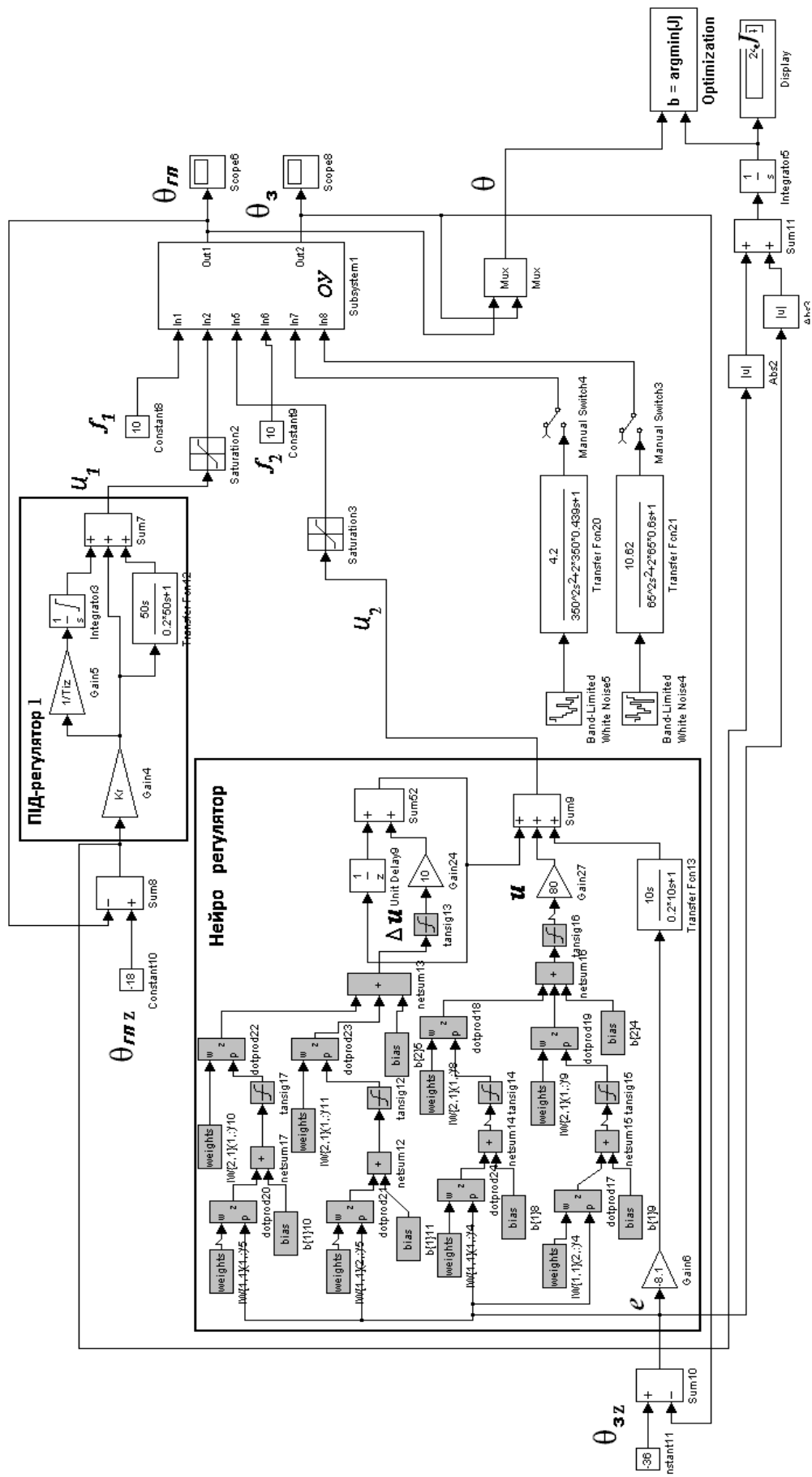


Рисунок 3.44 – Структурна схема моделі САУ з нейро регулятором температури заморозки в камері θ_3 і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink

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 що представлена в таблиці 3.5. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленою на рисунку 3.45. На рисунку 3.46 представлений результат оптимізації, який був отриманий при оптимізації нейрорегулятора температури заморозки в камері θ_3 попередньої оптимізації параметрів Д- складових ПД-регуляторів.

Рисунок 3.45 – Вікно для визначення початкових значень параметрів оптимізації регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

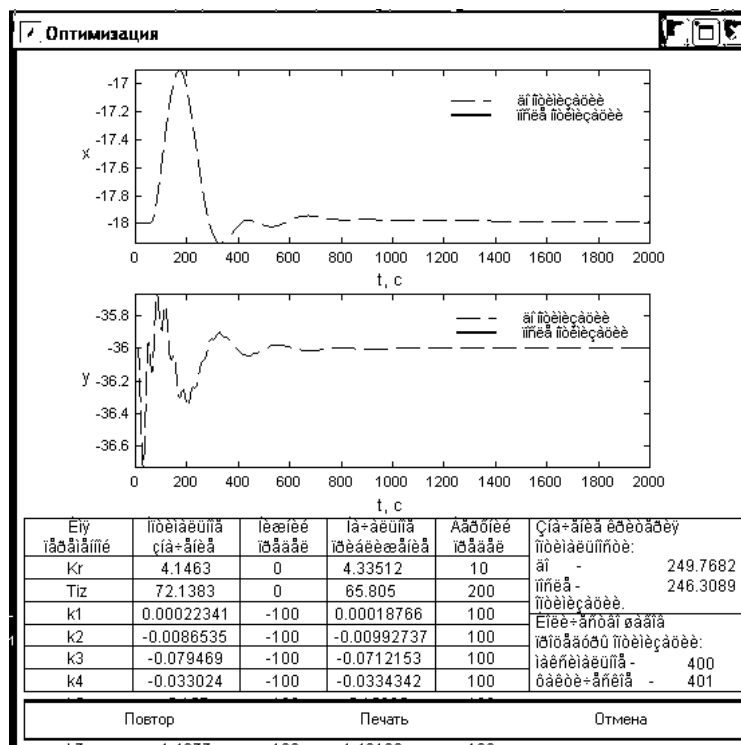


Рисунок 3.46 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

Згідно з рисунків 3.45 та 3.46 можна побачити що вдалося значно покращити якість регулювання порівнявши значення інтегральних критеріїв якості роботи системи. Значення інтегрального показника при САР з ПД регулятором 260 а при САР з нейрорегулятором 246.

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

Зведені оптимальні значення параметрів нейрорегуляторів були визначені в моделі САУ для подальшого дослідження якості регулювання при збурюючих впливах випадкового характеру. Для визначення принципової придатності оптимізованих нейрорегуляторів необхідно визначити, чи не втрачає стійкість САУ при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених, на етапі розробки моделі у діапазоні +/- 20 %.



3.47 Вікно вводу параметрів перевірки системи на грубість САР з нейрорегулятором

Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САУ (рисунок 3.48). Параметри перевірки системи на грубість не відрізняються від попереднього випадку коли була виконана перевірка на грубість системи з ПД-регулятором.

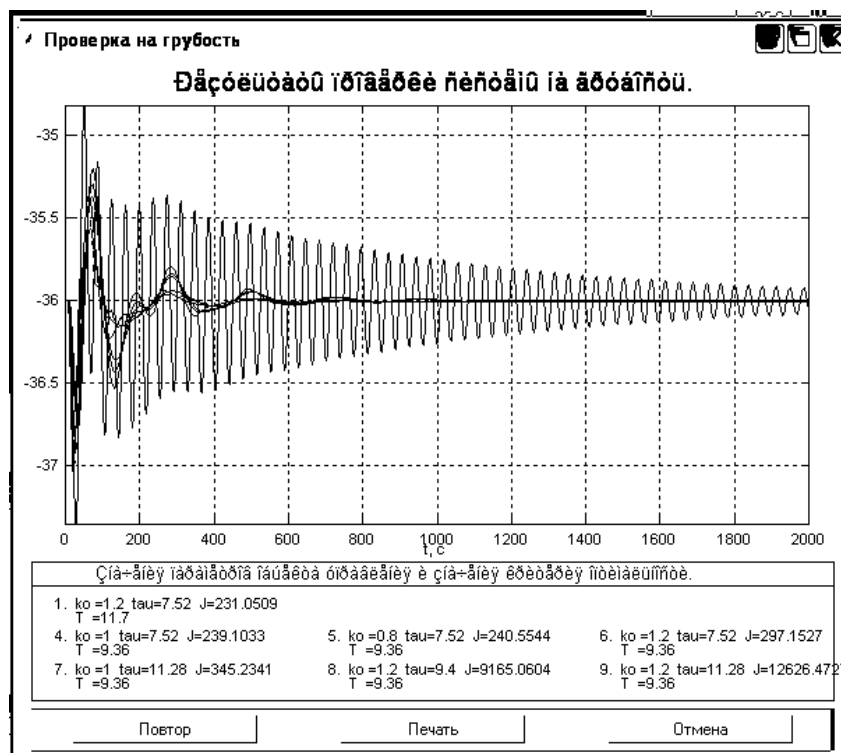


Рис. 3.48 – Вікно результатів перевірки на грубість САР з нейрорегулятором температури заморозки в камері θ_3

Згідно з результатом перевірки яка представлена на рисунку 3.44 можливо зробити висновок що САУ з нейрорегулятором значно груба це дає можливість зробити висновок про принципову придатність нейрорегулятора до застосування.

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

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 та при східчастому впливі що збурює. З графіків перехідних процесів що представлені на рисунку 3.49 можливо побачити, що час регулювання при САУ з нейронним регулятором та ПД-регулятором однаковий але максимальне динамічне відхилення в САУ з нейрорегулятором трохи менше. Найгірша якість регулювання була в системі з нечітким регулятором порівняно з іншими системами, тому що при синтезі нечіткого регулятора враховувались експертні данні та при налаштуванні системи використовувався метод проб та похибок якій має відповідні недоліки.

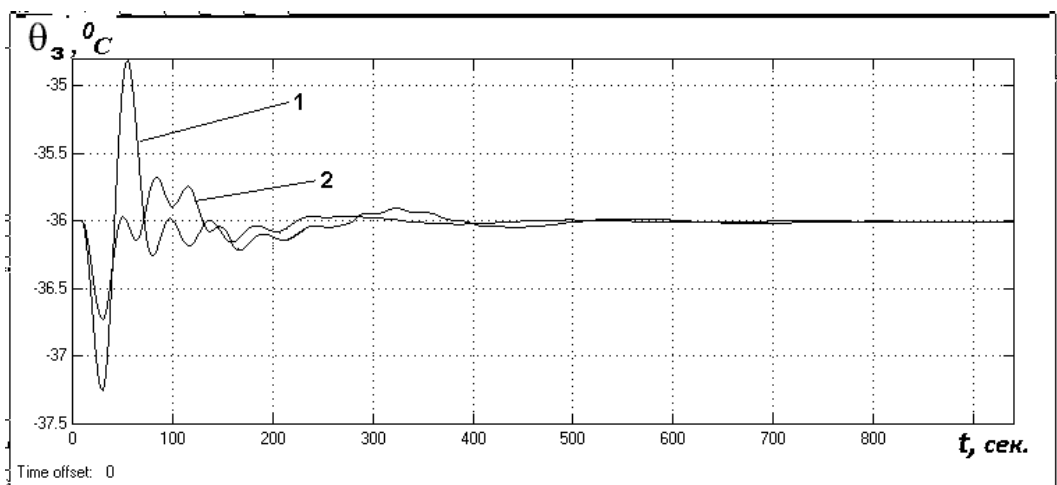


Рисунок 3.49. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучної нейронної мережі;

Також на основі аналізатора імовірнісних характеристик, що був вбудований у середовище MATLAB\Simulink, була визначена якість регулювання різних САУ при випадкових впливах що збурюють. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень змінних регулювання різних САУ при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.50 та 3.51, де зображені вікна результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень змінних регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.44 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням найкраще функціонує САУ з нейрорегулятором. З рисунку 3.50 видно що САУ з нечітким регулятором температури заморозки в камері θ_3 функціонує найгірше від інших систем. В кінцевому випадку показники функціонування різних САУ за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.3 та 3.4 де були визначені показники якості функціонування оптимізованих САУ з ПІД-регуляторами, САУ з нейрорегуляторами та САУ з комбінованим регулятором.

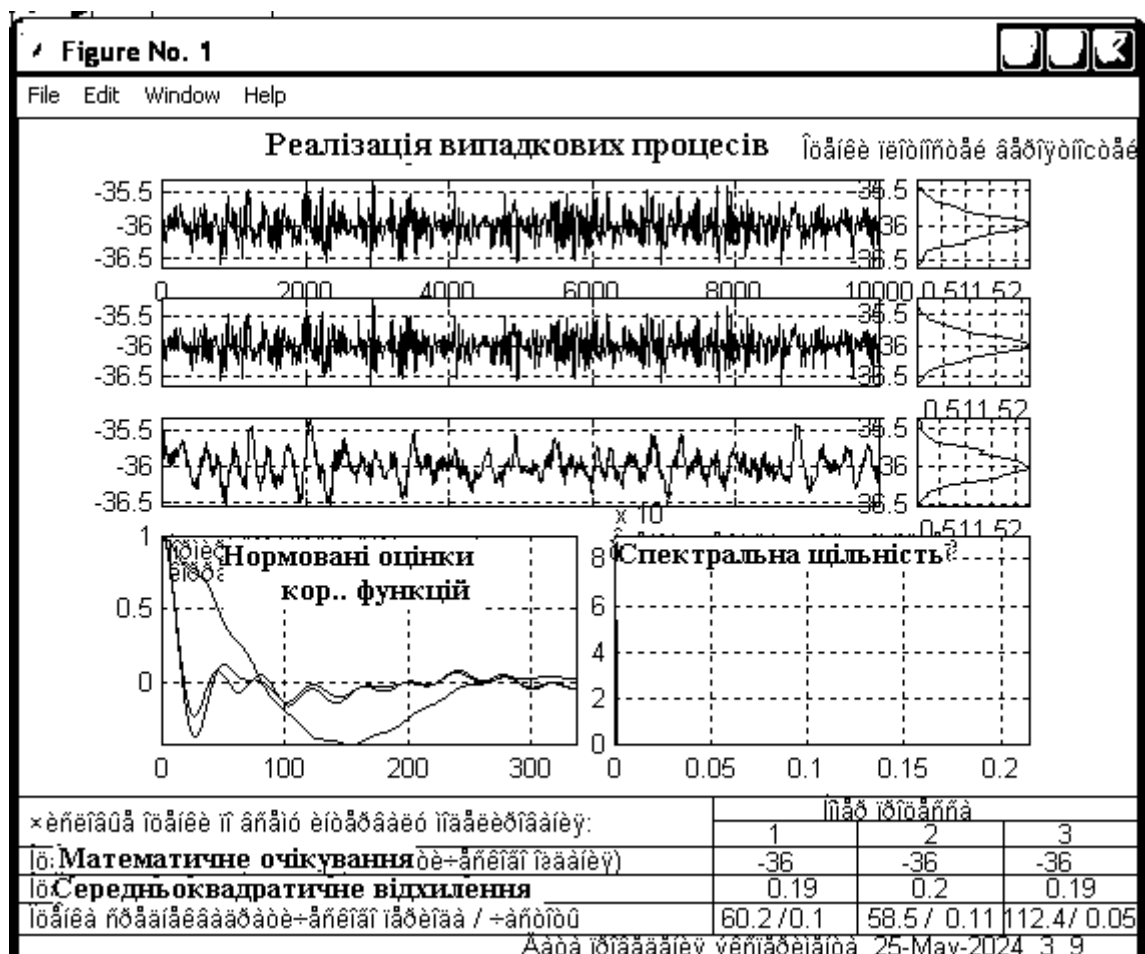


Рисунок 3.50 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик за каналом температури заморозки в камері θ_3

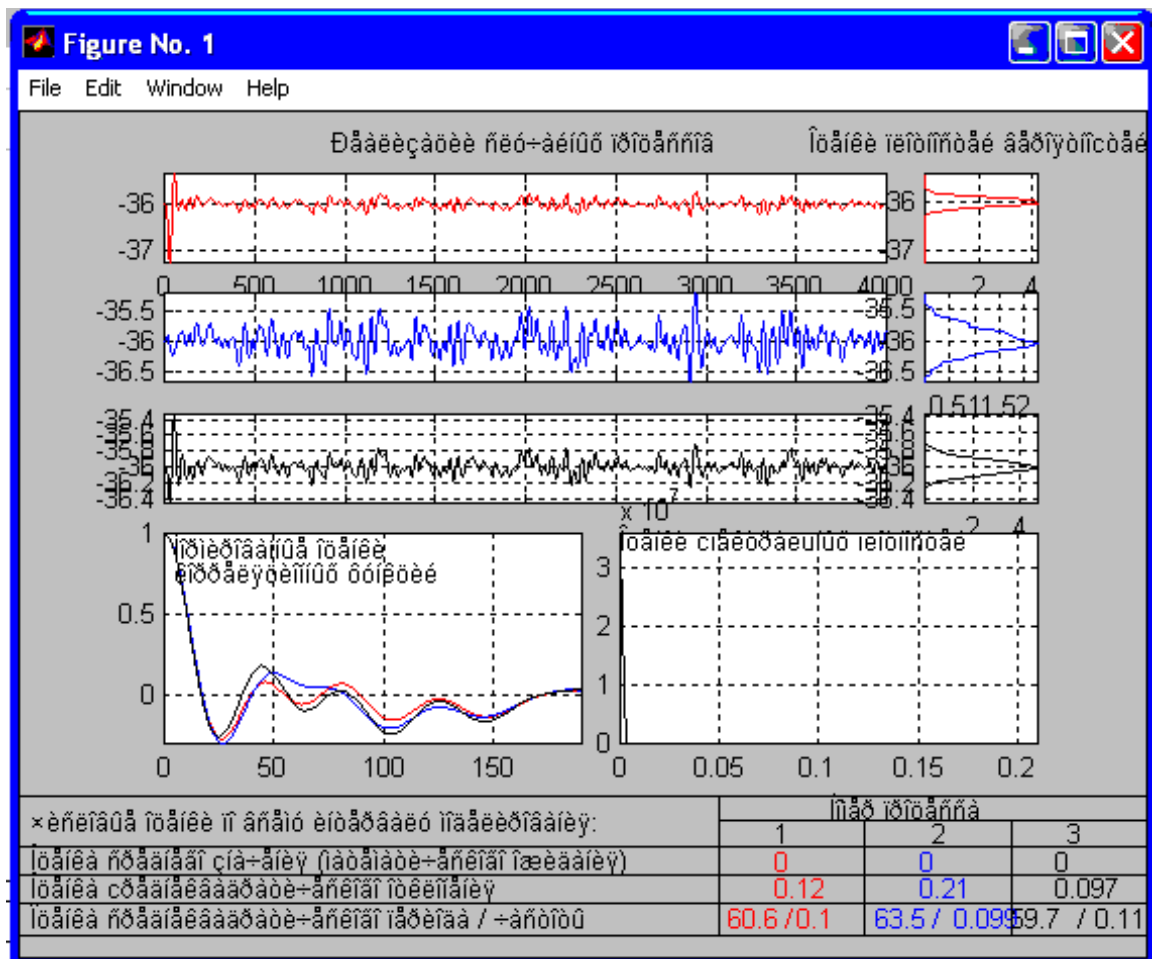


Рисунок 3.51 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик за каналом температури заморозки в камері θ_3 в 1- традиційний САУ, 2 – в САУ з нечітким регулятором, 3 – в САУ з комбінованим регулятором

Таблиця 3.3 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПД-регулятором за Рп	САУ з нечітким регулятором за Рп	САУ з регулятором за Рп, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈300 с	≈350 с	≈320 с
Максимальне динамічне відхилення	1,2	1,35	0,7
Інтегральний показник	260	-	246
Математичне очікування	-36	-36	-36
Середньоквадратичне відхилення	0,19	0,2	0,19

