

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

## ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	Навчально-науковий інститут Комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П.М. Платонова
Факультет	Автоматизація та робототехніка
Кафедра	Автоматизація технологічних процесів і робототехнічних систем
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо- наукова програма	Комп'ютерні системи та програмна інженерія в автоматизації

### КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

**Тема: «Підвищення ефективності автоматичного керування  
конденсаційною сушкою плодоовочевої сировини в потоці»**

Розробив Д.В. Чаплигін

Керівник  
к.т.н., доцент О.В. Мазур

Зав. кафедри АТПіРС  
д.т.н., професор В.А. Хобін

*«e-версія роботи ідентична  
оригіналу»* Д.В. Чаплигін

*«e-версію роботи прийнято»*

Депозитор кафедри АТПіРС Т.В. Волик

## ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	Навчально-науковий інститут Комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П.М. Платонова
Факультет	Автоматизація та робототехніка
Кафедра	Автоматизація технологічних процесів і робототехнічних систем
Ступінь вищої освіти	Магістр
Спеціальність	151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітня програма	Комп'ютерні системи та програмна інженерія в автоматизації програма

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТП і РС  
\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Хобін В.А.  
«24» листопада 2021 року

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

1. Здобувач освіти **Чаплигін Денис Вячеславович**
  2. Тема роботи **«Підвищення ефективності автоматичного керування конденсаційною сушкою плодоовочевої сировини в потоці»**
  3. Керівник кваліфікаційної роботи магістра **Мазур Олександр Васильович, к.т.н., доцент**  
П.п. 2 і 3 затверджено наказом ОНТУ від 11 листопада 2021 року № 945-03.
  4. Строк подання студентом зброшурованої випускної роботи – 05 червня 2023 р.
  5. 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.
  6. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):
    - Вступ (актуальність роботи, зв'язок з науковими напрямками робіт академії, 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 сушкою плодоовочевої сировини в потоці та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.
    - Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП сушкою плодоовочевої сировини в потоці.
    - 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 кафедрі АТПіРС ОНТУ.
- Додатки (допоміжні матеріали, ксерокопії програм конференцій, статей, патентів).

## 7. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

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	01.09.22р.	01.09.22р.
Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	Хобін В.А. д.т.н., проф. зав.каф. АТПіРС	01.09.22р.	01.09.22р.

8. Дата видачі завдання 1 вересня 2022 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ та загальна характеристика роботи	01.02.23 – 15.02.23	виконано
2	Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування	16.02.23 – 1.03.23	виконано
3	Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП	02.03.23 – 17.03.23	виконано
4	Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	18.03.23 – 08.04.23	виконано
5	Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	09.04.23 – 30.04.23	виконано
6	Реалізація та підготовка до впровадження результатів роботи	01.05.23 – 15.05.23	виконано
7	Оформлення додатків та роботи в цілому	16.05.23 – 23.05.23	виконано
8	Здача роботи на перевірку керівникові, виправлення зауважень, підпис керівника	24.05.23 – 31.05.23	виконано
9	Брошування роботи, представлення її завідувачу кафедри, підпис, направлення роботи на зовнішнє рецензування та захист у ЕК	01.06.23 – 05.06.23	виконано

**Студент**

**Чаплігин Д.В.**

**Керівник кваліфікаційної роботи**

**Мазур О.В.**

## Анотація

Обсяг роботи – 103стр., кількість розділів – 5, ілюстрацій – 95, таблиць – 3, джерел по переліку посилань – 16.

Об'єкт дослідження або розробки – технологічний процес сушіння плодоовочевої сировини в потоці.

Мета роботи – розробка системи автоматичного керування процесом конденсаційного сушіння плодоовочевої сировини в потоці з метою поліпшення техніко-економічних показників роботи системи при веденні ТП в раціональному режимі, та розробки SCADA-системи для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.

Методи дослідження та інструментарій – при ідентифікації властивостей об'єкту керування використовувалися методи уявного активного та пасивного експерименту з подальшою обробкою їх результатів; моделі об'єкту керування та системи регулювання розроблялися в середовищі Simulink/Matlab; параметричний синтез системи керування проведений методом оптимізації показника якості її функціонування; розробка удосконаленої системи проводилася аналітично із застосуванням апарату передатних функцій. Саме від того наскільки точно досягнута мета ведення даного технологічного процесу і залежить якість отриманої продукції.

Отримані результати – отримана система підвищеної динамічної точності, яка підтримує регульовані змінні в регламентних зонах як в сталих, так і в перехідних режимах роботи

Область застосування – система може бути використана при модернізації процесу виробництва сухофруктів.

Значущість роботи і висновки – розроблена система має переваги у порівнянні із традиційними САР, які використовуються на практиці.