Таблиця 3.4 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПД-регулятором за Рп	САУ з регулятором за Рп, представленим штучною нейронною мережею	САУ з комбінованим ПД-регулятором
Час регулювання	≈300 с	≈320 с	250
Максимальне динамічне відхилення	1,2	0,7	0,7
Інтегральний показник	260	246	223
Математичне очікування	-36	-36	-36
Середньоквадратичне відхилення	0,12	0,21	0,097

З таблиці 3.4 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САУ з комбінованим регулятором краще функціонує, ніж інші розглянуті САУ. САУ з традиційним ПД-регулятором функціонує за якістю регулювання краще ніж САУ з нечітким регулятором при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

3.10 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера

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

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

```
(*
*
* File: lpcod1.scl
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for
subsystem "lpcod1/Subsystem"
*
* Model name                : Kod1
* Model version              : 1.2
* Model creator              : R1
* Model last modified by    : R1
* Model last modified on    : Tue Dec 12 21:08:56 2012
* Model sample time         : 0.1s
* Subsystem name            : lod1/Subsystem
* Subsystem sample time     : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 1.3 (R2012a) 19-Dec-2017
* ST code generated on      : Tue Dec 19 21:17:00 2017
*
* Target IDE selection      : Siemens SIMATIC Step 7
5.4
* Test Bench included      : No
*
*)
```

```

FUNCTION_BLOCK Subsystem
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    In1: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Out1: REAL;
END_VAR
VAR
    UnitDelay2_DSTATE: REAL;
    rtb_Gain11: REAL;
    rtb_Product: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:

        (* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Unit
Delay2' *)
        UnitDelay2_DSTATE := 0.0;
    1:

        (* Gain: '<S1>/Gain11' incorporates:
        * Inport: '<Root>/In1' *)
        rtb_Gain11 := -1.0001 * In1;

        (* Sum: '<S1>/Sum28' incorporates:
        * Constant: '<S12>/one'
        * Constant: '<S12>/one1'
        * Constant: '<S13>/one'
        * Constant: '<S13>/one1'
        * Constant: '<S14>/one'
        * Constant: '<S14>/one1'
        * Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:) '1'
        * Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:) '1'
        * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:) '2'
        * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:) '3'
        * Constant: '<S1>/b{1}2'
        * Constant: '<S1>/b{1}3'
        * Constant: '<S1>/b{2}1'
        * Gain: '<S12>/Gain'
        * Gain: '<S12>/Gain1'
        * Gain: '<S13>/Gain'
        * Gain: '<S13>/Gain1'
        * Gain: '<S14>/Gain'

```

```

* Gain: '<S14>/Gain1'
* Math: '<S12>/Exp'
* Math: '<S12>/Reciprocal'
* Math: '<S13>/Exp'
* Math: '<S13>/Reciprocal'
* Math: '<S14>/Exp'
* Math: '<S14>/Reciprocal'
* Product: '<S20>/Product'
* Product: '<S21>/Product'
* Product: '<S22>/Product'
* Product: '<S23>/Product'
* Sum: '<S12>/Sum'
* Sum: '<S12>/Sum1'
* Sum: '<S13>/Sum'
* Sum: '<S13>/Sum1'
* Sum: '<S14>/Sum'
* Sum: '<S14>/Sum1'
* Sum: '<S1>/netsum3'
* Sum: '<S1>/netsum4'
* Sum: '<S1>/netsum5'
* UnitDelay: '<S1>/Unit Delay2'
*
* About '<S12>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S12>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S13>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S13>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S14>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S14>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal *)
rtb_Product := (((1.0 / (EXP((((((1.0 / (EXP((( -
0.008585416 * rtb_Gain11) + 0.0299636307272) * -2.0) + 1.0))) *
2.0) - 1.0) * -5.24549188) + (((1.0 / (EXP((( -
0.003755 * rtb_Gain11) + 2.3100064233) * -2.0) +
1.0))) * 2.0) - 1.0) * -0.3700600457517))) +
0.03067679) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) + UnitDelay2_DSTATE;

```

```

(* Output: '<Root>/Out1' incorporates:
* Constant: '<S10>/one'
* Constant: '<S10>/one1'
* Constant: '<S11>/one'
* Constant: '<S11>/one1'
* Constant: '<S15>/one'
* Constant: '<S15>/one1'
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)''
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:)''
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)''
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)''1'
* Constant: '<S1>/b{1}'
* Constant: '<S1>/b{1}1'
* Constant: '<S1>/b{2}'
* Gain: '<S10>/Gain'
* Gain: '<S10>/Gain1'
* Gain: '<S11>/Gain'
* Gain: '<S11>/Gain1'
* Gain: '<S15>/Gain'
* Gain: '<S15>/Gain1'
* Gain: '<S1>/Gain10'
* Math: '<S10>/Exp'
* Math: '<S10>/Reciprocal'
* Math: '<S11>/Exp'
* Math: '<S11>/Reciprocal'
* Math: '<S15>/Exp'
* Math: '<S15>/Reciprocal'
* Product: '<S16>/Product'
* Product: '<S17>/Product'
* Product: '<S18>/Product'
* Product: '<S19>/Product'
* Sum: '<S10>/Sum'
* Sum: '<S10>/Sum1'
* Sum: '<S11>/Sum'
* Sum: '<S11>/Sum1'
* Sum: '<S15>/Sum'
* Sum: '<S15>/Sum1'
* Sum: '<S1>/Sum5'
* Sum: '<S1>/netsum'
* Sum: '<S1>/netsum1'
* Sum: '<S1>/netsum2'
*
* About '<S10>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S10>/Reciprocal':

```

```

* Operator: reciprocal
*
* About '<S11>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S11>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S15>/Exp':
* Operator: exp

```

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

3.11 Висновки за розділом

В процесі виконання роботи були синтезовані моделі САУ з нечіткими регуляторами та з нейрорегулятором що визначена як нейронмережева система управління. Також була розроблена модель САУ з комбінованим регулятором що є синтезом традиційного ПД-регулятора та штучної нейронної мережі. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Були визначені функції приналежності до нечітких множин, сформована база правил функціонування регуляторів 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 нечітких регуляторів було виконано тренування визначених штучних нейронних мереж, які можуть виконувати роль нейрорегуляторів. Тренування штучних нейронних мереж було виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink за відповідними виконавчими кодами. Були розроблені моделі САУ з регулятором що представляється штучною нейронною мережею та САУ з комбінованим регулятором.. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором були проведена при тих же умовах, що і САУ з традиційними ПД-регуляторами.

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 240 при САУ з нейрорегулятором, 260 при САУ з традиційним ПД-регулятором і 224 при САУ з комбінованим регулятором..

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора температури заморозки в камері θ_3 , була сформована програма для промислового контролера.

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 каналами регулювання.

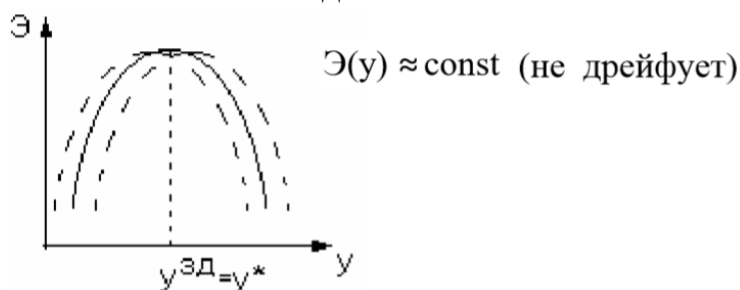
\

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МОДЕРНІЗОВАНОЇ САК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ ШОКОВОЇ ЗАМОРОЗКИ М'ЯСА

4.1. Опис загальних принципів побудови системи гарантуючого керування.

У системах регулювання задане значення регульованої змінної або закон його зміни є оптимальними або близькими до оптимальних значень регульованих змінних. У тому випадку, коли в умовах експлуатації, що змінюються, ці оптимальні значення змінюються мало, то для оптимізації режимів роботи технологічного агрегату функції регулювання достатньо.

4.1.1 Постановка задачі.



Тобто для окремого випадку, коли дрейфом функції ефективності $\mathcal{E}(y)$ можна знехтувати, то завдання оптимізації вироджується завдання регулювання. Разом про те існують об'єкти, котрим дрейф функції ефективності є значним і нехтувати ним економічно недоцільно. Це означає, що якщо ми хочемо за умов дрейфу екстремуму забезпечувати максимальну ефективність функціонування об'єкта, то заданий режим роботи об'єкта (наприклад, $y^{\text{зд}}$) потрібно змінювати. Тобто САУ у разі має реалізувати не тільки функцію регулювання (стабілізувати режим роботи об'єкта на рівні $y^{\text{зд}}$), а й має бути доповнена функцією оптимізації, тобто. пошуку такого $y^{\text{зд}}$, при якому функція ефективності досягатиме свого екстремуму:

$$y^{\text{зд}} = y^* = \operatorname{argmax}(\operatorname{min}) \mathcal{E}(y^{\text{зд}}).$$

В цьому випадку об'єкт управління стає об'єктом оптимізації.

У нашому випадку для вирішення задачі оптимізації доцільно використовувати систему екстремального регулювання (СЕР) яка є окремим випадком САО, що найчастіше використовується в промисловості. Як конкретний варіант вибираємо СЕР із запам'ятовування екстремуму.

4.1.2. Системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму.

Дані системи досить часто використовуються у промисловості. Були реалізовані стандартні програми та апаратні оптимізатори (екстремальні регулятори). Розглянемо структурну схему відповідної САО:

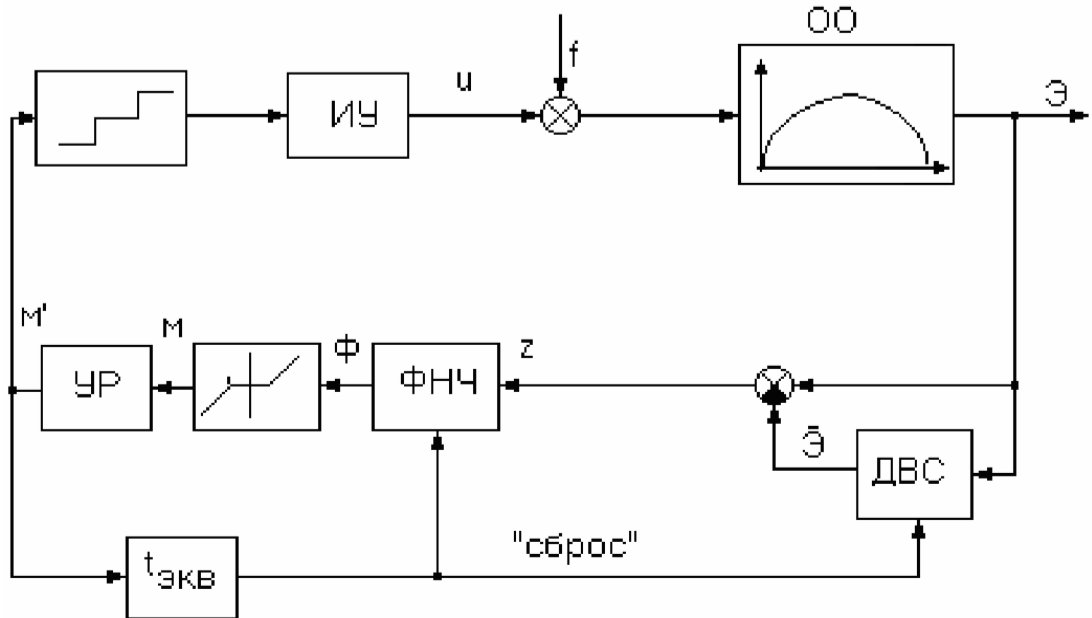


Рис. 4.1. Структурна схема САО із запам'ятовуванням екстремуму (де ДВС – детектор зростаючого сигналу; УР – пристрій реверсу, ФНЧ – фільтр низьких частот.

ДВЗ «пропускає» через себе тільки зростаюче значення \mathcal{E} . У тому випадку, якщо \mathcal{E} починає зменшуватися, то значення \mathcal{E} на виході детектора буде наступним:

$$\text{если } \frac{d\mathcal{E}}{dt} > 0, \text{ то } \mathcal{E}' = \mathcal{E} \qquad \text{если } \frac{d\mathcal{E}}{dt} < 0, \text{ то } \mathcal{E}' = \mathcal{E}^* \Big|_{\frac{d\mathcal{E}}{dt} = 0}$$

ФНЧ і зона нечутливості (ЗН) є захистом від шумів, попереджаючи неправильні реверси. За допомогою їх налаштувань можна впливати на розмах пошукових коливань. Пристрій реверсу видає імпульс на 3-х позиційне реле, яке змушує виконавчий пристрій (інтегратор) змінювати на своєму виході значення впливу, що управляє. Реверс відбувається щоразу при зміні знаку M . Розглянемо часові діаграми роботи системи.

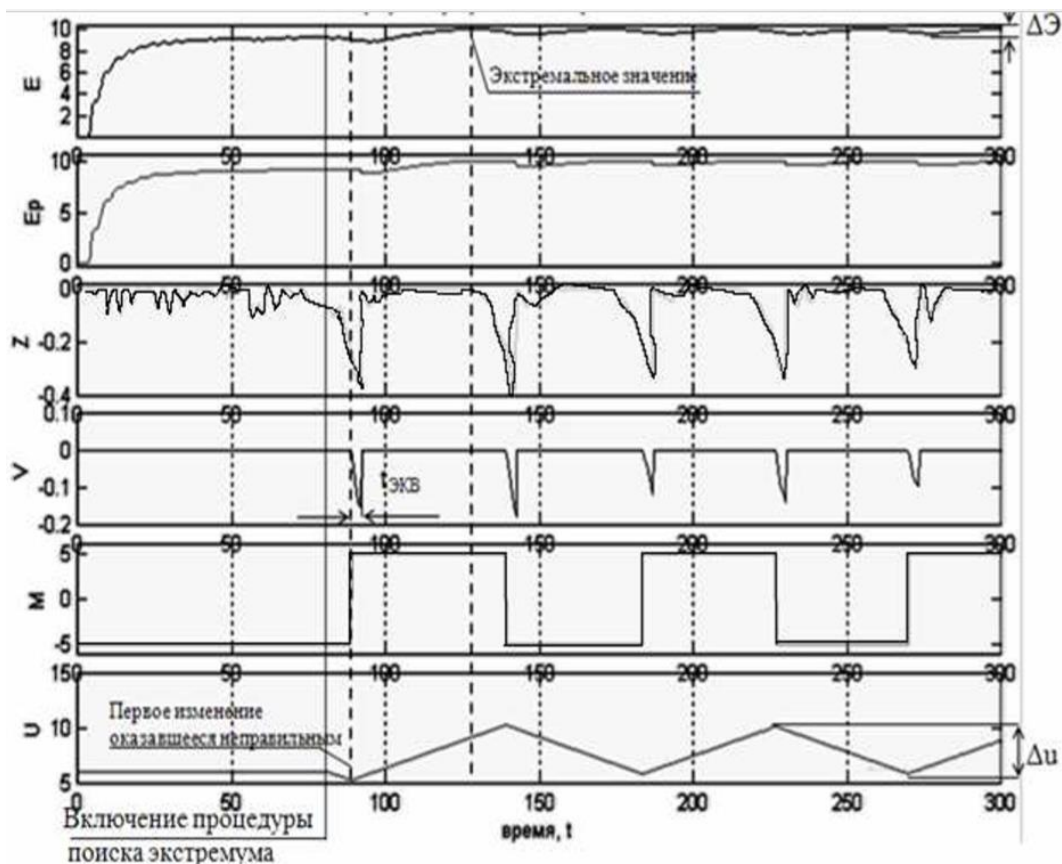


Рис 4.2. Часові діаграми моделювання САО (відображення процедури пошуку екстремуму у часі).

У момент реверсу через ланку запізнення (його значення відповідає еквівалентному запізненню в каналі управління) видається сигнал скидання, який обнуляє ФНЧ, і вихід ДВС записує поточне значення \mathcal{E} .

Нехай у момент часу $u = u_0$, а його напрям зміни виявився неправильним, тобто. у бік зменшення \mathcal{E} . При цьому сигнал Z і φ зростають по модулю (стають «негативнішим»). Після того, як сигнал перевищить ширину зони нечутливості: на виході пристрою реверсу з'явиться імпульс, який змінить стан 3-х позиційного реле і інтегратор почне змінювати сигнал u в протилежному напрямку. Цей напрямок вже буде правильним.

У цьому випадку \mathcal{E} зростатиме, сигнал $\mathcal{E}' \equiv \mathcal{E}$, а сигнали Z , Φ і M дорівнюють нулю. Це триватиме до того часу, поки u стане відповідати \mathcal{E}^* , тобто максимальному екстремуму \mathcal{E} .

Оскільки в об'єкті та пристрої керування є запізнення, то u продовжуватиме змінюватися в тому ж напрямку. Тоді ДВС перестане пропускати через себе \mathcal{E} ,

запам'ятавши \mathcal{E}^* . При цьому сигнали Z та Φ почнуть зростати по модулю. Коли Φ досягне зони нечутливості, пристрій реверсу видасть імпульс і змінить стан 3-х позиційного реле, що керує ІУ.

Через $t_{\text{ЭКВ}}$ ФНЧ буде обнулено, але в виході ДВС буде записано поточне значення \mathcal{E} . Змінюючись у напрямі u спочатку викликає збільшення \mathcal{E} , до \mathcal{E}^* , та був – його нове зменшення, тобто. робота керуючого пристрою повториться.

Важливо, що в цьому випадку пошук \mathcal{E}^* здійснюється безперервною зміною u . При цьому ця зміна забезпечується зміною u генерується самої СЕР (самим алгоритмом роботи СЕР). Вона працює у режимі автоколивань.

Слід зазначити, що чим більша амплітуда і частота зміни u (принаймні доти, доки не починаються виявлятися фільтруючі властивості об'єкта оптимізації (ОО)), тим СЕР (обидва варіанти) можуть відстежувати швидші дрейфи екстремумів (і це добре).

Але велика амплітуда коливань викликає збільшення втрат у пошук, т.к. значення \mathcal{E} не залишається в \mathcal{E}^* , а змінюватиметься на околиці екстремуму з тим більшою амплітудою, чим більше амплітуда коливань u , втрати на пошук – погано.

У тому випадку, якщо відомо, що дрейф екстремуму повільний, можна процедуру його пошуку періодично відключати, відновлюючи її примусово через певний час. У момент зупинки значення u доцільно залишити не на останньому значенні, а розрахувати u , наприклад, як середнє коливань для кращого потрапляння в \mathcal{E}^* .

4.2. Доопрацювання математичної моделі ОР до моделі ОО на вирішення завдання оптимального управління.

Для побудови екстремальної системи оптимізації з запам'ятовуванням екстремуму модель ОР була дороблена. Розроблений раніше об'єкт регулювання не передбачав нелінійні статичні властивості об'єкта регулювання за каналом $U_2 - \Theta_{\text{гп}}$, тому існуюча модель ОК була доповнена спрощеною моделлю статичної характеристики з екстремумом за каналом

U2 - $\Theta_{\text{П}}$. Модель статички представлена наступною нелінійною квадратичною залежністю:

$$\Delta\Theta_{\text{П}} = a*(U2 - U2_e)^2 + \Delta\Theta_{\text{П_e}}$$

де

U2_e і $\Delta\Theta_{\text{П_e}}$ – координати екстремуму,

a – коефіцієнт крутості параболы.

Повна схема моделювання об'єкту оптимізації представлена на рис. 3.1.

Модель статички інтегрована в перехресний зв'язок так що на вході моделі температура а на виході фактично після перемноження на «-1» значення приросту $\Delta\Theta_{\text{П}}$.