Ключові слова: технологічний процес, об'єкт керування, регулятор, система керування.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ І ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.	12
1.1. Опис технологічного процесу і основного обладнання .....	12
1.2. Аналіз впливу режимів ведення технологічного процесу і роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз існуючих регламентів і наслідків їх порушень .....	13
1.3. Аналіз існуючих САК ТП сушіння плодоовочевої сировини в потоці.....	15
1.4. Комплекс математичних моделей технологічного процесу сушіння плодоовочевої сировини в потоці як об'єкта регулювання...	16
1.5. Недоліки існуючих САК ТП сушіння плодоовочевої сировини, обґрунтування напрямлень вдосконалення САК, як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу.....	21
1.6. Висновки. Формулювання мети і задачі дослідження.....	21
РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ.....	22
2.1. Специфічні особливості ОР та обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення їх динамічної точності.....	22
2.2. Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.....	22
2.3. Висновки.....	28
РОЗДІЛ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ, НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	29
3.1. Обґрунтування актуальності застосування систем керування,	

побудованих на базі апарата нечіткої логіки для розглянутого об'єкта керування.....	29
3.2. Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування що характеризується нелінійними статичними характеристиками.....	30
3.3. Параметричний синтез САК з традиційним (П, ІІ, ІІД) регуляторами для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	32
3.4. Розробка моделі САК з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	35
3.5. Порівняльний аналіз САР температури сушильного агента з традиційним ІІД регулятором та з нечітким регулятором FuzzyLogicController.....	42
3.6. Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів керування.....	43
3.7. Розробка моделі САК з нейрорегулятором.....	47
3.8. Параметрична оптимізація САР з нейрорегулятором.....	52
3.9. Аналіз функціонування різних САР за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють, випадкового характеру.....	56
3.10. Висновки.....	59
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ.....</b>	
4.1. Опис загальних принципів побудови системи керування.....	61
4.2. Розробка структурної схеми САК та опис принципу її дії.....	65
4.3. Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів керування.....	68
4.4. Доопрацювання математичної моделі ОР до моделі ОО на вирішення завдання оптимального керування.....	68
4.5. Розробка імітаційної моделі екстремальної системи оптимізації із	

запам'ятовуванням екстремуму та дослідження її роботи.....	69
4.6. Висновки.....	77
<b>РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ НА ПІДПРИЄМСТВІ.....</b>	<b>78</b>
5.1. Існуюча програмно-технічна структура підсистеми керування процесом сушіння плодоовочевої сировини з використанням теплового насосу і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.....	78
5.2. Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.....	83
5.3. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	97
5.4. Висновки за розділом.....	97
Загальні висновки.....	98
Список літератури.....	100
Додаток А .....	102

## Перелік умовних позначень

- ПФ - імпульсна перехідна функція ;
- АЧХ – амплітуда-частотні характеристики ;
- ФЧХ – фаза-частотні характеристики ;
- СКП – середньоквадратичний період ;
- САР – система автоматизованого регулювання;
- ЗНВ – зона незначних відхилень
- ММ – математична модель
- ОК – об'єкт керування
- САК – система автоматичного керування
- САК ПДТ – САК підвищеної динамічної точності
- ТП – технологічний процес
- ПЗО - пристрій зв'язку з об'єктом;
- СКЗ - спрощений коригуючий зв'язок;
- ФЛС – функціональна логічна схема.

## Вступ

### *Актуальність теми*

Одним із етапів технологічного процесу виробництва сухофруктів є процес сушіння плодоовочевої сировини в сушильній установці, який дозволяє отримати кінцевий продукт з бажаними споживчими характеристиками. Існуючі системи керування процесом сушіння не забезпечують необхідної динамічної точності відтворення заданого значення температури та вологовмісту сушильного агенту в сушильній установці, що спричиняє брак готової продукції.

В лабораторії кафедри АТПтаРС Одеської національної академії харчових технологій розроблено сушильну установку, яка являє собою сушильну камеру з тепловим насосом. Для максимально ефективного керування процесом сушки плодоовочевої сировини актуальною є розробка спеціалізованої вбудованої мікропроцесорної САР.

### *Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.*

Робота виконувалась на кафедрі автоматизації виробничих процесів, Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) і відповідає основному науковому напрямку №3 ОНАПТ «Створення і розробка нового високоефективного обладнання, теорії, методів його розрахунку і проектування».

### *Мета і задачі дослідження.*

Мета дослідження – засобами автоматичного регулювання не допустити вихід за граничні значення технологічних параметрів, підвищити якість сушіння плодоовочевої сировини в потоці, забезпечити стійкість, зменшити затрати енергії.

*Задачі дослідження* у зв'язку з поставленою метою можна сформулювати так:

- Детально дослідити процес сушіння плодоовочевої сировини в потоці, створити його математичні моделі, визначити основні регламенти ведення технологічного процесу.

- Проаналізувати існуючі алгоритми ведення технологічного процесу, та синтезувати свій власний алгоритм, який покращить техніко-економічні показники даного процесу.

*Об'єктом дослідження* в даній роботі є керований технологічний процес сушіння плодоовочевої сировини в сушильній камері.

*Предметом дослідження* є система автоматичного керування процесом конденсаційного сушіння плодоовочевої сировини в потоці, що містить моделі процесу як об'єкта керування.

*Методи дослідження*

- загальні теорії систем, в тому числі їх функціонально – структурного аналізу (задача 1);
- програмно – технічного синтезу комп'ютерних інформаційно – керуючих систем комп'ютерної обробки рисунків (задачі 2 і 5);
- планування і проведення експериментів, обробка їх результатів і ідентифікації моделей ОУ (задача 3);
- теорії автоматичного керування і її підрозділів – статистичної теорії автоматичних систем, теорії систем з запізненням, теорії систем гарантуючого керування, теорії цифрових систем керування (задача 4);
- імітаційного моделювання систем керування (задачі 3 і 4).

*Наукова новизна отриманих результатів.*

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- Отримано математичні моделі процесу конденсаційного сушіння плодоовочевої сировини в потоці як об'єкту керування, які можна використовувати в подальшому, для синтезу і аналізу систем керування різного інтелектуального рівню.

- Створено нову систему автоматичного регулювання процесу конденсаційного сушіння плодоовочевої сировини в потоці, основу якого складають три контури регулювання: температури сушильного агенту, вологовмісту сушильного агенту, температури води в утилізаторі.

*Практична значимість отриманих результатів.*

Практична цінність роботи полягає в тому, що в результаті впровадження розроблених алгоритмів в систему керування сушінням плодоовочевої сировини забезпечується зниження енерговитрат. Результати дослідження можуть також застосовуватися для пошуку оптимальних режимів функціонування аналогічних систем сушіння.

*Особистий внесок здобувача.*

У роботі був виконаний літературний пошук та систематизація отриманої інформації. Була розроблена структура і сформульовані основні функції створюваної системи автоматичного регулювання. Було проаналізовано чинники і процеси, які впливають на стан технологічного процесу сушіння плодоовочевої сировини, сформульована в загальному вигляді задача побудови математичної моделі цього процесу.

*Публікації.*

Результати роботи були представлені на внутрішній конференції, на Міжнародному конкурсі студентських наукових робіт “Black Sea Science”, опубліковані у науковому журналі «Автоматизація Технологічних Бізнес Процесів»

# РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ І ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

## 1.1. Опис технологічного процесу і основного обладнання.

Суть технологічного процесу – це цілеспрямоване перетворення продуктових і енергетичних потоків у спеціальному технологічному устаткуванні (ТУ) (машинах, апаратах, агрегатах). Суть технологічного процесу сушіння плодовоовочевої сировини полягає в видаленні вологи з продукту і перетворення його у сухофрукт. Технологічний процес реалізується в сушильній камері. Технологічна схема процесу наведена на рис.1.1.

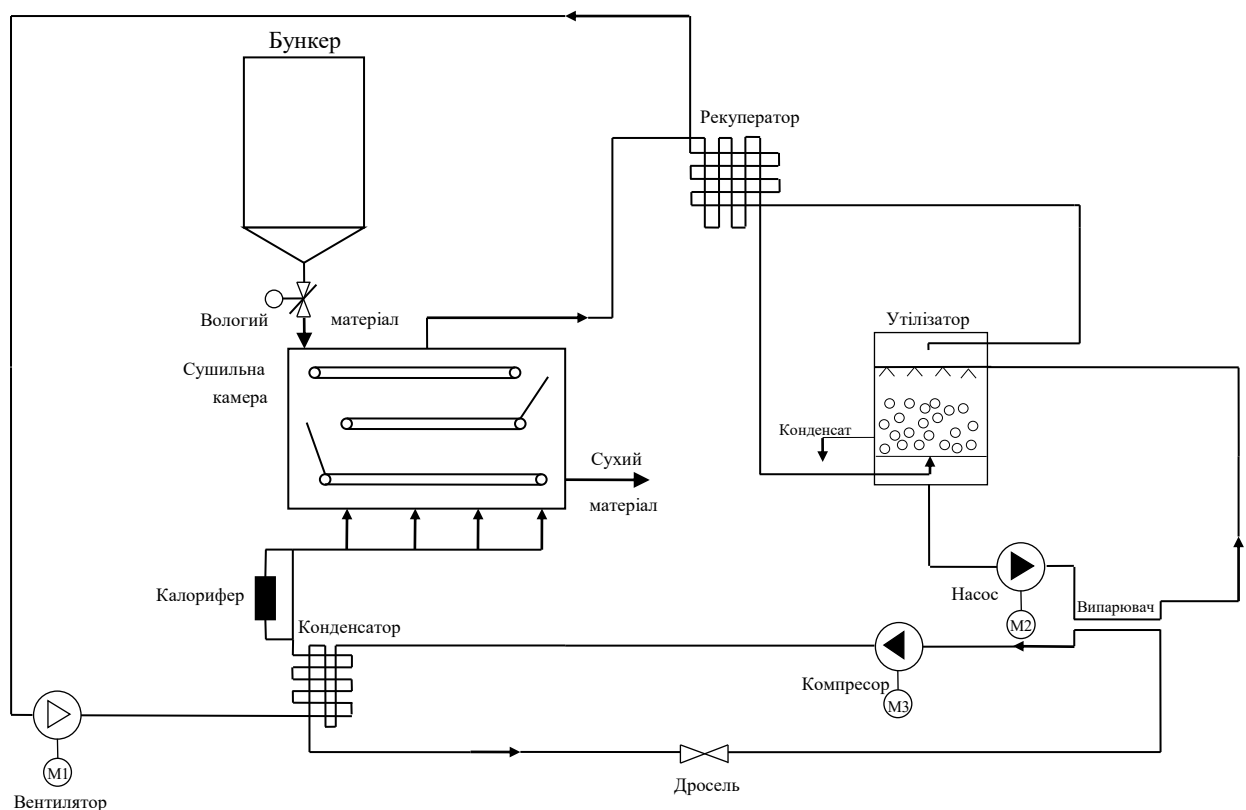


Рис. 1.1 – Технологічна схема процесу сушіння фруктів

У стаціонарному режимі роботи установки, потік сушильного агента з температурою  $60^{\circ}\text{C}$  подається в сушильну камеру. Після проходження

матеріалу потік надходить в утілізатор, де утілізується зайве тепло. Після проходження утілізатору потік сушильного агента проходить через рекуператор. Після проходження рекуператору потік сушильного агента надходить до конденсатору теплового насоса, нагріваючись при цьому, та, догріваючись у калорифері, надходить у сушильну камеру. Цикл повторюється.