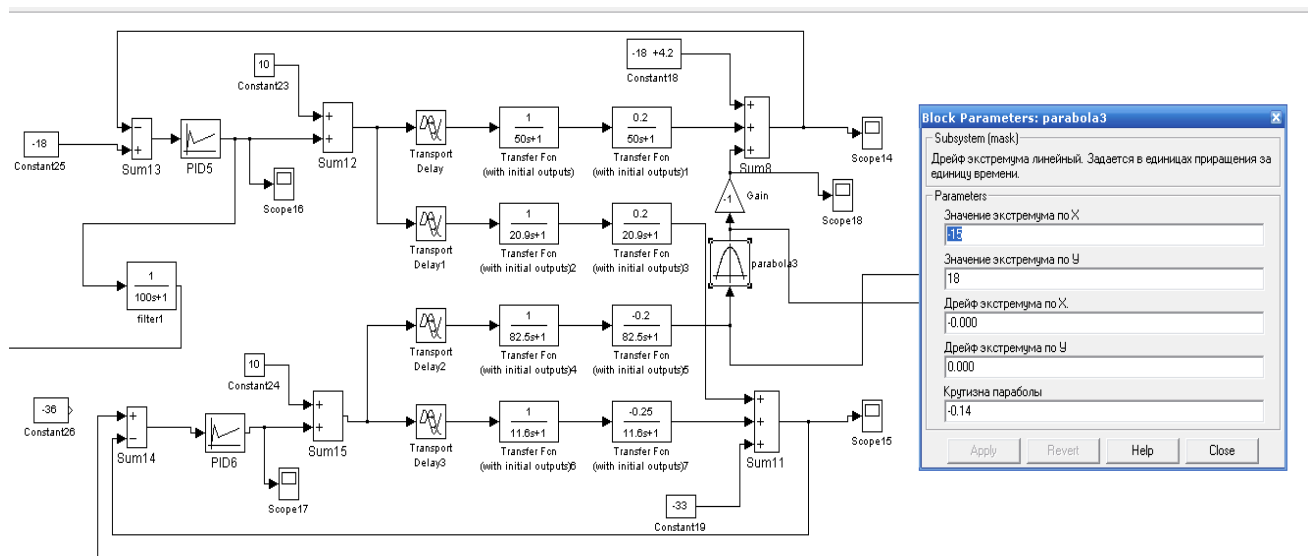


Рис. 4.3. Загальний вид схеми моделювання об'єкту оптимізації (ОО).

4.3. Розробка структурної схеми САУ та опис принципу її дії.

На основі САР базової структури розроблено структуру модернізованої САУ, яка передбачає функцію екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму.

Структурна схема САУ представлена на рис. 4.4.

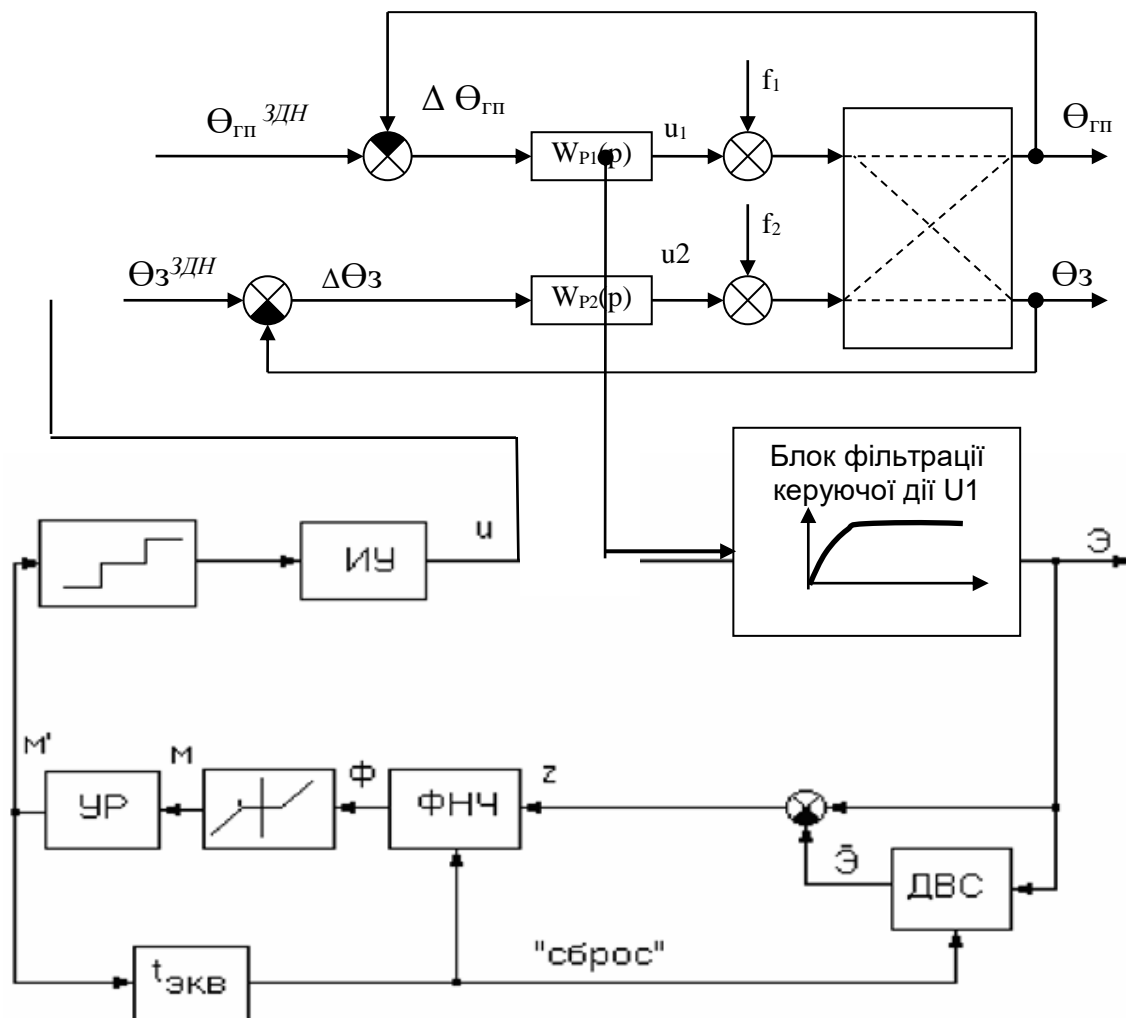


Рис. 4.4. Структурна схема модернізованої системи керування яка додатково реалізує функцію автоматичної оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму.

В якості показника ефективності \mathcal{E} виступає поточне значення керуючої дії у контурі стабілізації температури готового продукту на виході з фрізера, а саме швидкість обертів спірального конвеєра (U_1). Керуюча дія фільтрується фільтром низької частоти та подається в алгоритм пошукової оптимізації. В якості оптимізованої змінної виступає задане значення температури заморозки в камері $\Theta_3^{ЗДН}$.

Спрощено показник ефективності \mathcal{E} можна розраховувати на основі виразу:

$$U_1 = f(\Theta_3^{ЗДН})$$

Вважаємо що цей показник ефективності (ця залежність) має при певних умовах екстремальний характер. При зниженні температури заморозки в камері

швидкість охолодження тушок курки теж буде зростати і система стабілізації температури готового продукту (тушок курки на виході фрізеру) буде збільшувати швидкість обертів спірального конвеєра (продуктивність фрізеру) $U1$. Тобто критерій буде збільшуватися. При подальших спробах зниження температури заморозки за рахунок збільшення швидкості обертів вентиляторів ($U1$) можлива ситуація коли температура повітря більше не буде знижуватись, а може і трошки збільшитись за рахунок зміни параметрів теплообміну. Це призведе до того що швидкість охолодження тушок курки перестане зростати і може поступово знижуватися, що призведе до стабілізації продуктивності фрізеру або її зменшення. Тобто показник якості спочатку буде зростати а потім буде зменшувати своє значення. В окремих випадках швидкість обертів вентиляторів може вийти на своє максимальне значення і це буде визначати що ресурсів керування для подальшого зменшення температури заморозки більше немає. Але це окремий випадок.

Задача системи що представлена на рис.4.4 знаходити оптимальне значення температури заморозки в камері Θ_{z}^{3DH} , при якому обраний показник ефективності \mathcal{E} буде приймати максимальне значення.

У розробленій системі передбачено регулювання температури готового продукту і температури заморозки в камері. Система стабілізує ці параметри на заданих значеннях. Також у системі реалізовано функцію екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Для її реалізації в блоці «Блок розрахунку значення показника ефективності» на основі формул, представлених вище, проводиться розрахунок поточного значення обраного показника ефективності. Розраховане значення показника ефективності передається в блоки, що реалізують алгоритм роботи екстремальної системи, обробляється там, і виконавчий пристрій (ИУ) формує керуючу дію, що змінює задане значення контуру стабілізації температури заморозки в камері Θ_{z}^{3DH} . Алгоритм роботи системи описано у п.п. 4.1.2 та передбачає її роботу в режимі автоколивань. Керуюча дія змінюється таким чином, що поточне значення показника ефективності коливається в області екстремального значення.

4.4. Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів управління.

Параметри регуляторів температури залишимо колишніми отриманими раніше при проведенні оптимального параметричного синтезу.

Настроювальні параметри екстремальної системи регулювання із запам'ятовуванням екстремуму задаватимемо на основі динамічних властивостей каналу регулювання Θz та абсолютних значень показника ефективності (для розрахунку настроювальних параметром зони нечутливості).

4.5. Розробка імітаційної моделі екстремальної системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму та дослідження її роботи.

Доповнимо схему моделювання функціональними блоками, що реалізують алгоритми екстремальної системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму та проведемо налаштування їх параметрів. Отримана схема моделювання представлена на рис. 4.5.

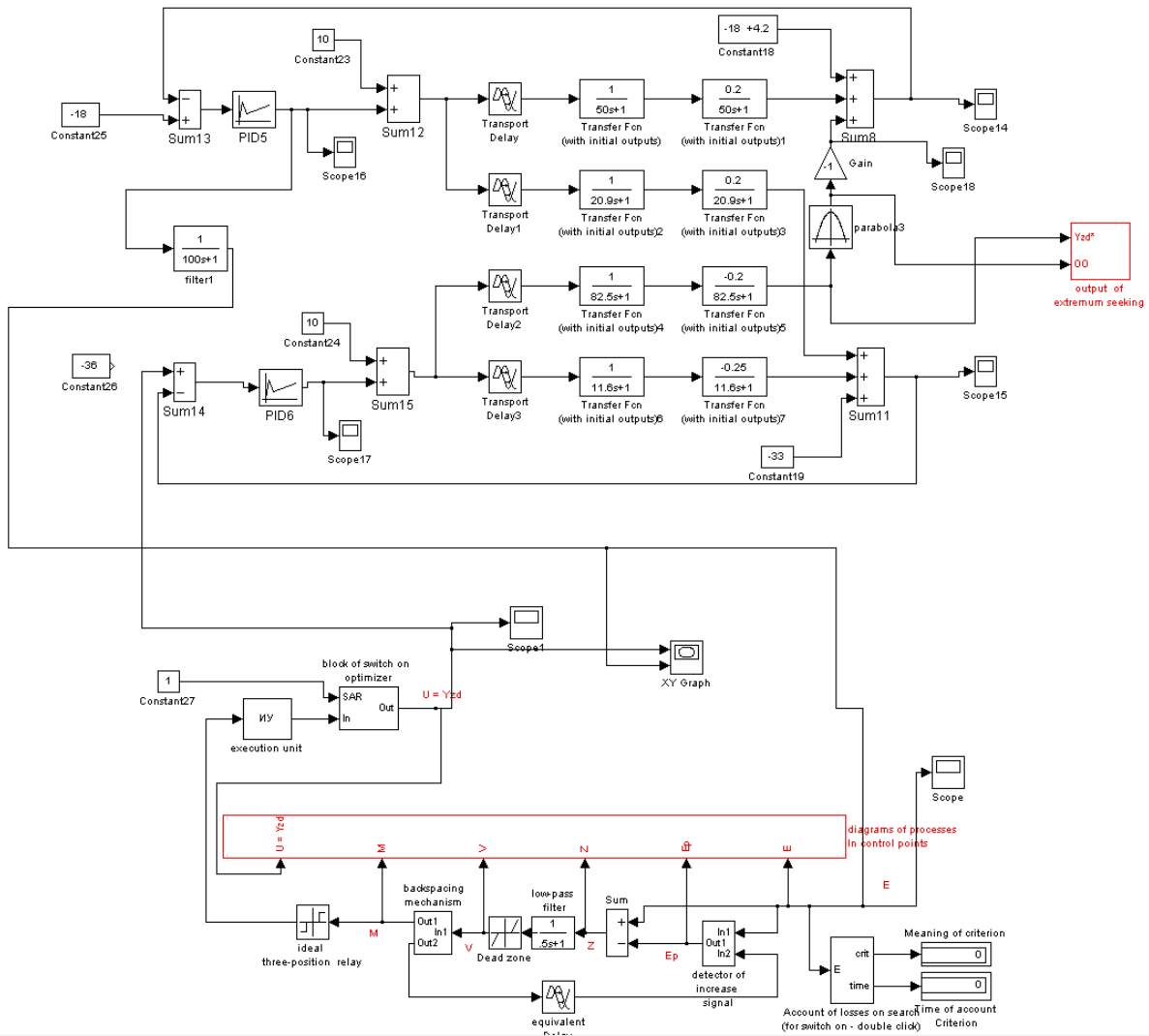


Рис. 4.5. Загальний вигляд схеми моделювання екстремальної системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму процесом заморожування курятини.

На рис. 4.6 - 4.8 представлені результати моделювання екстремальної системи оптимізації при фіксованому положенні екстремуму функції ефективності. Як видно з результатів моделювання, система працює коректно, поточне значення показника ефективності коливається в околиці свого екстремального значення (рис. 4.7).

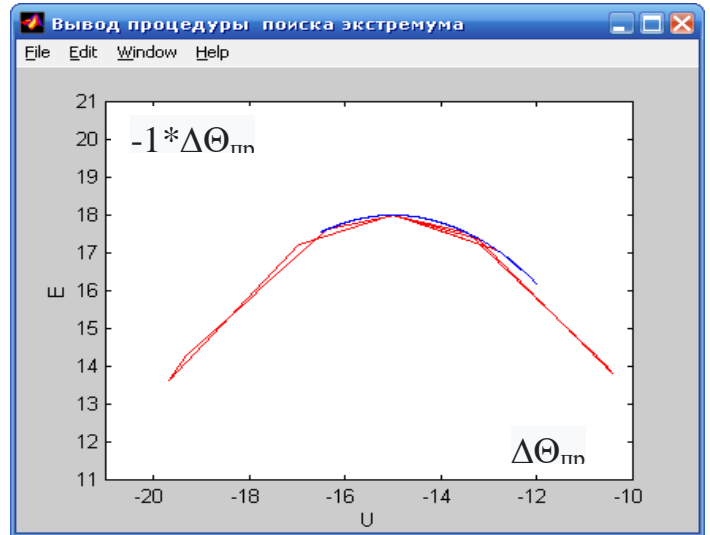
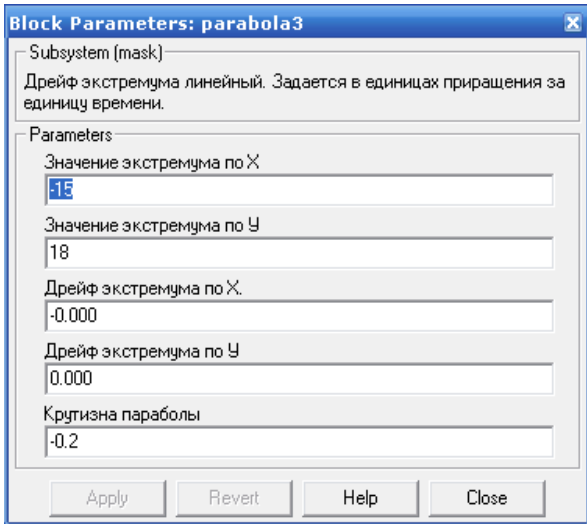


Рис. 4.6. Налаштувальні параметри і графік моделі статичної характеристики в каналі $U_2 - \Theta_{пр}$ об'єкта керування.

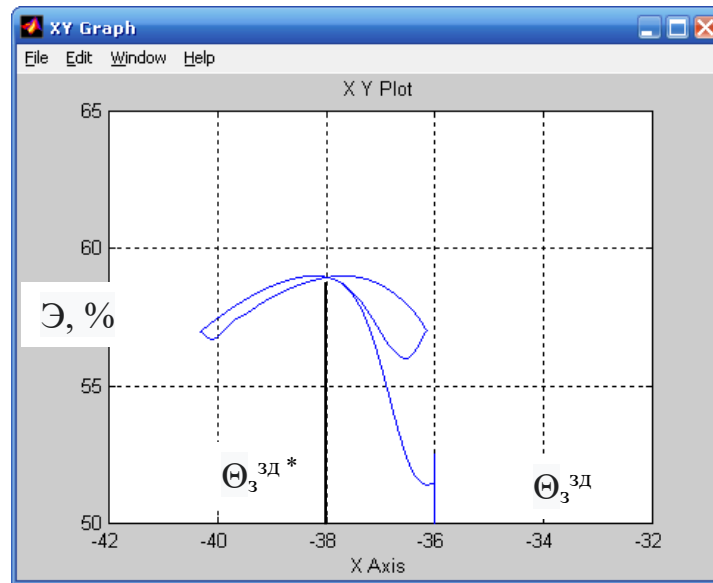


Рис. 4.7. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(\Theta_3^{зд})$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації.

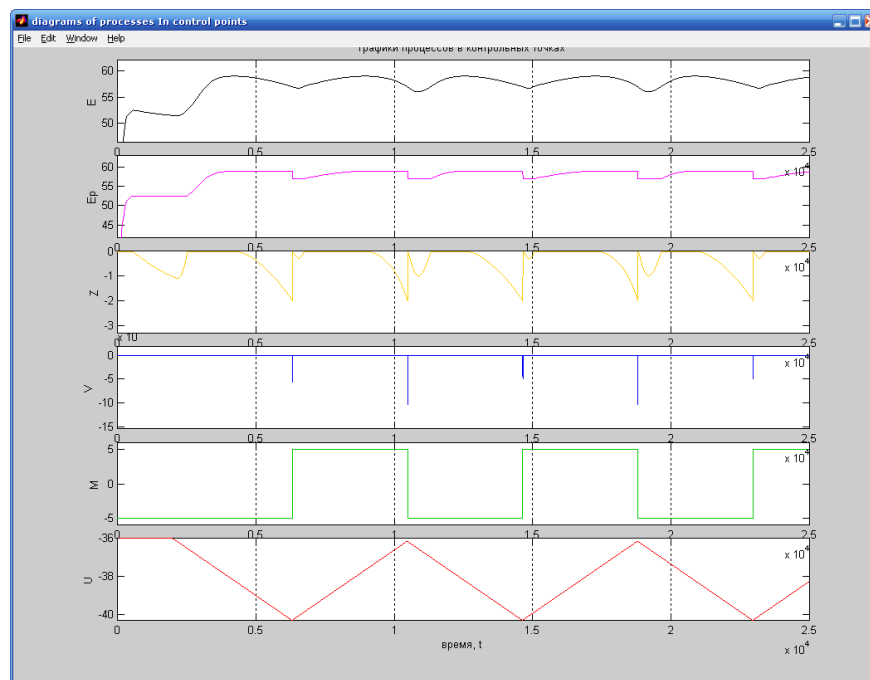


Рис. 4.8. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації.

На рис. 4.9 – 4.17 представлені результати моделювання екстремальної системи оптимізації при дрейфі екстремуму функції ефективності. Як видно з результатів моделювання система працює коректно, вона відстежує зміну положення екстремуму функції ефективності як при дрейфі по осі ординат, так і при дрейфі положення екстремуму по осі абсцис і по осі ординат одночасно. Поточне значення показника ефективності у всіх випадках коливається навколо свого екстремального значення.