При цьому номінальне споживання установки становить 40 кг/год. Також до складу обладнання входить тепловий насос, електропривід компресору якого має потужність 5кВт.

1.2. Аналіз впливу режимів ведення технологічного процесу і роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз існуючих регламентів і наслідків їх порушень.

Для якісної і економічно доцільної реалізації технологічного процесу сушіння плодоовочевої сировини в сушильній камері необхідно регулювати температуру сушильного агента  $\Theta_{\text{савх}}$ , його вологовміст  $d_{\text{савх}}$  та температуру холодної води  $\Theta_{\text{хв}}$ . Виходячи з вимог технології процесу та експлуатації технологічних машин, можуть бути задані певні вимоги до відхилень регульованих змінних:

- А) До гранично-допустимим динамічним відхилень  $dy_{\text{доп}}^{\text{макс}}$ ;
- Б) До відхилень, якими можна знехтувати, тобто ЗНВ;
- В) До часу існування допустимих динамічних відхилень за межами ЗНВ.

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів температура сушильного агента  $\Theta_{\text{савх}}$  має підтримуватися на рівні  $60^{\circ}\text{C}$  з точністю  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  протягом часу не більше 200 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис.1.2.

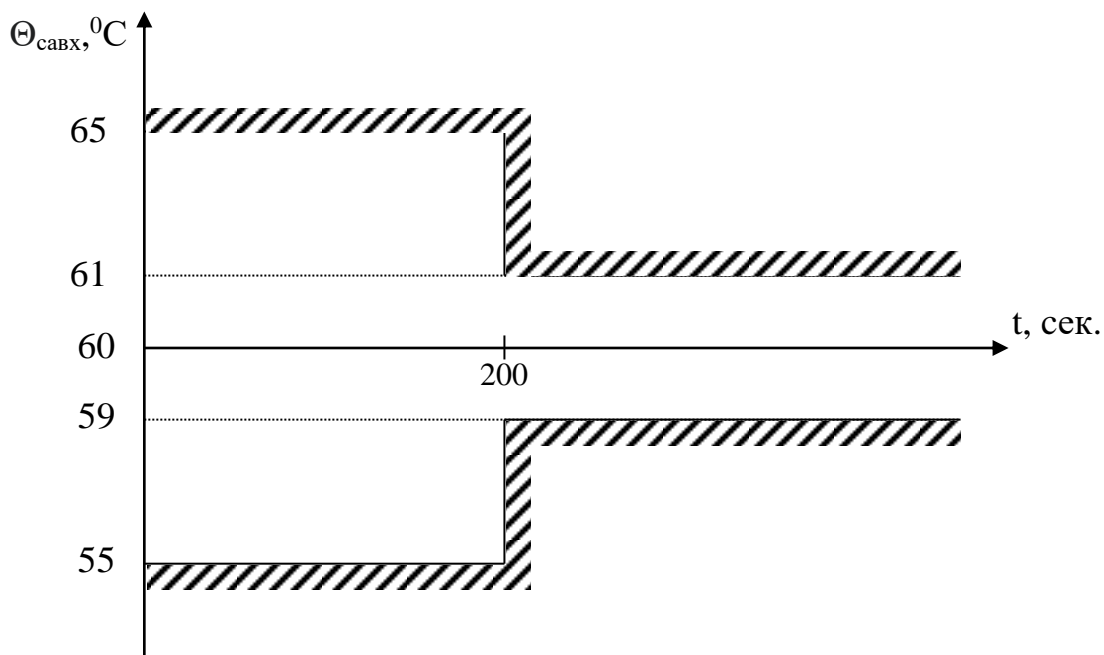


Рис. 1.2 – Регламентна зона для температури сушильного агенту  $\Theta_{\text{савх}}$

Вологовміст сушильного агенту  $d_{\text{савих}}$  повинен підтримуватися на  $45 \text{ кг/м}^3 \pm 1 \text{ кг/м}^3$ . За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до  $\pm 5 \text{ кг/м}^3$  протягом часу не більше 200 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис. 1.3.