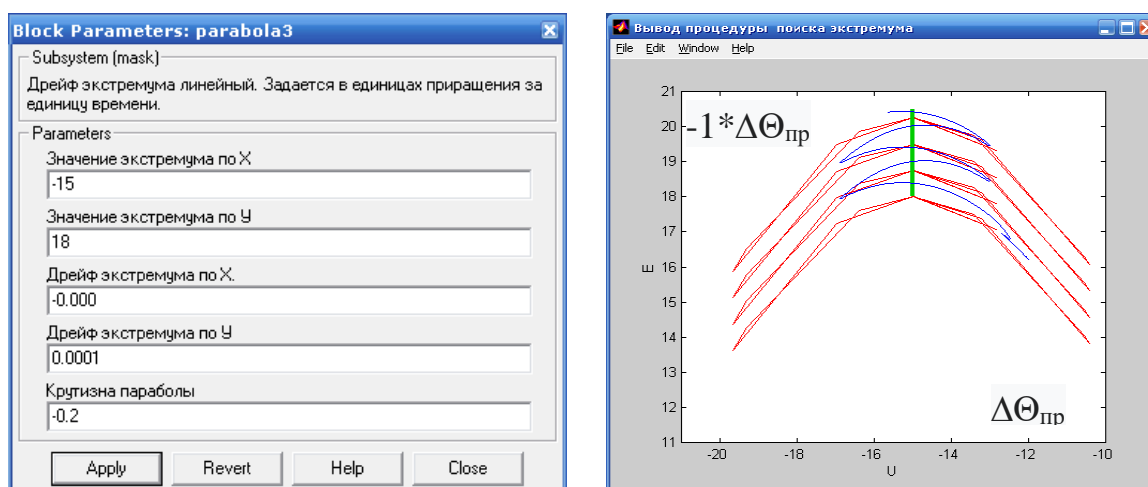


Рис. 4.9. Налаштувальні параметри і графік моделі статичної

характеристики в каналі $U_2 - \Theta_{пр}$ об'єкта керування при дрейфі екстремуму.

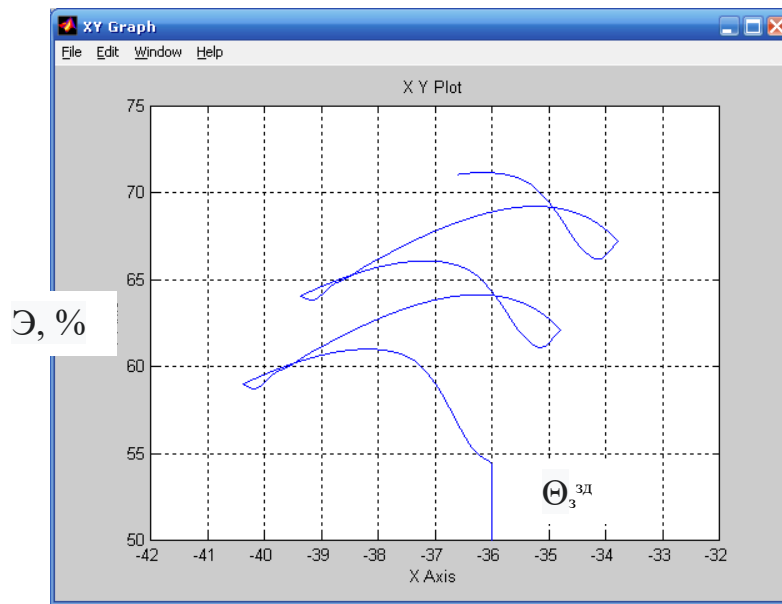


Рис. 4.10. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(\Theta_3^{3д})$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

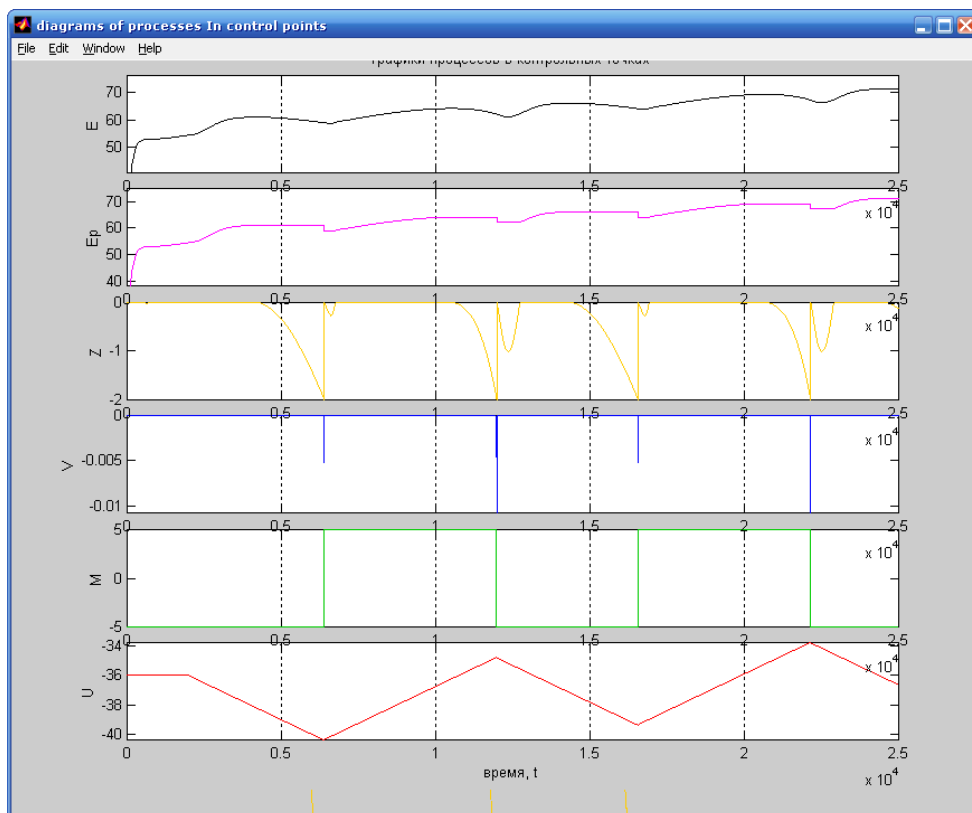


Рис. 4.11. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

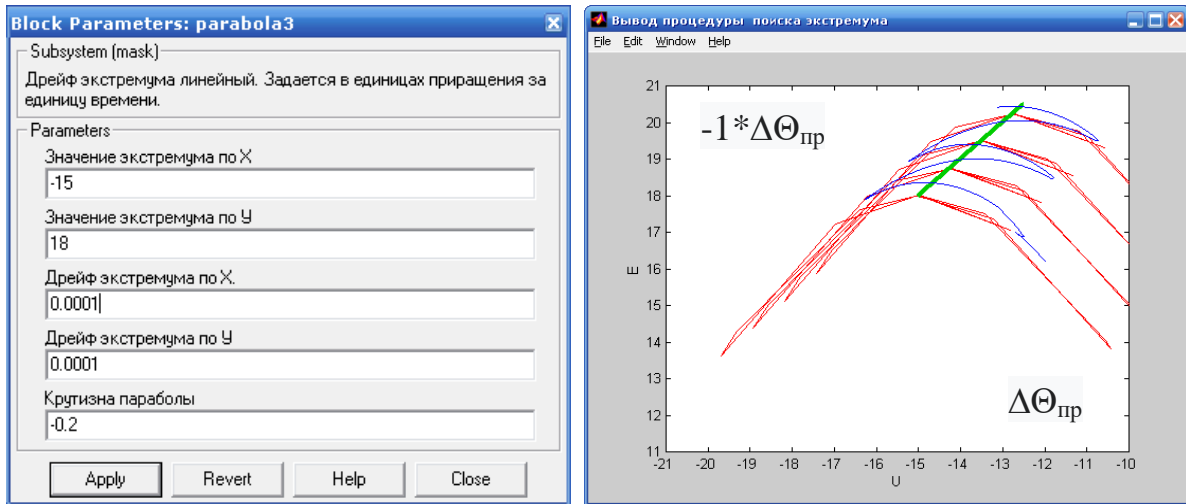


Рис. 4.12. Налаштувальні параметри і графік моделі статичної характеристики в каналі $U_2 - \Theta_{пр}$ об'єкта керування при дрейфі екстремуму.

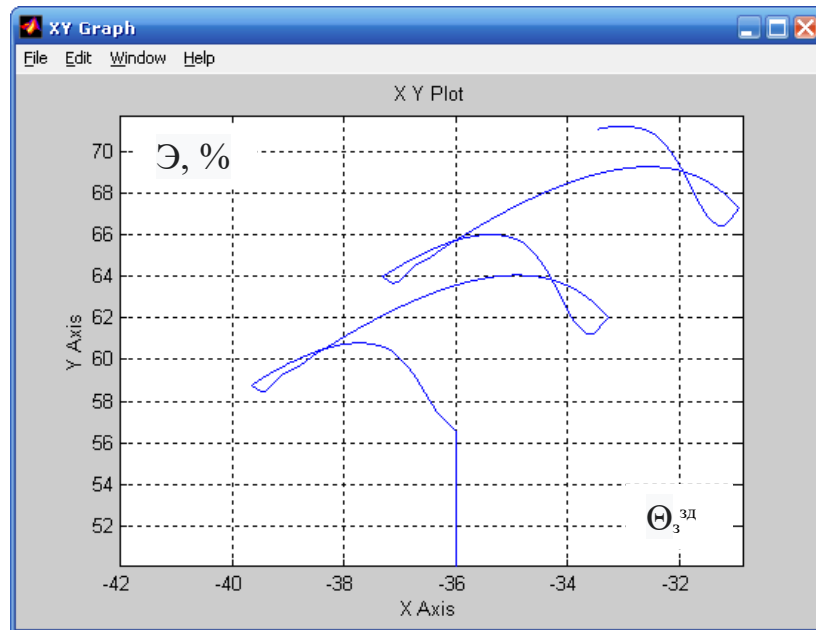


Рис. 4.13. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(\Theta_3^{зд})$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

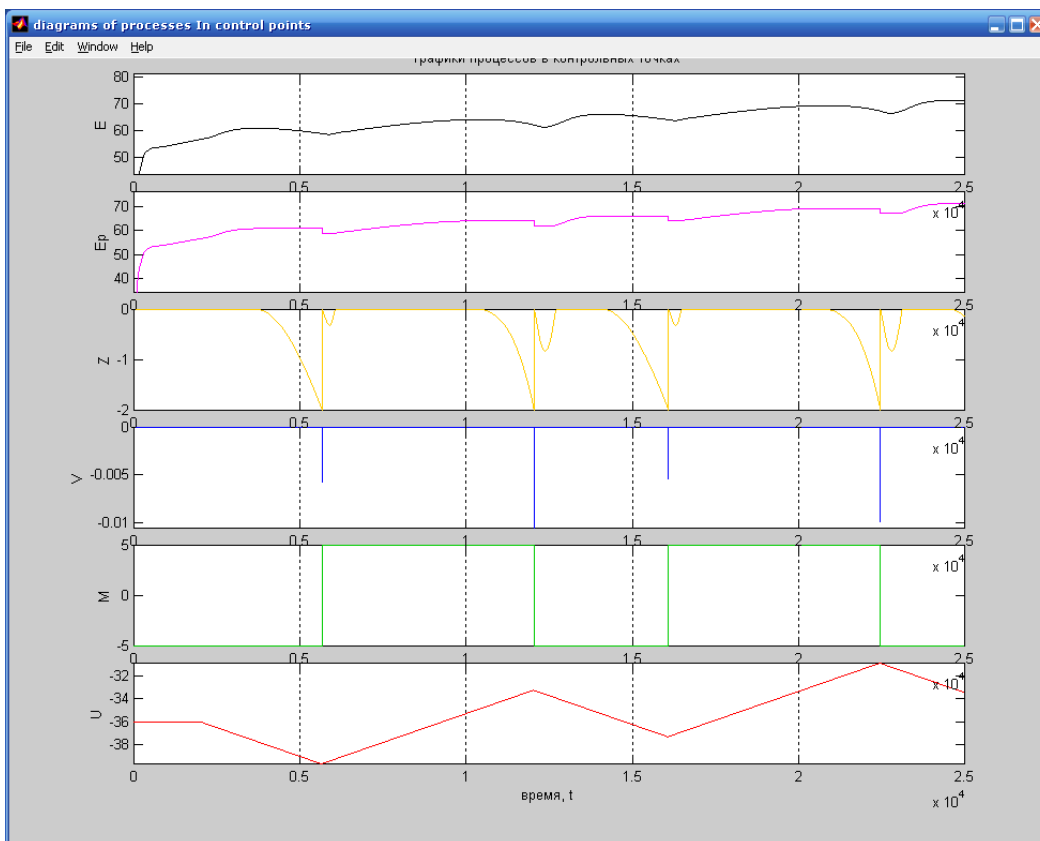


Рис. 4.14. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

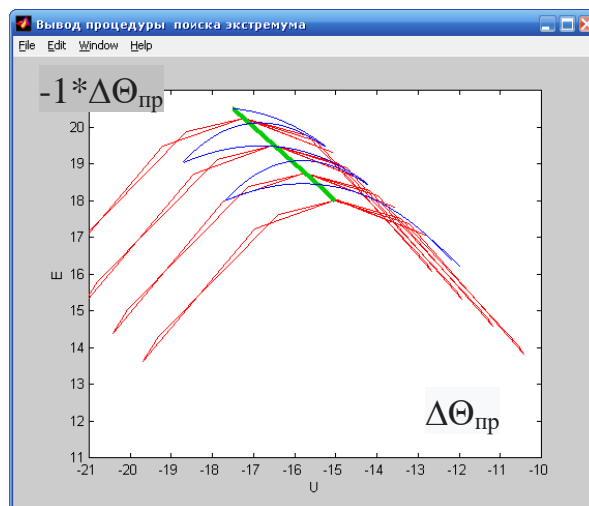
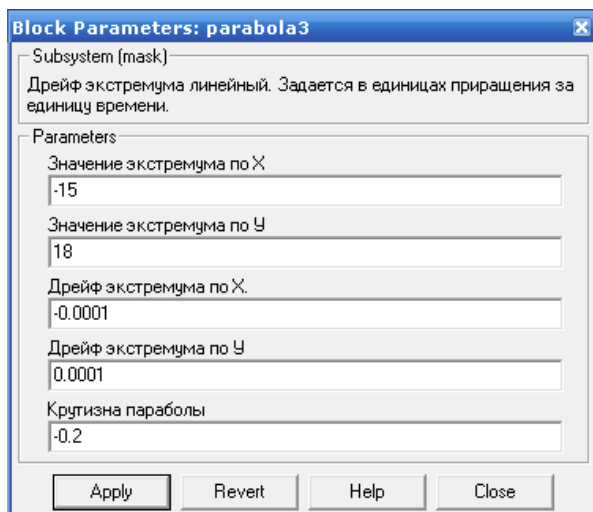


Рис. 4.15. Налаштувальні параметри і графік моделі статичної характеристики в каналі $U_2 - \Theta_{пр}$ об'єкта керування при дрейфі екстремуму.

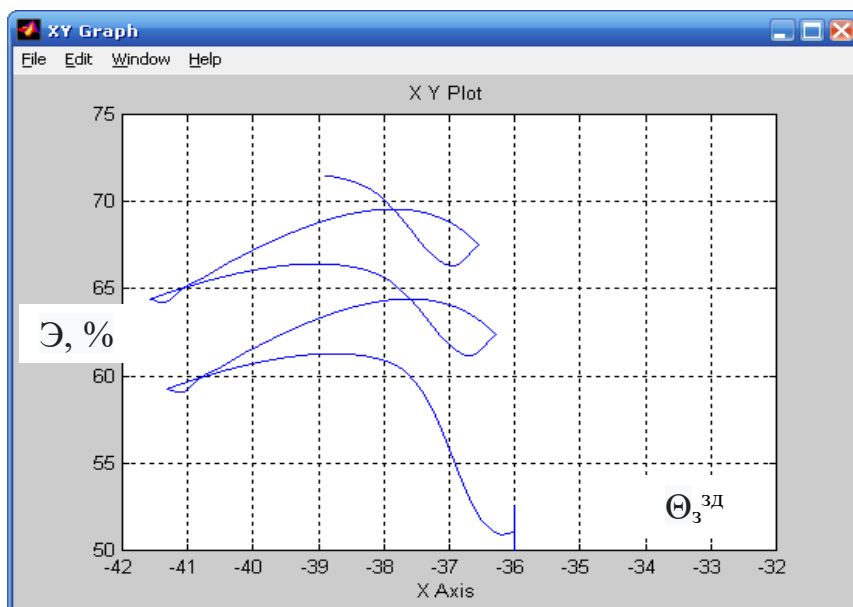


Рис. 4.16. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(\Theta_3^{3Д})$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

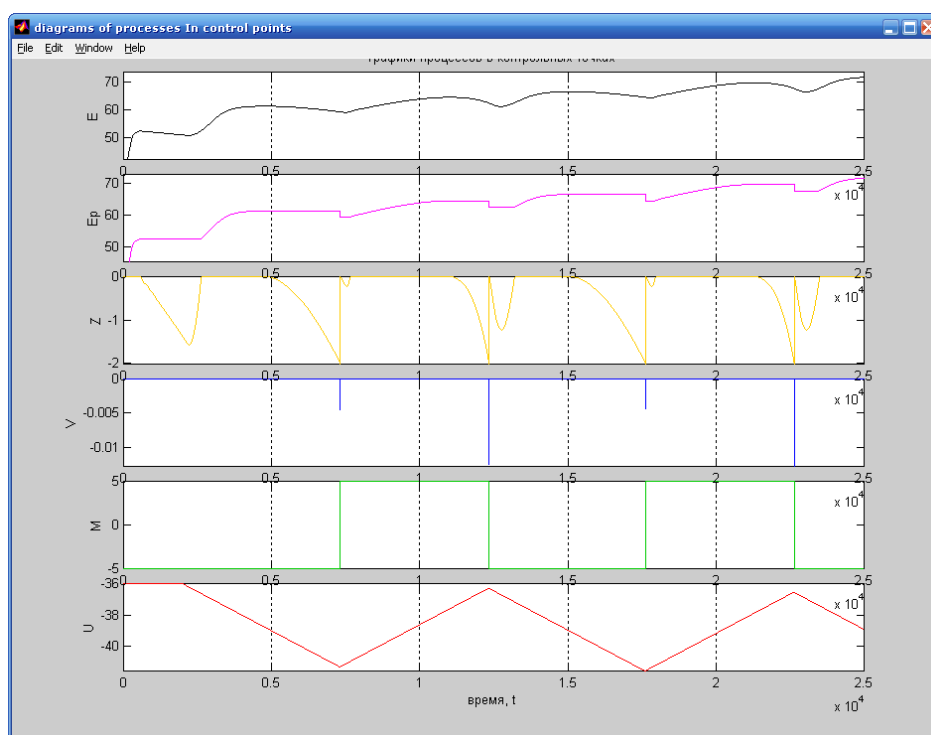


Рис. 4.17. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

На рис. 4.18 – 4.21 представлені результати моделювання екстремальної системи оптимізації при різних значеннях зони нечутливості, при її зменшенні на 25% (рис. 4.18 і 4.19) та при її збільшенні відносно номінального значення на 25% (рис. 4.20 і 4.21). Як видно з результатів моделювання система працює коректно, вона знаходить положення екстремуму функції ефективності але при великих значеннях зони нечутливості втрати на пошук більші. При зменшенні зони нечутливості на 50% система стає непрацездатною.

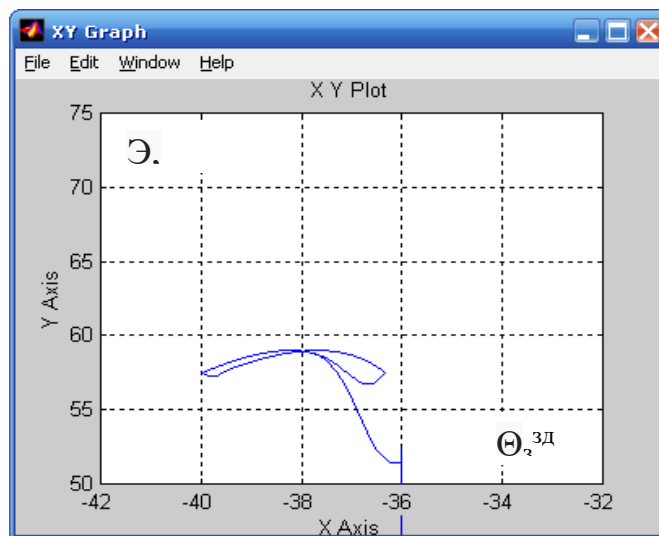


Рис. 4.18. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(\Theta_2^{3Д})$

(фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації без дрейфу екстремуму при зменшенні зони нечутливості на 25% .

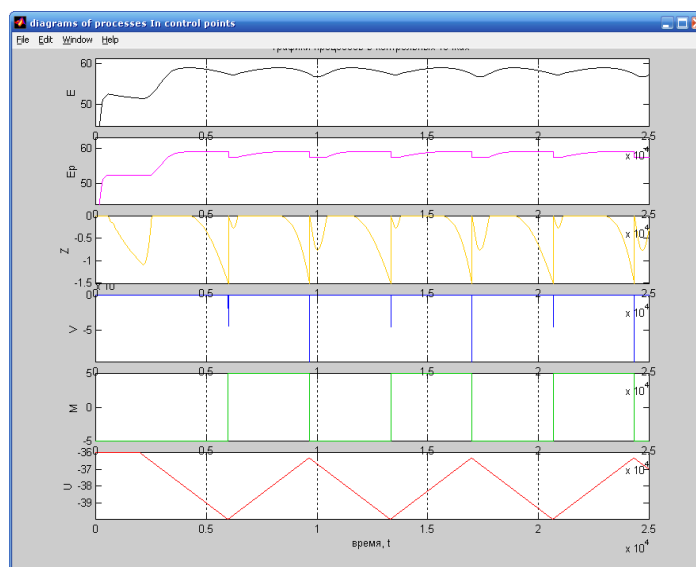


Рис. 4.19. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації без дрейфу екстремуму.

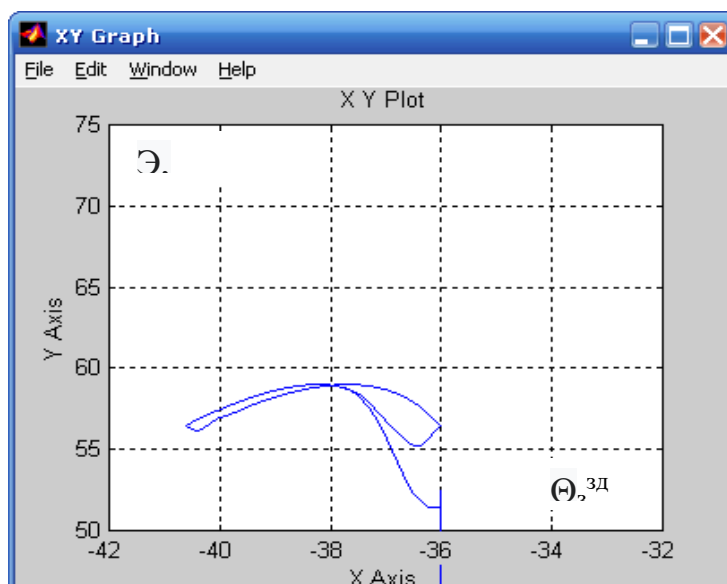


Рис. 4.20. Графік зміни показника ефективності Θ_3^{3D} (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації без дрейфу екстремуму при збільшенні зони нечутливості на 25% .

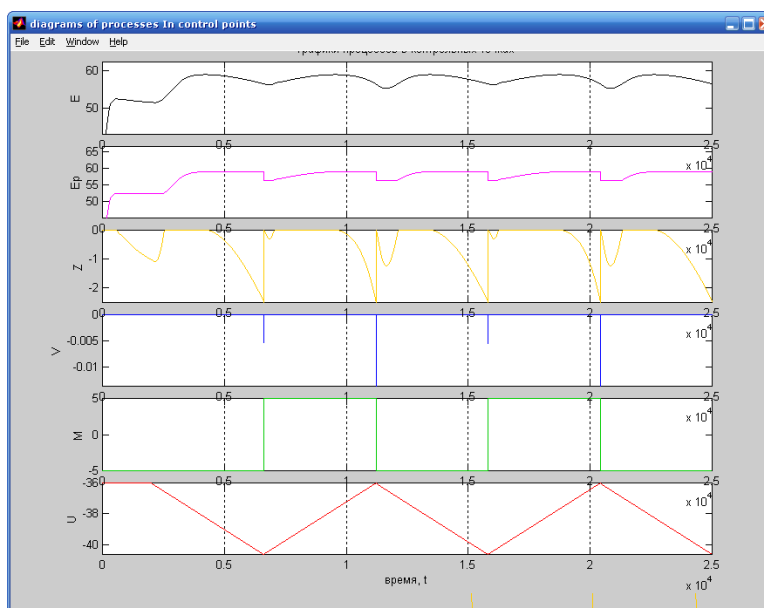


Рис. 4.21. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації без дрейфу екстремуму.

На рис. 4.22 – 4.24 представлені результати моделювання екстремальної системи оптимізації при зменшенні крутизни параболи на 30%. Як видно з результатів моделювання система працює коректно, вона знаходить положення екстремуму функції ефективності але втрати на пошук більші. При збільшенні крутизни параболи система може стати непрацездатною.

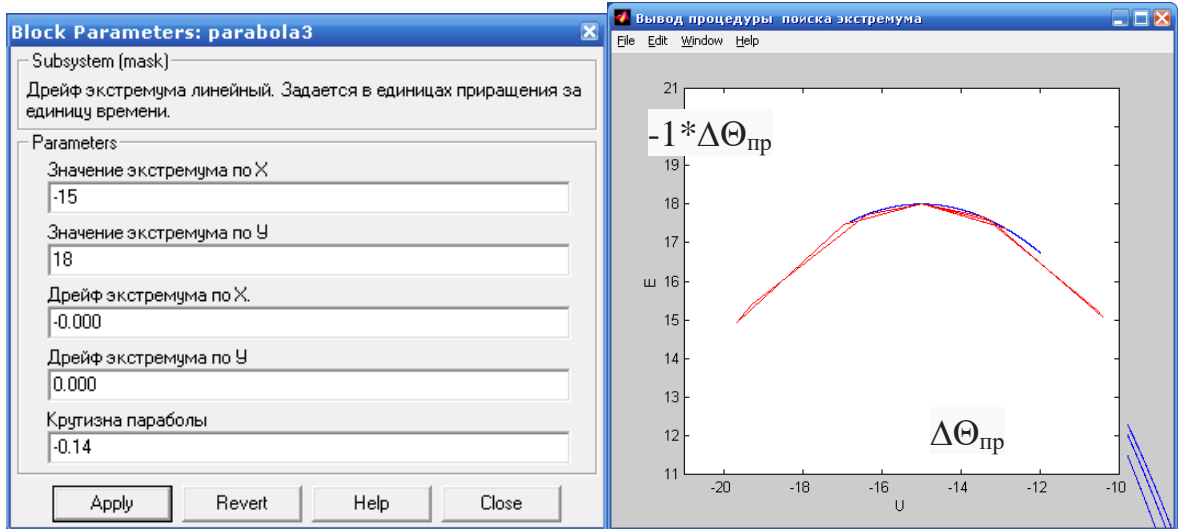


Рис. 4.22. Налаштувальні параметри і графік моделі статичної характеристики в каналі $U_2 - \Theta_{пр}$ об'єкта керування.

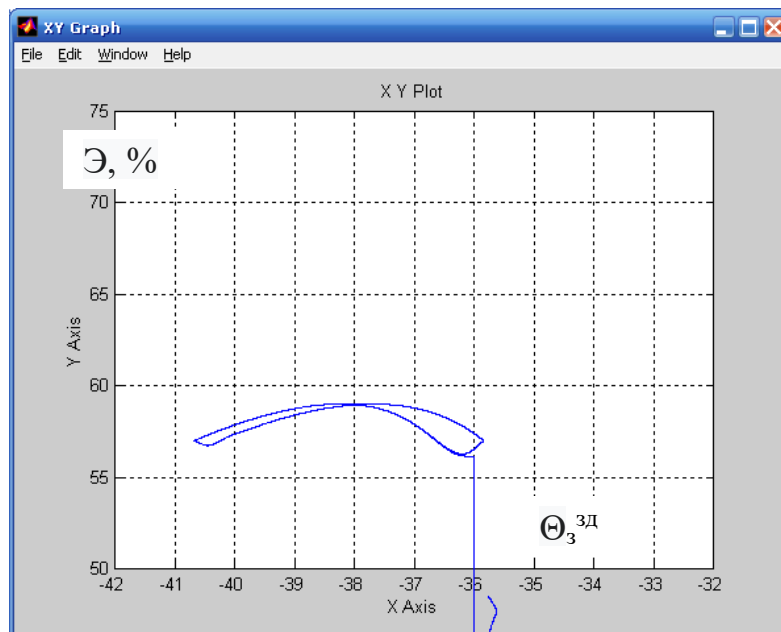


Рис. 4.23. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(\Theta_3^{зд})$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації при зменшенні крутизни параболы.

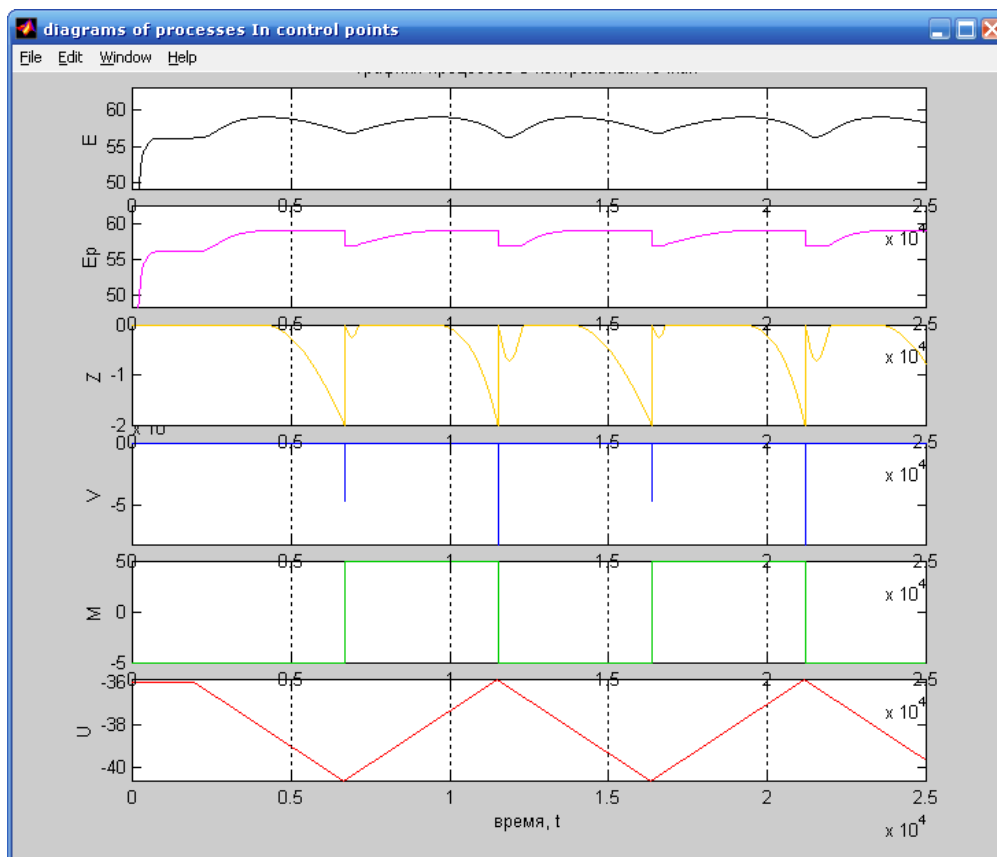


Рис. 4.24. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при зменшенні крутизни параболи.

4.6 Висновки за розділом

У цьому розділі було розроблено та досліджено модернізовану САК процесом заморожування курятини. САК реалізує нову функцію оптимізації температури заморозки в камері з метою збільшити продуктивність фрізеру. Функція реалізована на основі алгоритмів екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Реалізація цієї функції забезпечує підвищення ефективності процесу заморожування курятини в умовах змінних властивостей сировини та параметрів енергоносіїв за рахунок відстеження дрейфуючого значення екстремуму функції ефективності та підтримки поточного значення показника ефективності в околиці екстремального значення.

У роботі проведено низку досліджень розробленої системи з використанням імітаційного моделювання. Результати досліджень показали працездатність системи у різних режимах роботи та її ефективність.

РОЗДІЛ 5

РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ НА ПІДПРИЄМСТВІ «АЛЬФАЙН» (ДАННЕНБЕРГ, НІМЕЧЧИНА)»»

5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом керування шоким заморожуванням курятини і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.

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


Приміщення повинне бути опалювальним, що дозволить використовувати модулі звичайного виконання, а не з розширеним температурним діапазоном, які дорожче.

Враховуючи, що в цей час 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.


Технічна структура системи управління розробимо на базі контролера Simatic S7-300.

Для реалізації алгоритмів управління в модулях ПЗО контролера повинні бути передбачені: аналогові входи (3); аналогові виходи (2); дискретні входи (14); дискретні виходи (9).


Компактний центральний процесор CPU 313C-2DP

 <p>Рис.5.1 – Центральний процесор CPU 313C-2DP 6ES7313-6CG04-0AB0</p>	Інтерфейс	Profibus-DP, MPI
	Дискретні входи	16
	Тип вхідного сигналу	24 VDC
	Дискретні виходи	16
	Тип вихідного сигналу	PNP (загальний -)
	Ступінь захисту	IP 20
	Робоча температура, С	0 — 60

Модуль аналогового виводу SM 332 6ES7332-5HB01-0AB0

 <p>Рис.5.2 – Загальний вигляд</p>	Кількість виходів	4
	Вхідна напруга L	L+ 24V DC
	Вихідні діапазони:	
	- напруги	$\pm 10V$, 1...5V, 0...10V
	- струму	0...20 ма, 4...20 ма, ± 20 mA
	Споживання струму по задній шині	120mA
	Потужність, що розсіюється	3W

Аналоговий модуль вводу SM 331 (6ES7331-7KF02-0AB0)

 <p>Рис.5.3 Загальний вигляд</p>	Номінальне значення (пост. струм)	24 V
	Вхідний струм з джерела напруги навантаження L+ (без навантаження), макс.	200 mA
	Нормальна потужність, що розсіюється	3 W
	Кількість аналогових входів	8
	Макс. допустима вхідна напруга для входу напруги (межа руйнування)	75 V; 35 при тривалому навантаженні; 75 U макс. протягом 1 с (коефіцієнт заповнення 1:20)
	Макс. допустимий вхідний струм для токового входу (межа руйнування)	40 mA
	Похибки/точність Напруга відносно діапазону вхідних параметрів, (+/-) Струм відносно діапазону вхідних параметрів, (+/-)	0,1 % 0,1 %

Загальний вигляд розробленої схеми технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування шоковою заморозкою м'яса наведено на рис. 5.4.

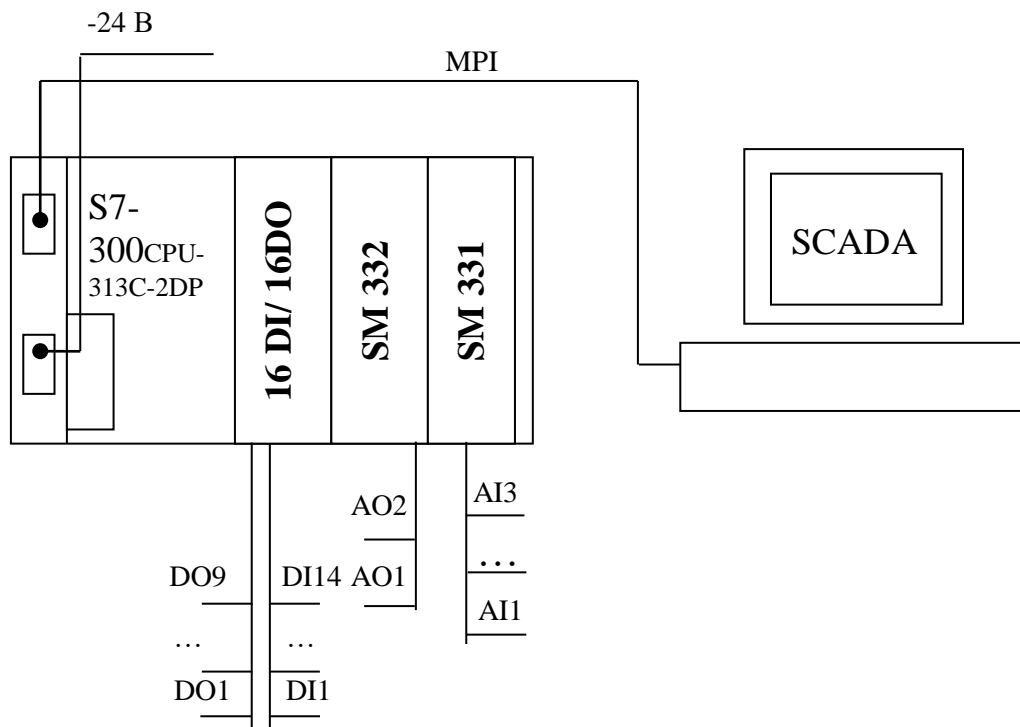


Рис. 5.4 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом шоквої заморозки м'яса.

У середовищі Simatic Manager Step7 створюємо проект і додаємо до його складу станцію контролера S7-300. У програмі «Hardware» виконуємо конфігурування обраного контролера і модулів ПЗО. Загальний вид вікна програми «Hardware» з встановленим контролером і модулями ПЗО представлений на рис. 5.5. При конфігуруванні необхідні модулі вибиралися з каталогу елементів, що входить в програму «Hardware».

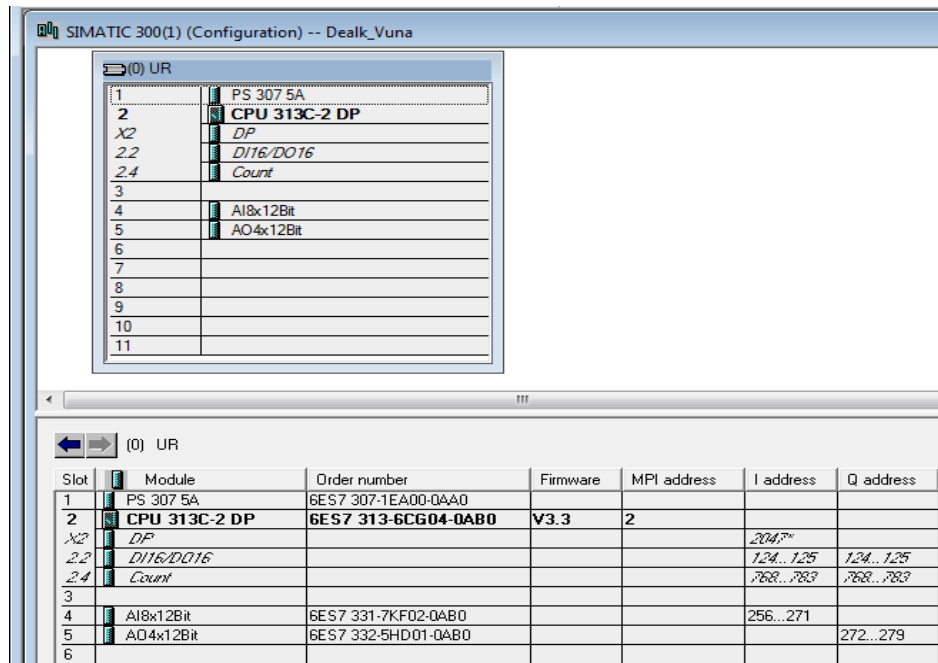


Рис.5.5 – Загальний вид вікна програми «Hardware».

Автоматизоване робоче місце оператора реалізується на базі персонального комп'ютера. Зв'язок комп'ютера з контролером виконується по мережі MPI. Процедура програмної конфігурації мережі представлена на малюнках нижче.