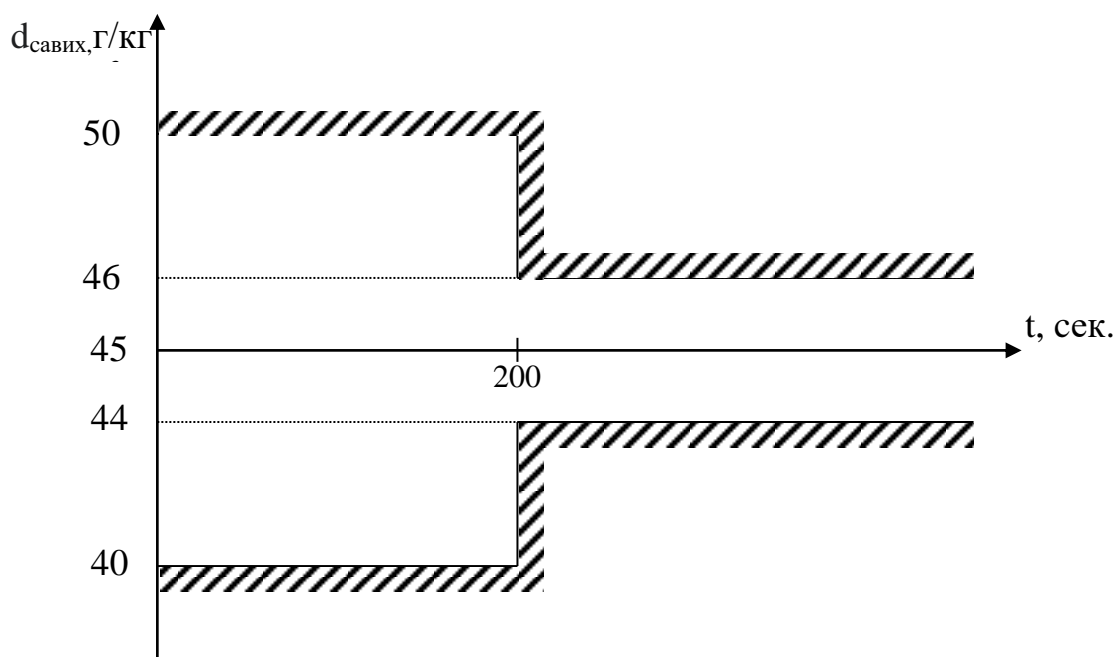


Рис. 1.3 – Регламентна зона для вологовмісту сушильного агенту  $d_{\text{савих}}$

Температура холодної води  $\Theta_{\text{хв}}$  має підтримуватися на рівні  $24^\circ\text{C}$  з точністю  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до

$\pm 3^{\circ}\text{C}$  протягом часу не більше 100 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис.1.4.

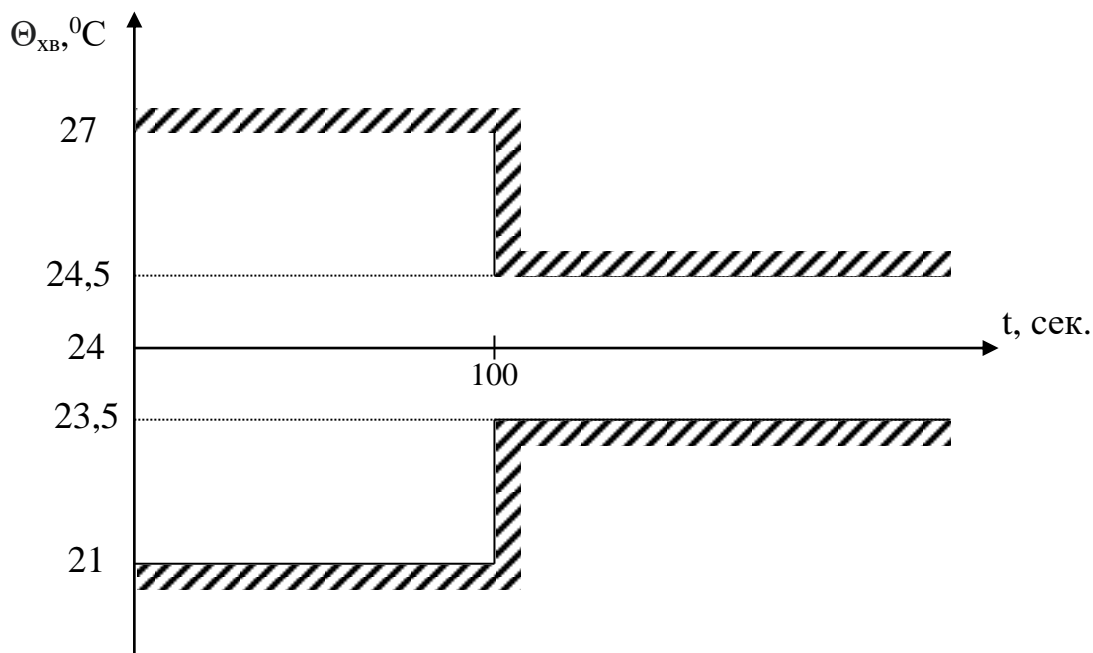


Рис. 1.4 – Регламентна зона для вологовмісту сушильного агента  $\Theta_{хв}$

На контури регулювання температур та вологовмісту постійно діють неконтрольовані збурення випадкового характеру.

Порушення цих регламентів призведе до погіршення якості готового продукту або аварійної ситуації.

### 1.3 Аналіз існуючих САК ТП сушіння плодоовочевої сировини в потоці

Відомий спосіб автоматичного керування процесом сушіння і пристрій для його реалізації, який полягає в регулюванні експозиції сушіння зерна залежно від вологості зерна на виході і корекції експозиції в залежності від вологості зерна на її вході, в регулюванні температури агента сушіння в залежності від температури зерна, і корекції тепла в залежності від температури зерна в зоні максимального нагріву і вологості зерна на вході сушильної камери [В.Ф. Самочетов. Техническая база хлебоприемных предприятий / Зерносушение. - М.: Колос, 1978. - С. 215].

Найбільш близьким до заявленого, обраним за прототип є спосіб автоматичного керування процесом сушіння матеріалу в стрічковій конвеєрній сушарці, який включає вимірювання і підтримку заданого

значення температури сушильного агента шляхом зміни потужності електронагрівача, вимірювання і підтримку заданого значення вологості продукту шляхом зміни швидкості обертання вентилятора [Медведев, А.Е. Автоматизация производственных процессов: уч. пособие / А.Е. Медведев, А.В. Чупина. – Кемерово: Кузбас гос. техн. ун-т, 2009. - 325 с].