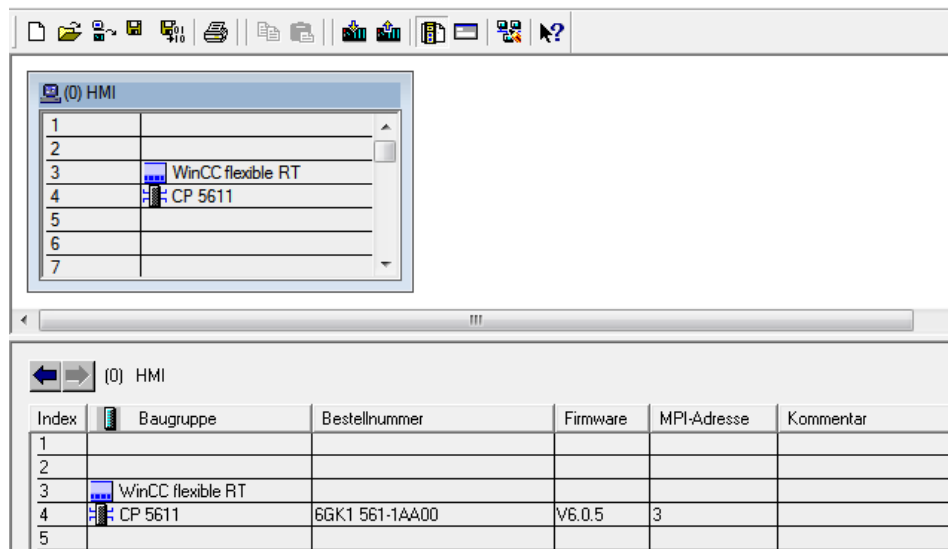


Рис.5.6 – Фрагмент вікна конфігурування PC - станції.

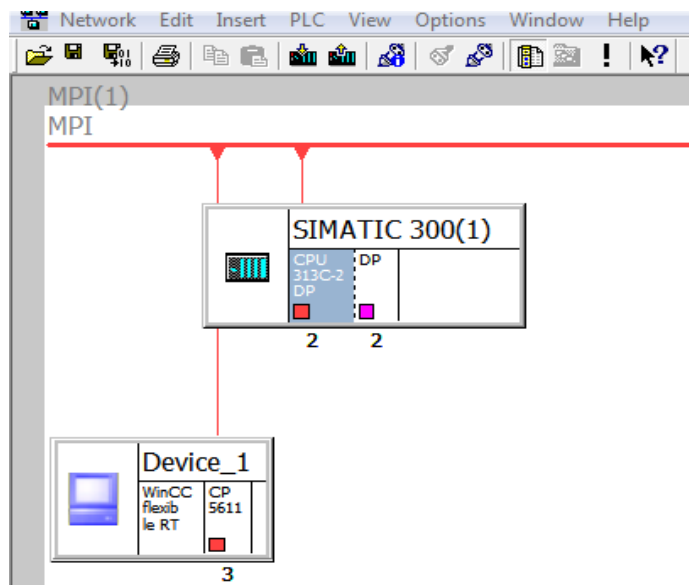


Рис. 5.7. Ілюстрація структури мережі в програмі "Net Pro".

Існуюча система керування яка реалізована на базі наведеної технічної структури доповнена функцією оптимізації режиму заморожування. Інтегрована функція оптимізації не потребує істотного збільшення обчислюваних ресурсів, та реалізації додаткових каналів вводу виводу сигналів існуючих каналів достатньо для додаткового розрахунку продуктивності фризера. Тому технічну структуру системи керування змінювати не потрібно.

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

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені алгоритми керування процесом шокової заморозки м'яса може розроблятися безпосередньо у середовищі Simatic Step 7 з використанням стандартних мов програмування контролерів. Для цього потрібно розроблені у системі Matlab алгоритми керування перевести у цифрову форму та вид придатний для програмування, а потім написати відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загалі такий підхід потребує багато часу. Альтернативою цьому є варіант конвертації отриманих алгоритмів з системи Matlab у потрібну середу програмування контролерів. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.

Для програмної реалізації розроблених алгоритмів керування процесом шокової заморозки м'яса 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. Розглянемо конвертацію алгоритмів регулювання з ПІД регуляторами та нейронними мережами. Отримана модель з алгоритмами підготовленими до конвертації наведена на рис. 5.7.

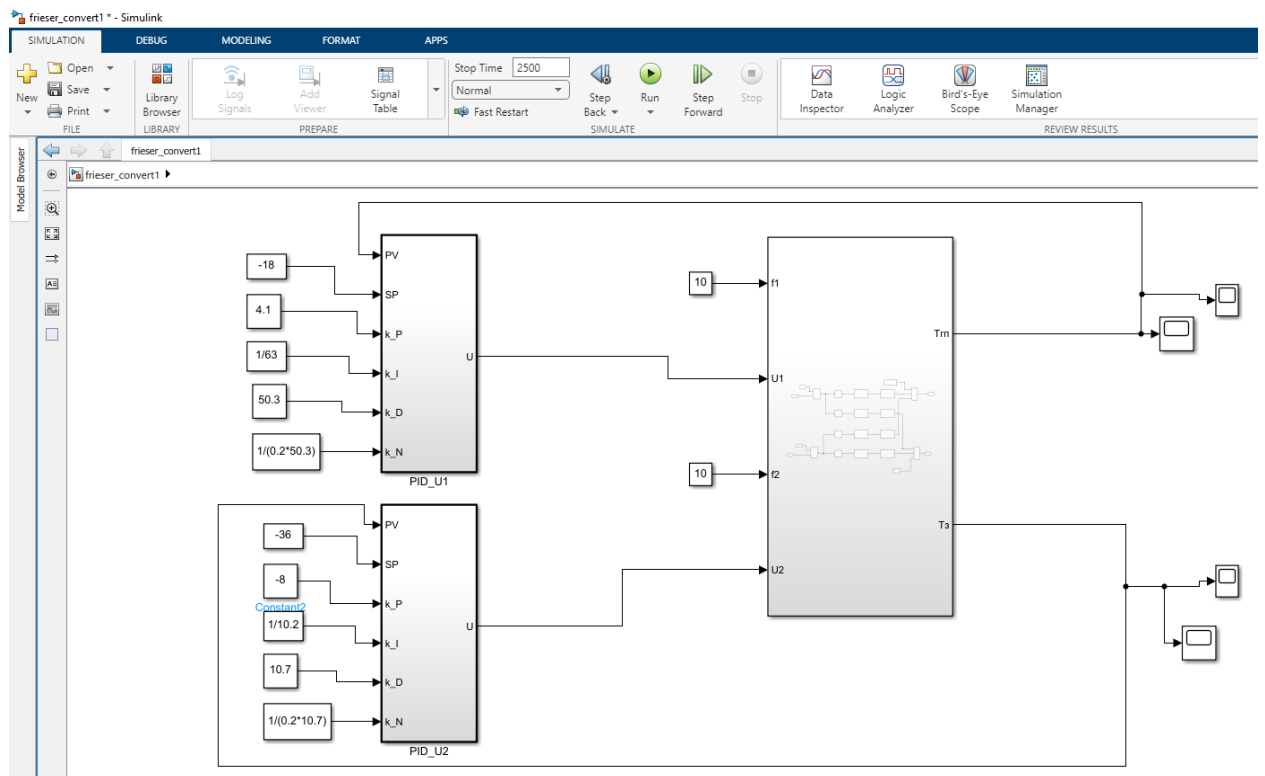


Рис. 5.7. Схема моделювання САК процесом шокової заморозки м'яса курки з цифровими алгоритмами керування, які підготовлені до конвертації.

На рис. 5.8 наведена схема моделювання цифрового ПІД регулятора, отриманого методом структурних перетворень та заміни типових лінійних ланок безперервної дії відповідними цифровими ланками.

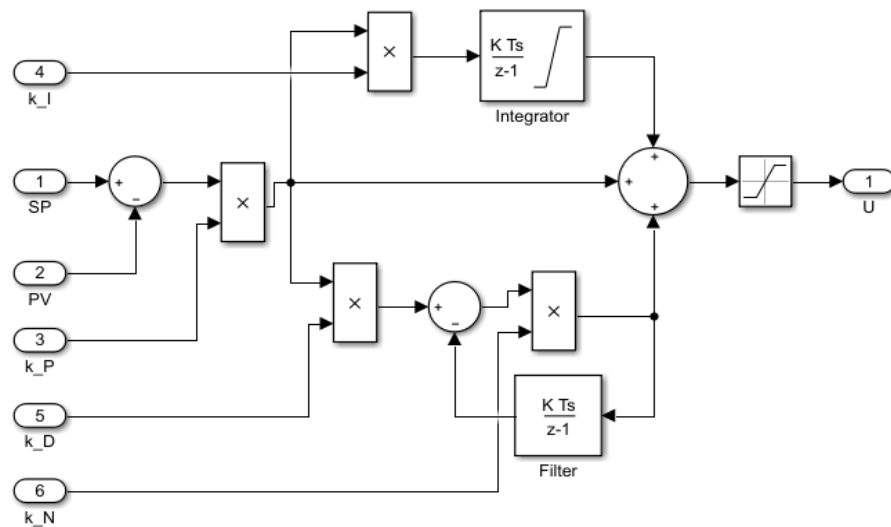


Рис. 5.8. Схема цифрового ПІД-регулятора.

Отримання z-передатних функцій можна проводити без структурних перетворень ланок системи, а за допомогою вбудованих функцій z-перетворень у системі Matlab. Приклад отримання z-передатної функції наведено на рис. 5.9.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
>> csys=tf([2.1 1],[7.6 1])

csys =

    2.1 s + 1
    -----
    7.6 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> dsys=c2d(csys,0.1,'foh')

dsys =

    0.2811 z - 0.268
    -----
           z - 0.9869

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> csys=tf([1.4 0],[0.2*1.4 1])

csys =

    1.4 s
    -----
    0.28 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> dsys=c2d(csys,0.1,'foh')

dsys =

    4.205 z - 4.205
    -----
           z - 0.6997

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

fx >> |

```

Рис. 5.9. Приклад отримання z-передатної функції з її неперервного аналогу.

На рис. 5.10 наведена схема моделювання об'єкта керування.

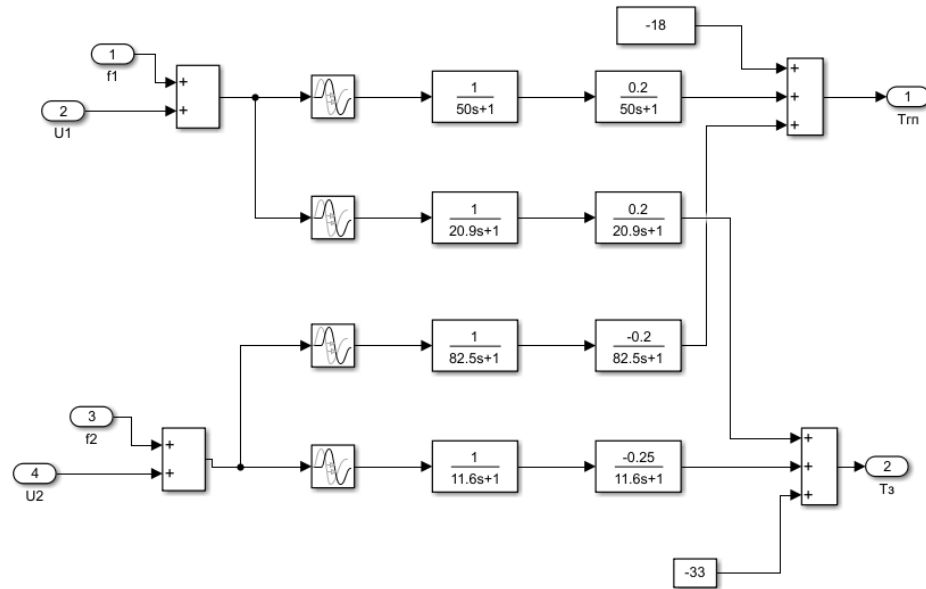


Рис. 5.10. Схема моделювання об'єкта керування.

Результати моделювання системи керування при використанні цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис.5.11 - 5.13.

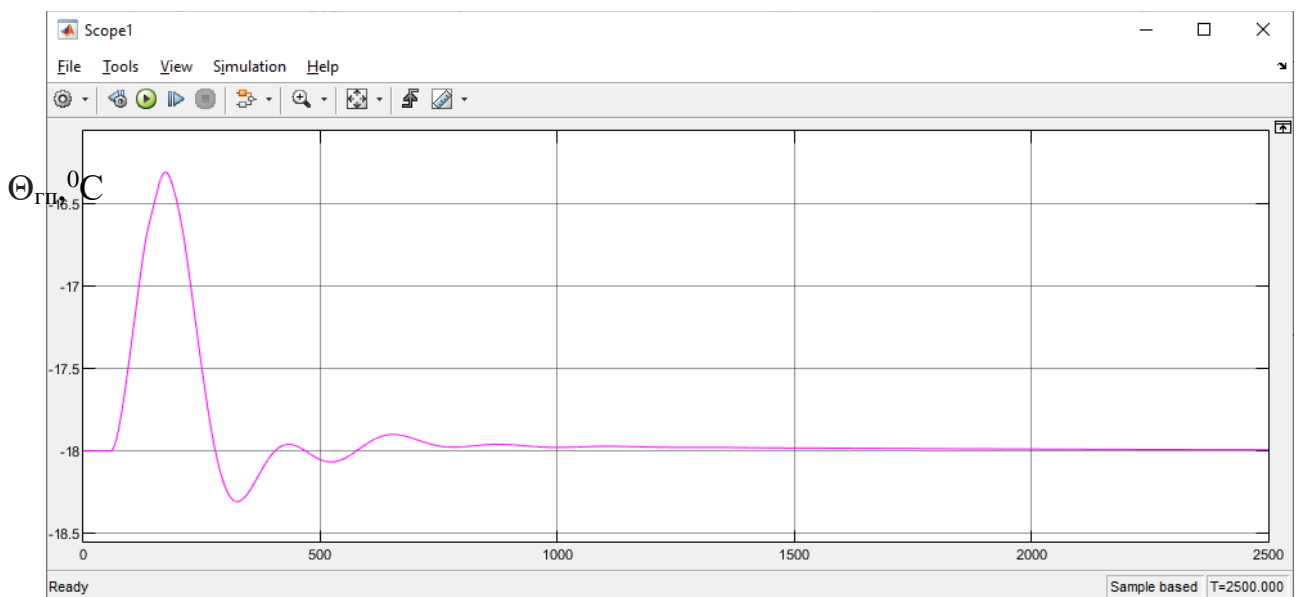


Рис. 5.11. Результати моделювання системи регулювання за каналом регулювання температури готового продукту.

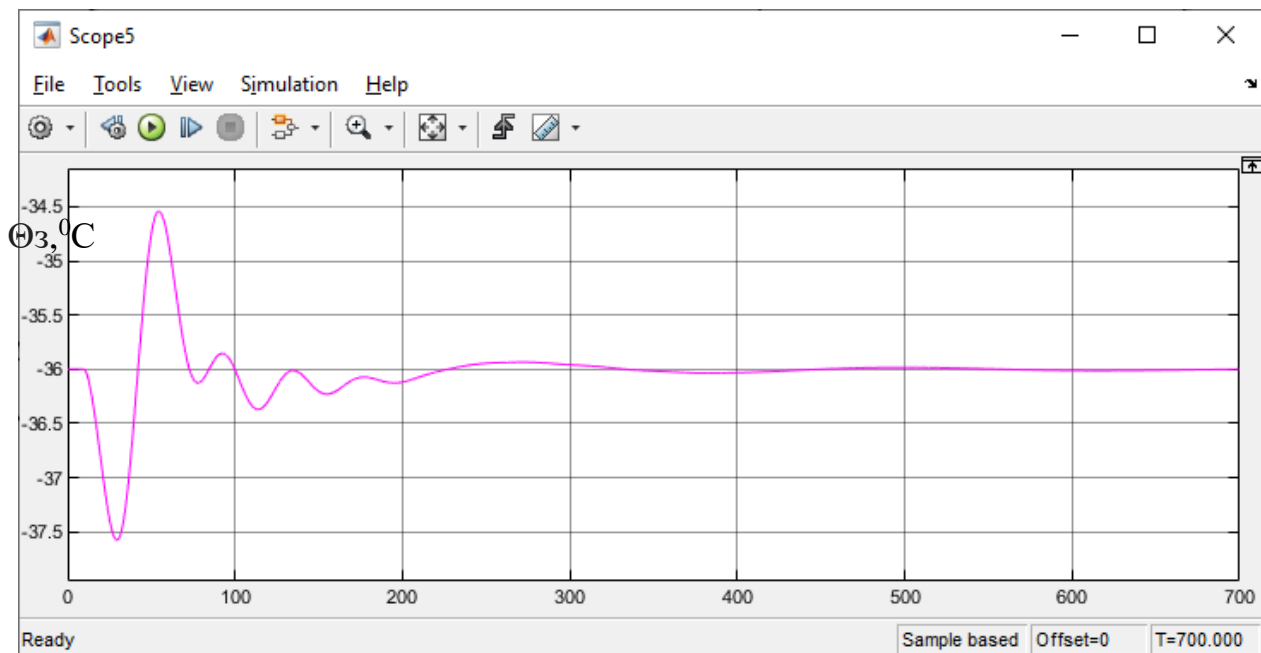


Рис. 5.13. Результати моделювання системи за каналом регулювання температури в камері заморозки.

Для кожної підсистеми яка буде конвертуватися у мову SCL середовища Step 7 проведемо налаштування рис 5.14.

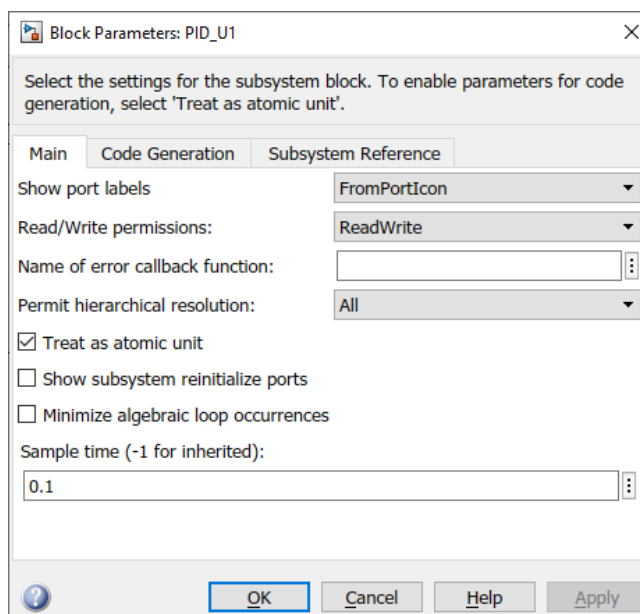


Рис. 5.14. Вікно налаштування підсистем для їх конвертації в код контроллера.

Пакет Simulink PLC Coder налаштуємо для компіляції коду для середовища Siemens SIMATIC Step7 5.4 (рис. 5.15).

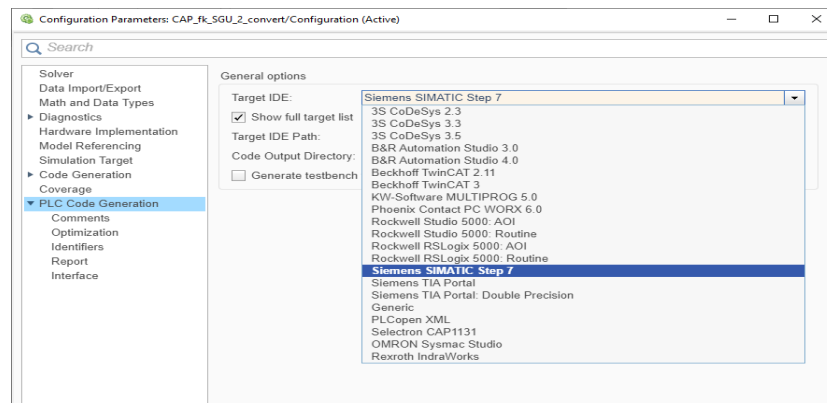


Рис. 5.15. Вікно налаштування пакету SimulinkPLCCoder.

Далі проведемо генерацію програмного коду для блоку ПІД регулятора. На рис. 5.16 та 5.17 проведена процедура генерації коду для ПІД регулятора.

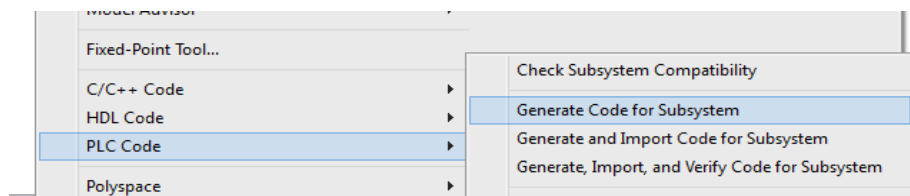


Рис 5.16 – Компіляція коду.

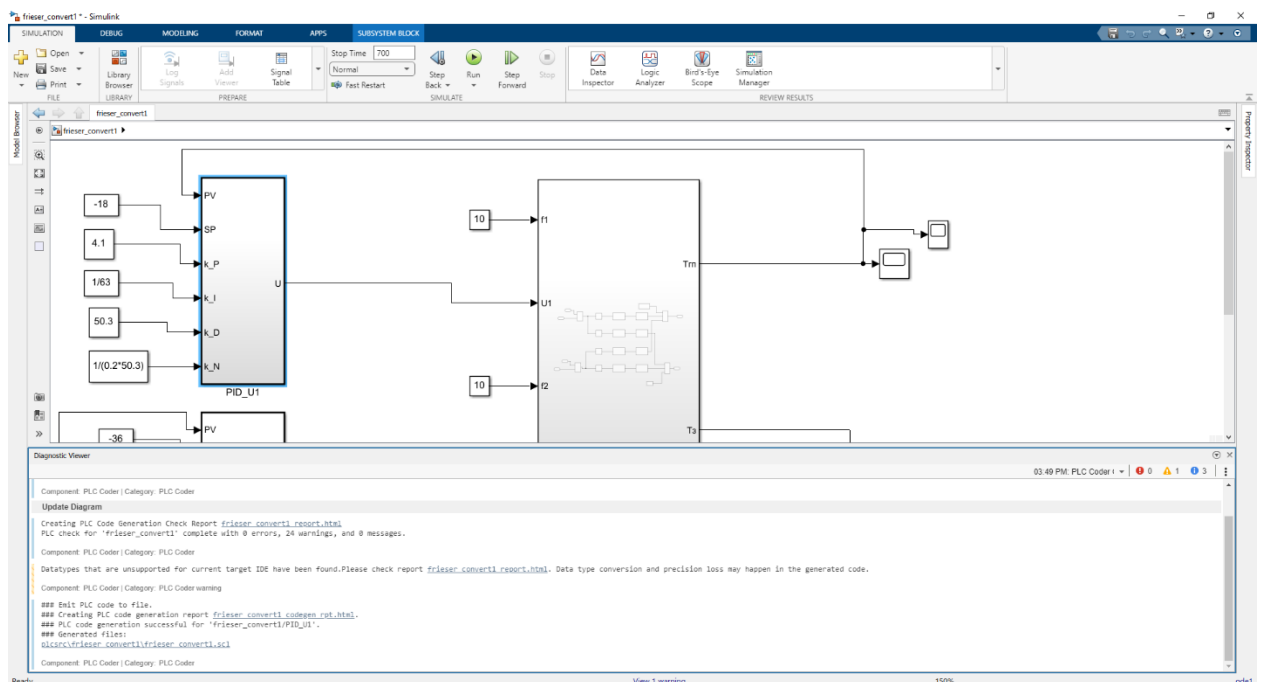
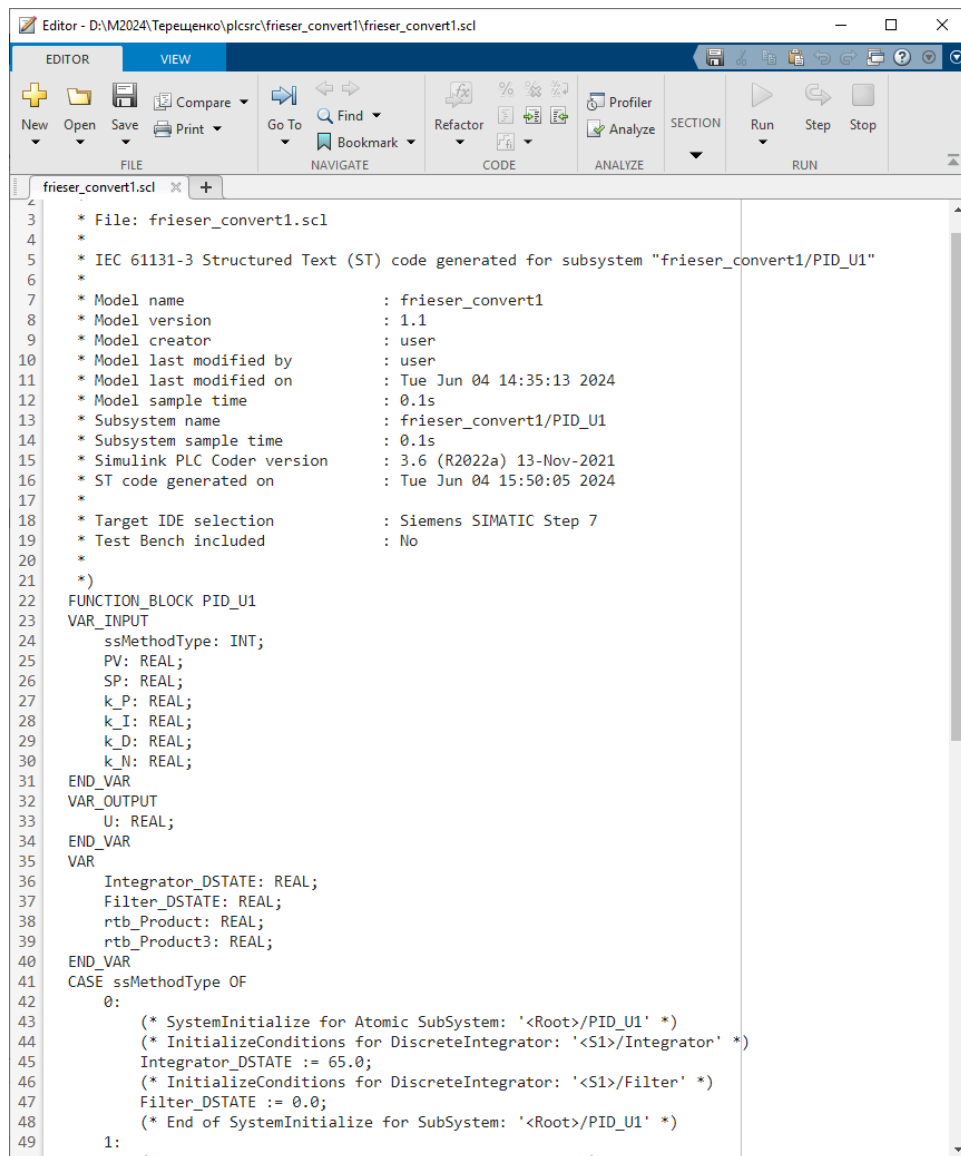


Рис. 5.17 – Результати успішної генерації коду ПІД-регулятора для середовища SIMATIC Step7 5.4.

На рис. 5.18 наведено вихідний генерований код мовою SCL для блоку ПІД регулятора.



```
Editor - D:\M2024\Терещенко\plcsrc\frieser_convert1\frieser_convert1.scl
EDITOR VIEW
New Open Save Print Compare Go To Find Refactor Profiler Analyze SECTION Run Step Stop
FILE NAVIGATE CODE ANALYZE RUN
frieser_convert1.scl
3 * File: frieser_convert1.scl
4 *
5 * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "frieser_convert1/PID_U1"
6 *
7 * Model name : frieser_convert1
8 * Model version : 1.1
9 * Model creator : user
10 * Model last modified by : user
11 * Model last modified on : Tue Jun 04 14:35:13 2024
12 * Model sample time : 0.1s
13 * Subsystem name : frieser_convert1/PID_U1
14 * Subsystem sample time : 0.1s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on : Tue Jun 04 15:50:05 2024
17 *
18 * Target IDE selection : Siemens SIMATIC Step 7
19 * Test Bench included : No
20 *
21 *)
22 FUNCTION_BLOCK PID_U1
23 VAR_INPUT
24 ssMethodType: INT;
25 PV: REAL;
26 SP: REAL;
27 k_P: REAL;
28 k_I: REAL;
29 k_D: REAL;
30 k_N: REAL;
31 END_VAR
32 VAR_OUTPUT
33 U: REAL;
34 END_VAR
35 VAR
36 Integrator_DSTATE: REAL;
37 Filter_DSTATE: REAL;
38 rtb_Product: REAL;
39 rtb_Product3: REAL;
40 END_VAR
41 CASE ssMethodType OF
42 0:
43 (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/PID_U1' *)
44 (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
45 Integrator_DSTATE := 65.0;
46 (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
47 Filter_DSTATE := 0.0;
48 (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/PID_U1' *)
49 1:
50 (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/PID_U1' *)
```

Рис. 5.18. Приклад генерованого коду ПІД – регулятора для середовища програмування Step7.

Програмну реалізацію алгоритмів керування на базі нейронних мереж проводимо аналогічним чином. На рис. 5.19 наведена схема моделювання нейронної САР зі штучно нейронною мережею.

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для середовища SIMATIC Step7 5.4 На рис. 5.21 наведено вихідний генерований код мовою SCL для блоку нейронної мережі. Повний список вихідних кодів конвертованих блоків наведено у додатку А.

```

EDITOR          VIEW
+  New  Open  Save  Print  Compare
NAVIGATE  CODE  ANALYZE  SECTION  Run  Step  Stop
FILE  RUN
frieser_convert1.scl  Neuronet_2023.scl  +
22  FUNCTION_BLOCK Neural10
23  VAR_INPUT
24  p1: REAL;
25  END_VAR
26  VAR_OUTPUT
27  y1: REAL;
28  END_VAR
29  VAR
30  temp1: REAL;
31  temp2: REAL;
32  END_VAR
33  (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Neural Network' *)
34  (* Output: '<Root>/y{1}' incorporates:
35  * Constant: '<S12>/IW{2,1}(1,:)''
36  * Constant: '<S13>/one'
37  * Constant: '<S13>/one1'
38  * Constant: '<S2>/b{1}'
39  * Constant: '<S3>/b{2}'
40  * Constant: '<S5>/IW{1,1}(1,:)''
41  * Constant: '<S5>/IW{1,1}(2,:)''
42  * Constant: '<S6>/one'
43  * Constant: '<S6>/one1'
44  * Gain: '<S13>/Gain'
45  * Gain: '<S13>/Gain1'
46  * Gain: '<S6>/Gain'
47  * Gain: '<S6>/Gain1'
48  * Math: '<S13>/Math Function'
49  * Math: '<S13>/Math Function1'
50  * Math: '<S6>/Math Function'
51  * Math: '<S6>/Math Function1'
52  * Product: '<S10>/Product'
53  * Product: '<S15>/Product'
54  * Product: '<S9>/Product'
55  * Sum: '<S13>/Sum'
56  * Sum: '<S13>/Sum1'
57  * Sum: '<S15>/Sum'
58  * Sum: '<S2>/netsum'
59  * Sum: '<S3>/netsum'
60  * Sum: '<S6>/Sum'
61  * Sum: '<S6>/Sum1'
62  *
63  * About '<S13>/Math Function':
64  * Operator: exp
65  *
66  * About '<S13>/Math Function1':
67  * Operator: reciprocal
68  *

```

Рис. 5.21. Вихідний генерований код мовою SCL блоку нейронної мережі для середовища програмування Step7.

Після генерації коду в середовищі MATLAB додаємо новий код у розроблений проект у середовищі Step 7. Процес інтеграції програмних модулів у проект Step 7 наведено на рис. 5.22, а на рис 5.23 приклад імпортованого генерованого коду.

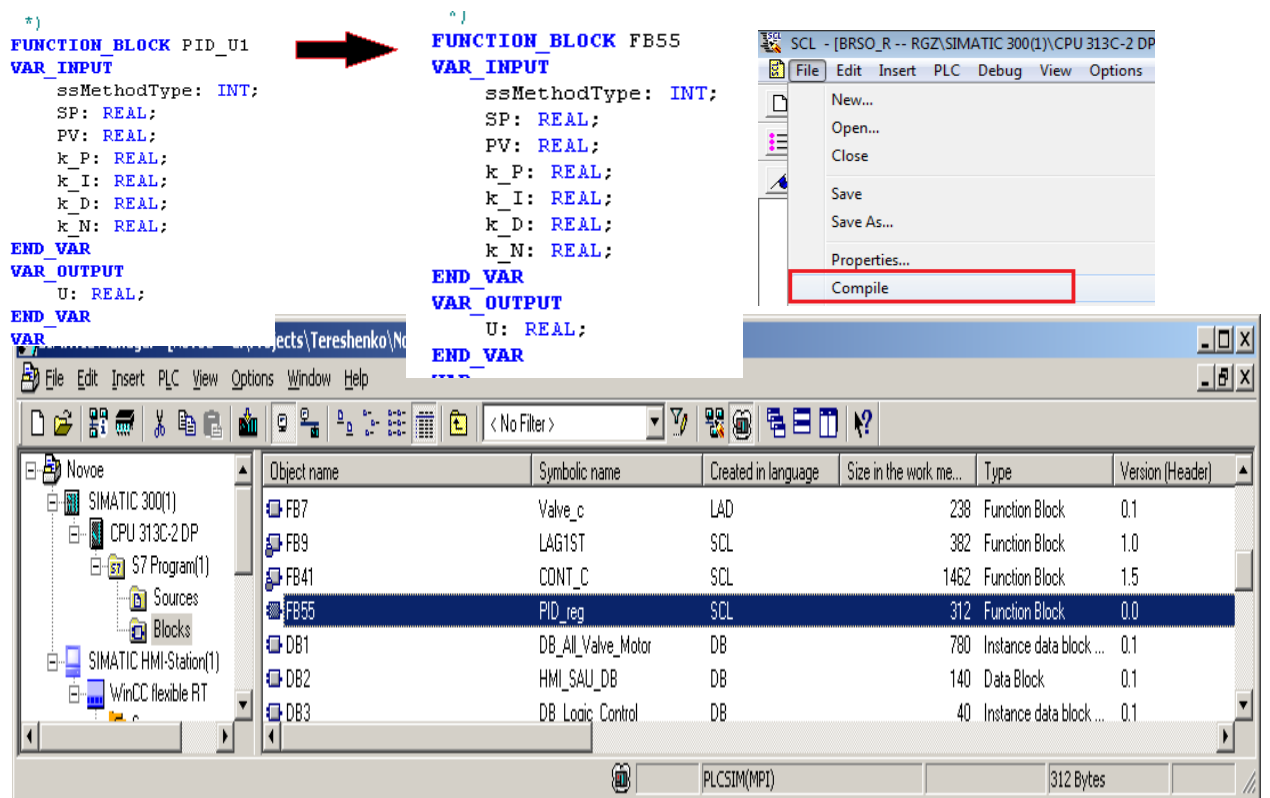
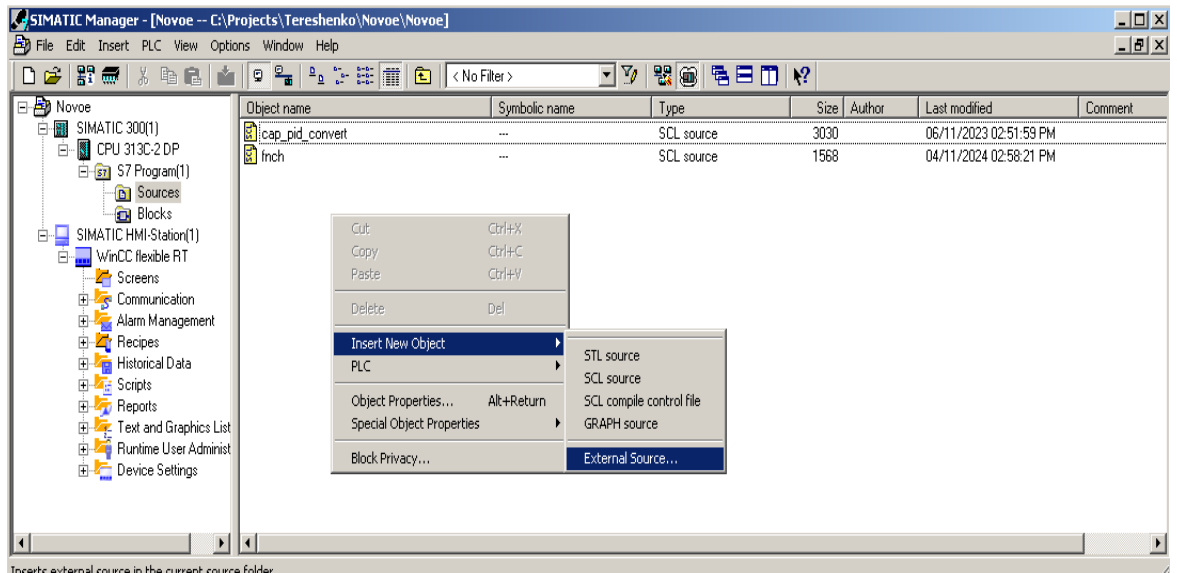


Рис. 5.22. Процедура імпорту генерованого коду в середовище програмування Step 7 і створення відповідного функціонального блоку.

```

File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help
FUNCTION_BLOCK FB55
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    SP: REAL;
    PV: REAL;
    k_P: REAL;
    k_I: REAL;
    k_D: REAL;
    k_N: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    U: REAL;
END_VAR
VAR
    Integrator_DSTATE: REAL;
    Filter_DSTATE: REAL;
    rtb_Product: REAL;
    rtb_Product3: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:
        (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/PID_U1' *)
        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        Integrator_DSTATE := 60.0;
        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
        Filter_DSTATE := 0.0;
        (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/PID_U1' *)
    1:
        (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/PID_U1' *)
        (* Product: '<S1>/Product' incorporates:
        * Sum: '<S1>/Add2' *)
        rtb_Product := (SP - PV) * k_P;
        (* Product: '<S1>/Product3' incorporates:
        * DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter'
        * Product: '<S1>/Product1'
        * Sum: '<S1>/Add1' *)
        rtb_Product3 := ((rtb_Product * k_D) - Filter_DSTATE) * k_N;
        (* Sum: '<S1>/Add' incorporates:
        * DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        U := (Integrator_DSTATE + rtb_Product) + rtb_Product3;
        (* Saturate: '<S1>/Saturation' *)
        IF U > 100.0 THEN
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := 100.0;
        ELSIF U < 0.0 THEN
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := 0.0;
        END_IF;
        (* End of Saturate: '<S1>/Saturation' *)

        (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' incorporates:
        * Product: '<S1>/Product2' *)
        Integrator_DSTATE := ((rtb_Product * k_I) * 0.1) + Integrator_DSTATE;
        IF Integrator_DSTATE >= 100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := 100.0;
        ELSIF Integrator_DSTATE <= 0.0 THEN
            Integrator_DSTATE := 0.0;
        END_IF;

        rtb_Add2 := SP - PV;
        (* Product: '<S1>/Product' incorporates:
        * Inport: '<Root>/k_P' *)
        rtb_Product := rtb_Add2 * k_P;
        (* Product: '<S1>/Product3' incorporates:
        * DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter'
        * Inport: '<Root>/k_D'
        * Inport: '<Root>/k_N'
        * Product: '<S1>/Product1'
        * Sum: '<S1>/Add1' *)
        rtb_Product3 := ((rtb_Product * k_D) - Filter_DSTATE) * k_N;
        (* Sum: '<S1>/Add' incorporates:
        * DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        rtb_Add := (Integrator_DSTATE + rtb_Product) + rtb_Product3;
        (* Saturate: '<S1>/Saturation' *)
        IF rtb_Add >= 100.0 THEN
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := 100.0;
        ELSIF rtb_Add > -100.0 THEN
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := rtb_Add;
        ELSE
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := -100.0;
        END_IF;
        (* End of Saturate: '<S1>/Saturation' *)
        (* Output: '<Root>/dPV' *)
        dPV := rtb_Add2;
        (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' incorporates:
        * Update for Inport: '<Root>/k_I'
        * Product: '<S1>/Product2' *)
        Integrator_DSTATE := ((rtb_Product * k_I) * 0.1) + Integrator_DSTATE;
        IF Integrator_DSTATE >= 100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := 100.0;
        ELSIF Integrator_DSTATE <= -100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := -100.0;
        END_IF;
        (* End of Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)

        (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
        Filter_DSTATE := (0.1 * rtb_Product3) + Filter_DSTATE;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Рис. 5.23. Приклад імпортованого коду ПІД-регулятора в середовище програмування Step 7.