1.4 Комплекс математичних моделей технологічного процесу сушіння плодоовочевої сировини в потоці як об'єкта регулювання.

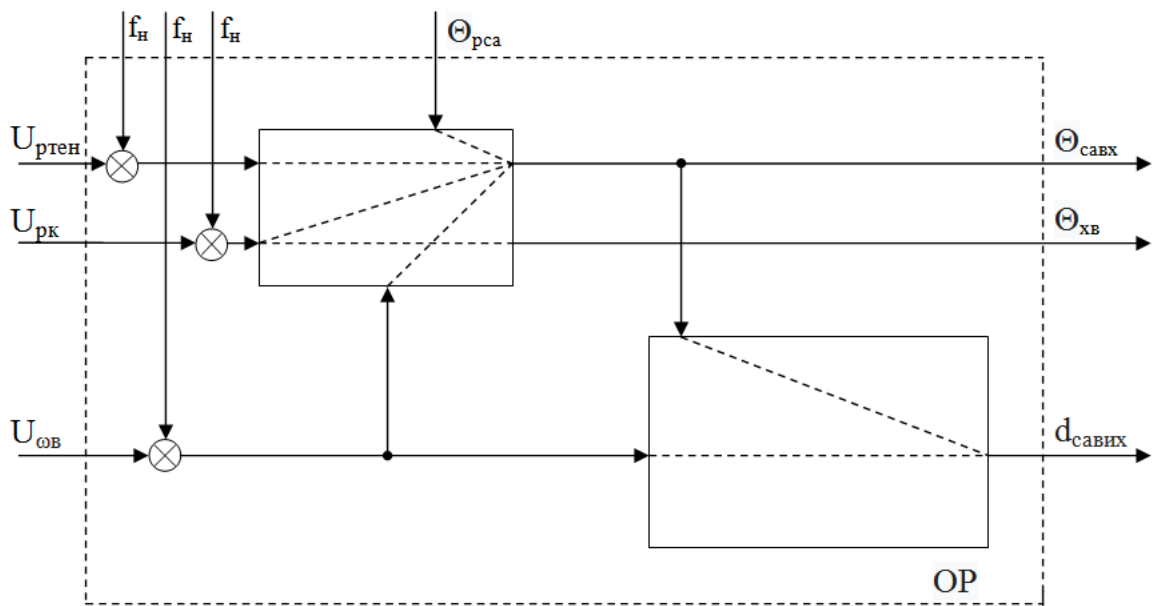


Рис. 1.5– Структурна схема процесу сушіння плодоовочевої сировини як об'єкту регулювання

Позначення на рисунку:

$\Theta_{\text{савх}}$  – температура сушильного агента на вході в сушильну камеру, задана технологією сушіння, °С;

$d_{\text{савих}}$  – вологовміст сушильного агента на виході з сушильної камери, г/кг ;

$\Theta_{\text{хв}}$  – температура холодної води, °С;

$U_{\text{рк}}$  – обороти компресору теплового насосу, %х.р.о

$U_{\text{ртен}}$  – потужність електронагрівача, %х.р.о

$U_{\text{ов}}$  – швидкість обертання вентилятору, % х.р.о

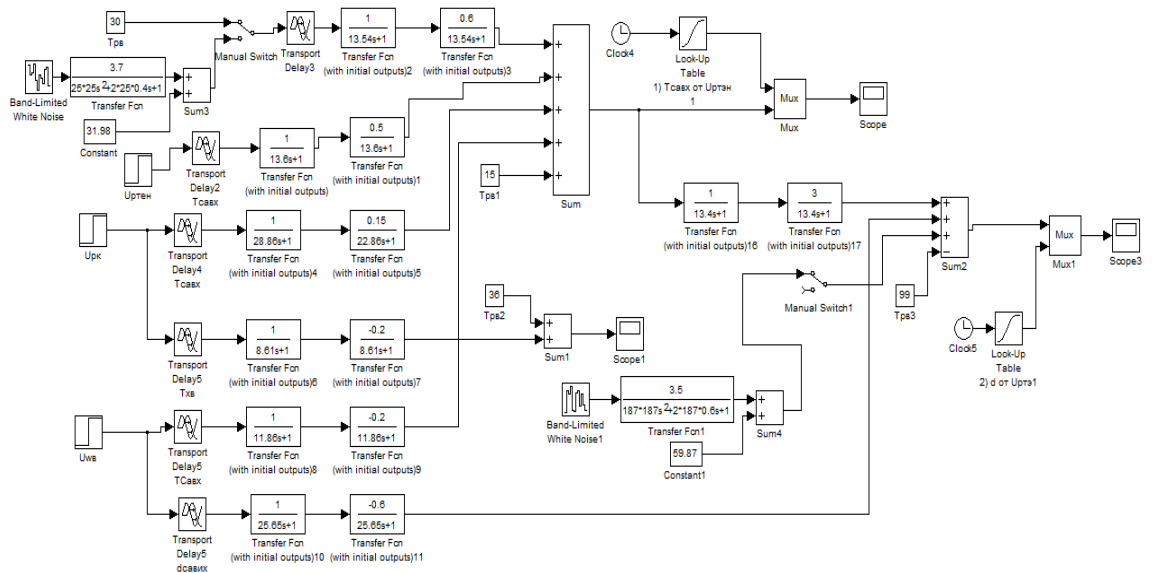


Рис. 1.6 - Схема моделювання повної моделі об'єкта.

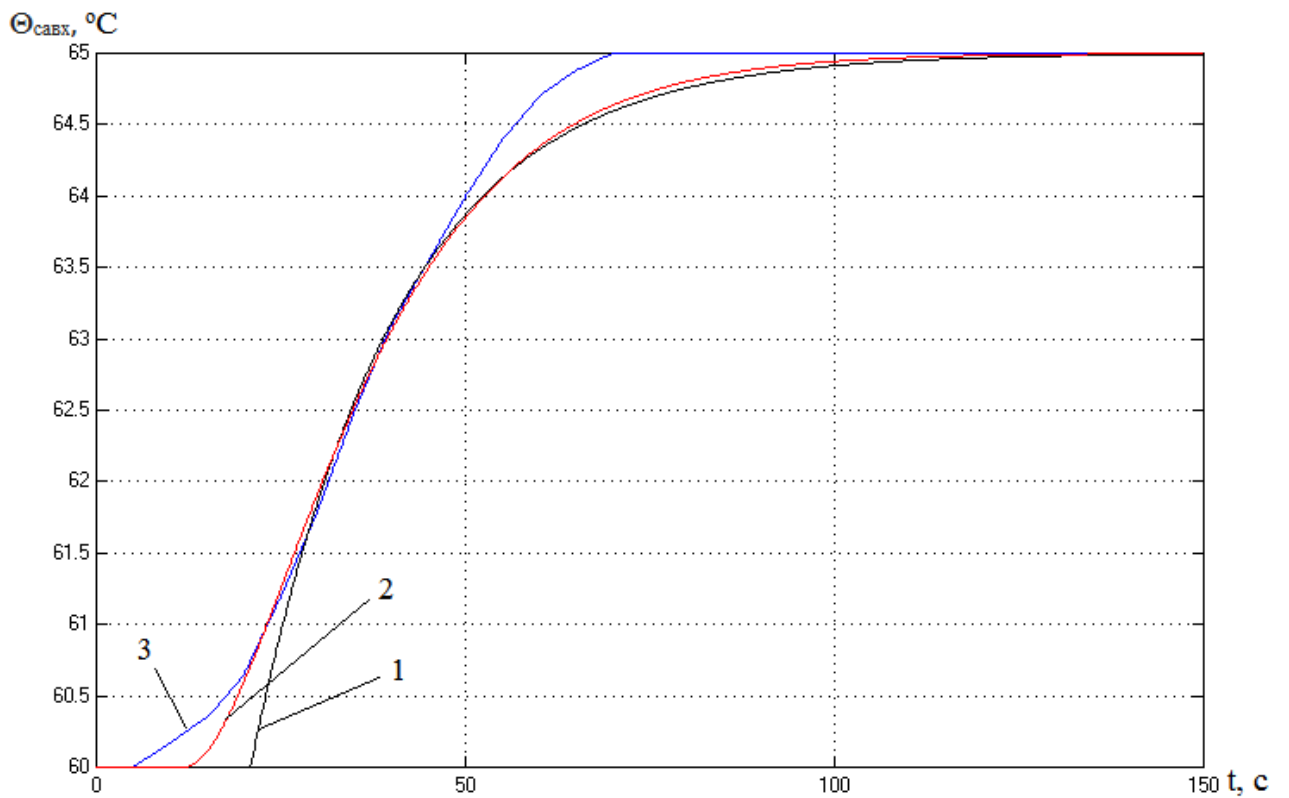


Рис. 1.7 – Результат моделювання каналу « $U_{\text{ген}} - \Theta_{\text{савх}}$ », де 1- модель 1-го порядку; 2- модель 2-го порядку; 3- експериментальні данні.