Загальний вигляд розробленого проекту в середовищі Step 7 наведено на рис. 5.24.

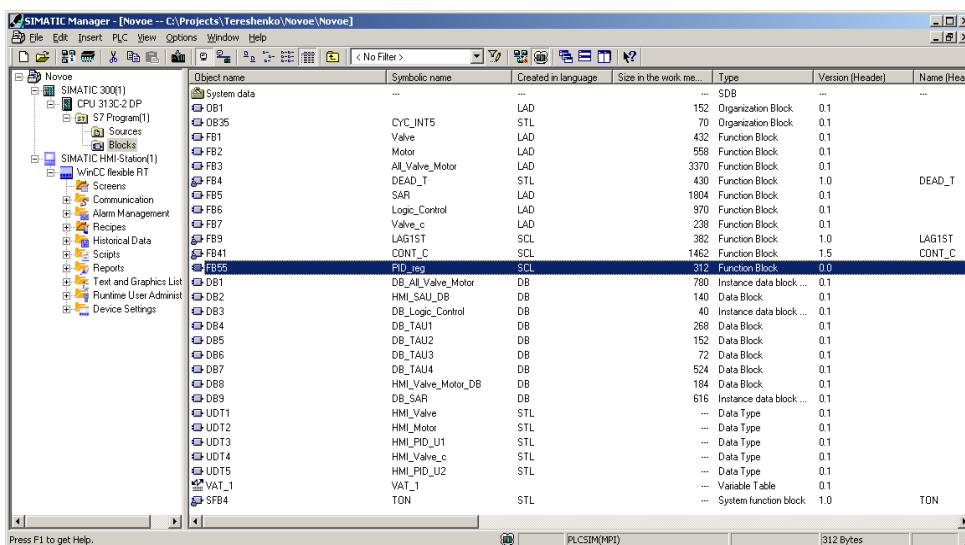


Рис. 5.24. Загальний вид вікна проекту в середовищі Step 7.

Алгоритми регулювання температур та модель штучної нейронної мережі реалізовані у функціональному блоці FB5. Фрагмент коду програми наведено на рис. 5.25.

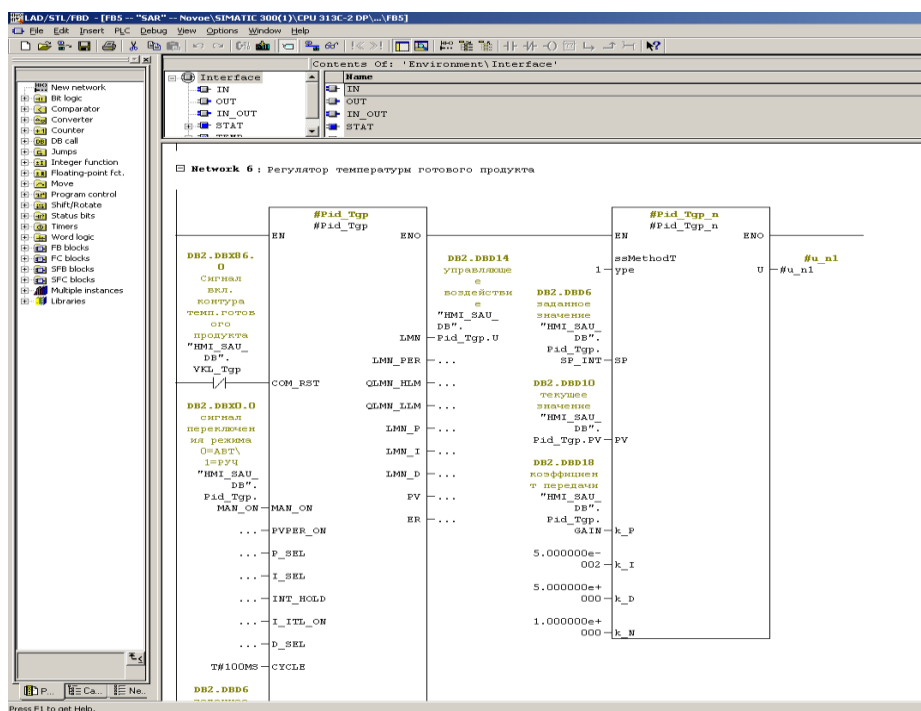


Рис. 5.25. Фрагмент програми в функціональному блоці FB5 яка реалізує розрахунок регуляторів.

Проведемо тестування програми ПІД-регулятора. Для цього доповнимо програму моделлю об'єкта керування і запусимо розрахунок моделі САР за каналом регулювання температури продукту. Фрагмент програми яка реалізує розрахунок моделі ОК і регулятору температури продукту у режимі тестування наведено на рис. 5.26 і 5.27. А результати тестування у вигляді перехідної характеристики САР температури продукту наведені у вікні SCADA системи WinCCflexible на рис. 5.28.

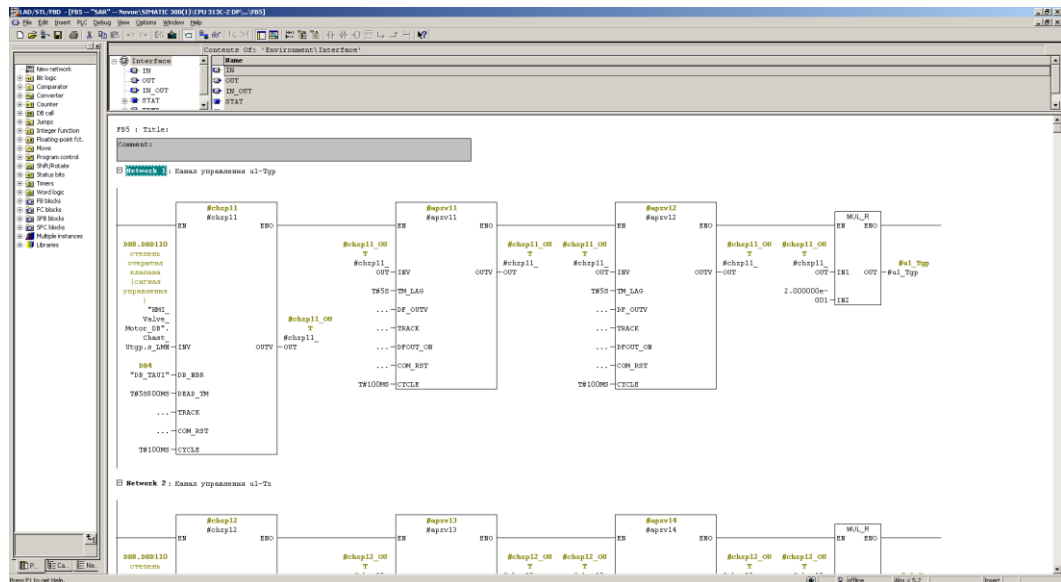


Рис. 5.26. Фрагмент програми яка реалізує розрахунок моделі ОК.

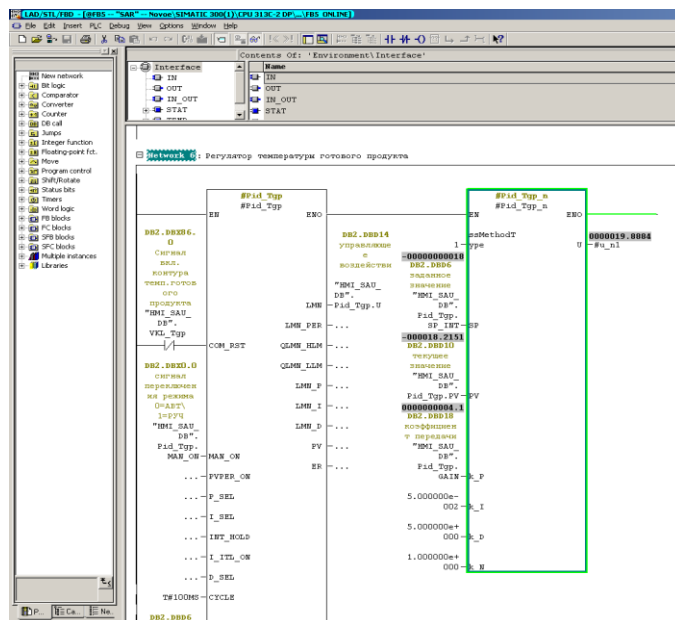


Рис. 5.27. Фрагмент програми конвертованого регулятору температури продукту у режимі тестування.

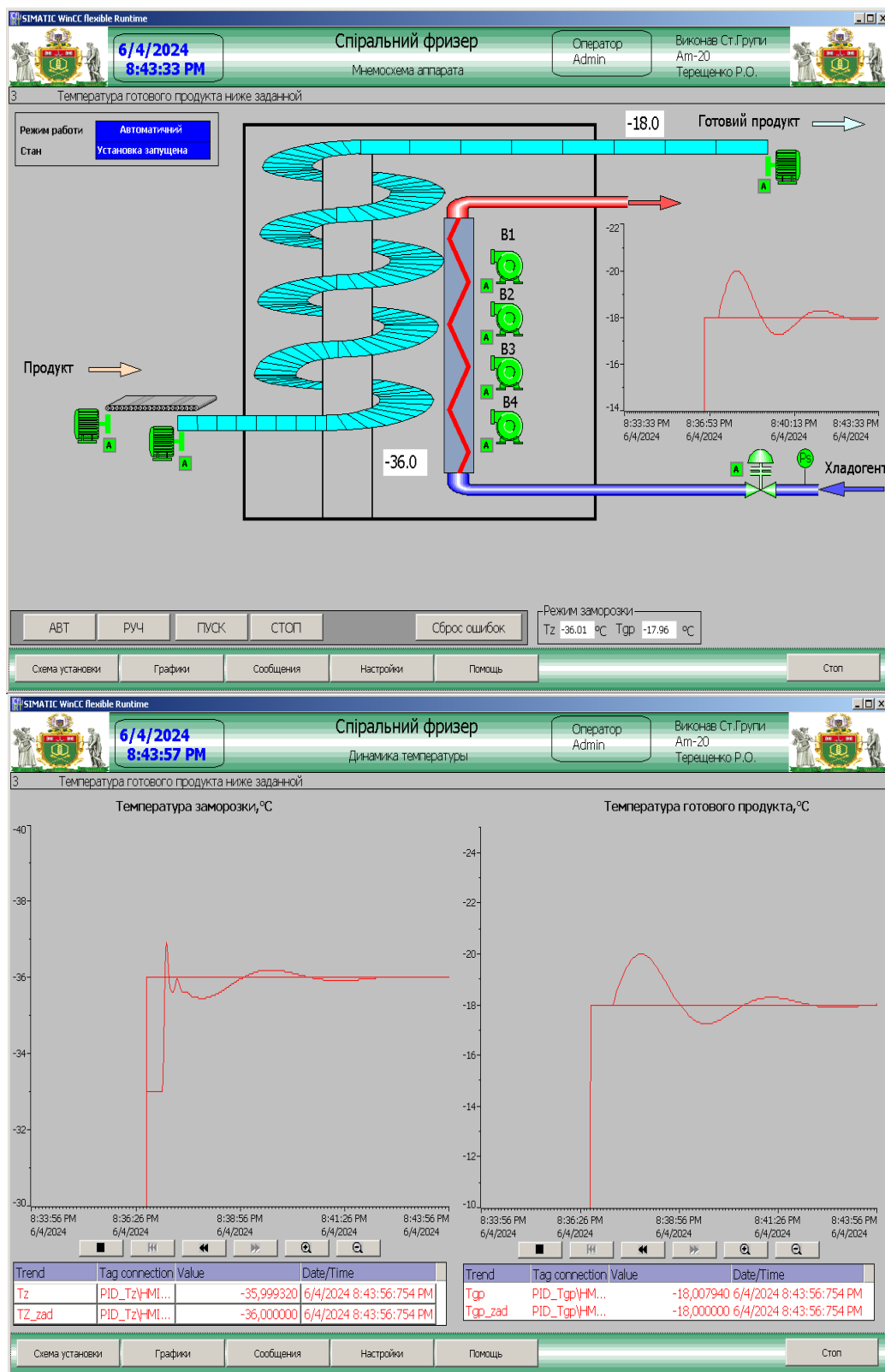


Рис. 5.28. Результати тестування моделі САК температури в морозильній камері та температури продукту.

Результати тестування САК процесом шоквої заморозки м'яса підтвердили працездатність отриманих в результаті конвертації програмних модулів і ефективність застосування пакету Simulink PLC Coder.

5.3. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

Застосування в системі керування процесом шокової заморозки м'яса алгоритмів оптимізації температурного режиму заморозки (температури в морозильній камері) дозволить підтримувати максимальну продуктивність фрізеру у поточних технологічних умовах не порушуючи регламенту. Це дозволить підвищити продуктивність всієї лінії заморозки на 5-8% при сталих або знижених значень питомих витрат енергії холоду.

5.4 Висновки за розділом

1. В цьому розділі розглянута програмно-технічна структура системи керування процесом шокової заморозки м'яса з використанням теплового насосу. Обґрунтовано обрані контролер, ПЗО та програмне забезпечення фірми Siemens для реалізації системи.

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

3. Розширення функцій системи керування не потребує зміни технічної структури системи і дозволяє залишити базовий контролер без змін. Тому модернізація САК процесом шокової заморозки м'яса на базі Siemens окуповується досить швидко.

ВИСНОВКИ

Детально проаналізувавши вибраний об'єкт регулювання, можна зробити висновок,

САК реалізує нову функцію оптимізації температури заморозки в камері з метою збільшити продуктивність фризера. Функція реалізована на основі алгоритмів екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Реалізація цієї функції забезпечує підвищення ефективності процесу заморожування курятини в умовах змінних властивостей сировини та параметрів енергоносіїв за рахунок відстеження дрейфуючого значення екстремуму функції ефективності та підтримки поточного значення показника ефективності в околиці екстремального значення.

У роботі проведено низку досліджень розробленої системи з використанням імітаційного моделювання. Результати досліджень показали працездатність системи у різних режимах роботи та її ефективність. В процесі виконання роботи були синтезовані моделі САУ з нечіткими регуляторами та з нейрорегулятором що визначена як нейромережева система управління. Також була розроблена модель САУ з комбінованим регулятором що є синтезом традиційного ПД-регулятора та штучної нейронної мережі. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Були визначені функції приналежності до нечітких множин, сформована база правил функціонування регуляторів у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначений алгоритм нечіткого виводу – Сугено 0-порядку.

Для подальшої параметричної оптимізації САУ, за характеристиками нечітких регуляторів було виконано тренування визначених штучних нейронних мереж, які можуть виконувати роль нейрорегуляторів. Тренування штучних нейронних мереж було виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink за відповідними виконавчими кодами.

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора температури

заморозки в камері θ_3 , була сформована програма для промислового контролера. Розроблені в системі Matlab моделі нових алгоритмів керування процесом шокової заморозки м'яса за допомогою пакету Simulink PLC Coder були конвертовані для інтеграції у середовище програмування контролерів фірми Siemens Simatic Step 7. Проведене тестування конвертованого програмного забезпечення на моделі САК підтвердило його працездатність та ефективність застосування конвертору пакета Simulink PLC Coder. Розширення функцій системи керування не потребує зміни технічної структури системи і дозволяє залишити базовий контролер без змін. Тому модернізація САК процесом шокової заморозки м'яса на базі Siemens окуповується досить швидко.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» – Одеса: ДАПТ, 2000. – 16 с.
2. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з Ідентифікації та моделювання технологічних об'єктів – Одеса 1999. – 78 с.
3. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Теорія автоматичного управління» – Одеса: ОНАПТ, 2000. – 16с.
4. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 1. – Одеса 2013. – 110 с.
5. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 2. – Одеса 2012. – 59 с.
6. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту [Текст] / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
6. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
7. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
8. Усков А.А. Інтелектуальні технології управління (для фахівців у галузі теорії управління, аспірантів та студентів старших курсів технічних університетів) [Текст] / О.О. Усков, А.В. Кузьмін. - М.: Гаряча лінія. Телеком, 2004. - 144 с.
9. Круглов В.В. Нечітка логіка та штучні нейронні мережі [Текст] / Круглов В.В., Длі М.І., Голунов Р.Ю. - М.: Фізматліт, 2001. - 302 с.
10. Архангельській В.І. і др. Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] – К. : техніка, 1999. – 364с.
11. Василець Т. Ю. и др. Синтез нейромережевого регулятора для електромеханічної системи з пружними зв'язками в кінематичних передачах

- 12.Сергій А. Терехов Лабораторія Штучних Нейронних Мереж НТО- 2, ВНДІТФ, Сніжинськ / [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://b-ok.org/book/530233/94a2fe>, <https://www.twirpx.com/file/600450/>, <https://studfiles.net/preview/986654/>
- 13.User's Manual .WinCC flexible 2008 Compact / Standard / Advanced.
- 14.«MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Інструменти штучного інтелекту та біоінформатики». - Дияконів В.П., Круглов В.В М.: СОЛОН-ПРЕС, 2006. - 456 с.
- 15.Каталог ІК РІ «Промисловий зв'язок для систем автоматизації та приводів». – Siemens AG, 2005. – 666с.
- 16.«Автоматизація за допомогою програм Step 7 LAD и FBD». – Ганс Бергер, 2001. – 605с.
- 17.«Економіка підприємства: Підручник» / За заг. редакторка С.Ф. Покропивного-Вид. 2-ге, перероб. але доп. – К.: Київ, 2000. – 528 с.
18. Хобин В.А. – Конспект курса лекций по Идентификации и моделированию технологических объектов - Одесса 1999. – 78 с.
19. Хобин В.А. – Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления» – Одесса: ОГАПТ, 2000. – 16 с.
20. Топчеев Ю.И., Атлас для проектирования систем автоматического регулирования, М.: Машиностроение, 1989. – 752 с
- 21.Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования [Текст]/ М.: Издательство «Наука», 1972. – 768 с., стр. 397.
22. Хобин В.А. Конспект курса лекций з дисципліни «Ідентифікація і моделювання технологічних об'єктів» для студентів спеціальностей 7.092501 денної і заочної форми навчання. - Одесса: ОНАХТ, 2002 г.
23. Хобин В.А. Конспект курса лекций з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів спеціальностей 7.092501 денної і заочної форми навчання, 1 часть - Одесса: ОНАХТ, 2006 г.

24. Хобин В.А. Конспект курса лекций з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів спеціальностей 7.092501 денної і заочної форми навчання, 2часть - Одеса: ОНАХТ, 2007 г.
25. Копелович А.П. Инженерные методы расчёта при выборе автоматических регуляторов [Текст]/М.:Гос.научно-техническое изд-во литературы по чёрной и цветной металлургии, 1960 – 190 с.
26. Хобин В.А. – Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Идентификация и моделирование технологических объектов» – Одеса: ГАПТ, 2000. – 16 с.
27. Хобин В.А. – Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления» – Одеса: ОГАПТ, 2000. – 16 с.
28. 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.
29. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В, Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
30. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
31. 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.
32. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети [Текст] / Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. – М. : Физматлит, 2001. – 302 с.
33. Архангельській В.І. і др. Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] – К. : техніка, 1999. – 364с.
34. Василюк 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.

35. Сергей А. Терехов Лаборатория Искусственных Нейронных Сетей НТО-2, ВНИИТФ, Снежинск / [Электрон. ресурс]. – Режим доступа:
36. <https://b-ok.org/book/530233/94a2fe>, <https://www.twirpx.com/file/600450/>,
<https://studfiles.net/preview/986654/>
37. Штучні нейронні мережі [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Штучна_нейронна_мережа
38. Генетичний алгоритм [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Генетичний_алгоритм
39. Нечітка логіка [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Нечітка_логіка
40. Фазифікація [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/Фазифікація>
41. Дефазифікація [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/Дефазифікація>
42. Система нечіткого виведення [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Система_нечіткого_виведення