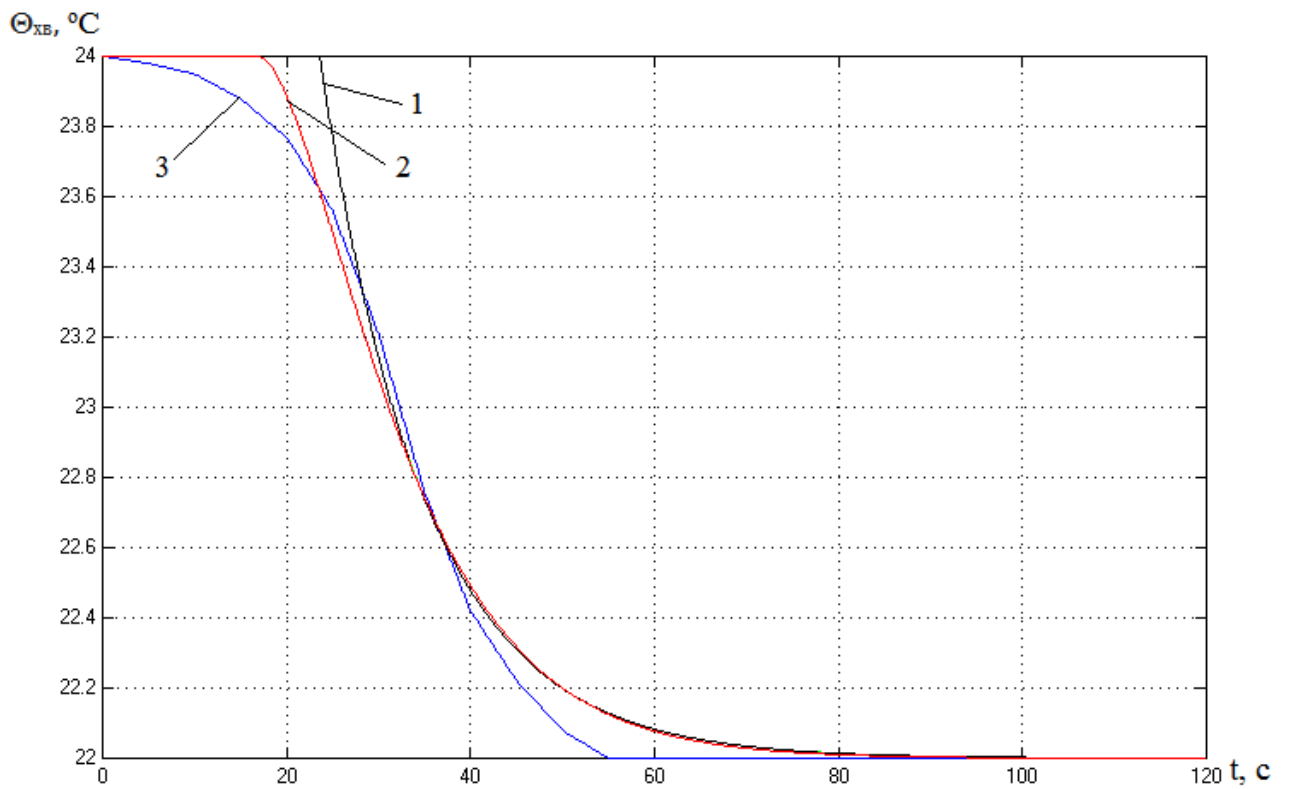


Рис. 1.8 – Результат моделювання каналу « $U_{pk} - \Theta_{xb}$ », де 1- модель 1-го порядку; 2- модель 2-го порядку; 3- експериментальні данні.

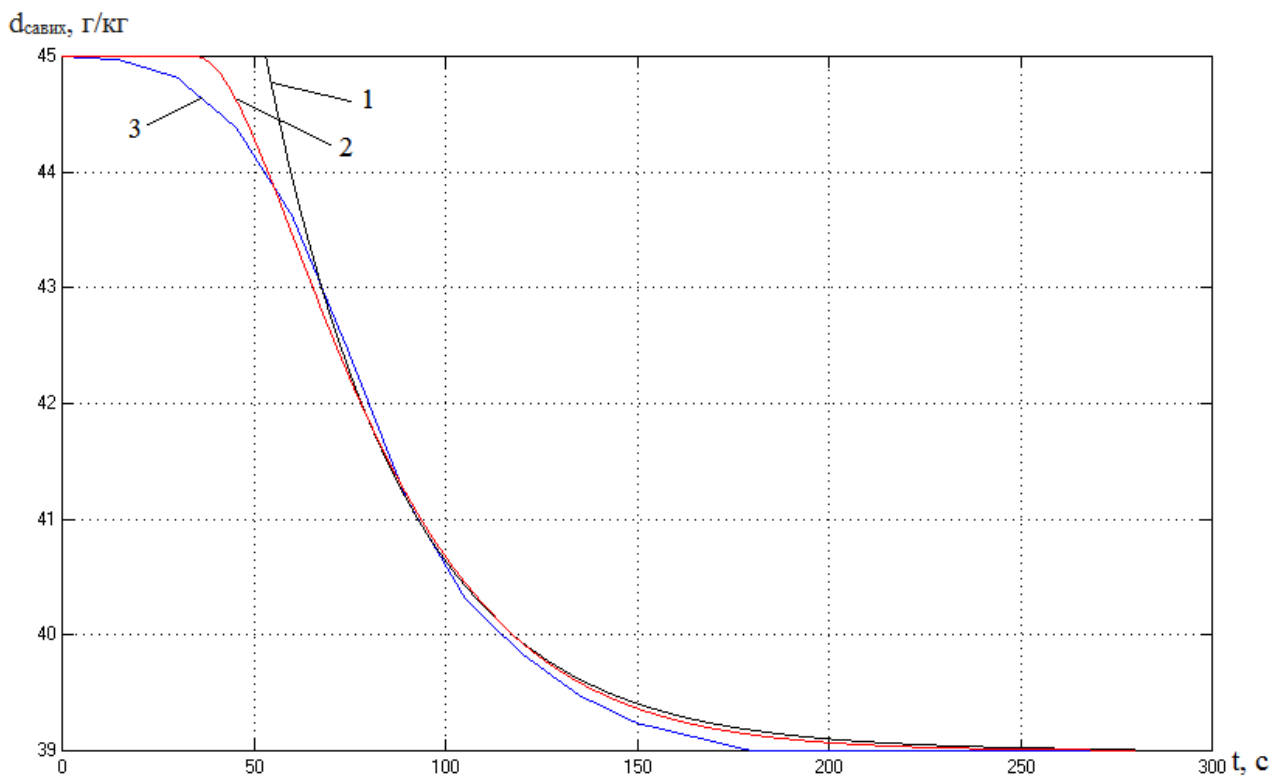


Рис. 1.9 – результат моделювання каналу « $U_{ov} - d_{savixh}$ », де 1- модель 1-го порядку; 2- модель 2-го порядку; 3- експериментальні данні.

Типова структура і алгоритми САК ТП сушіння плодоовочевої сировини, які реалізують функцію регулювання.

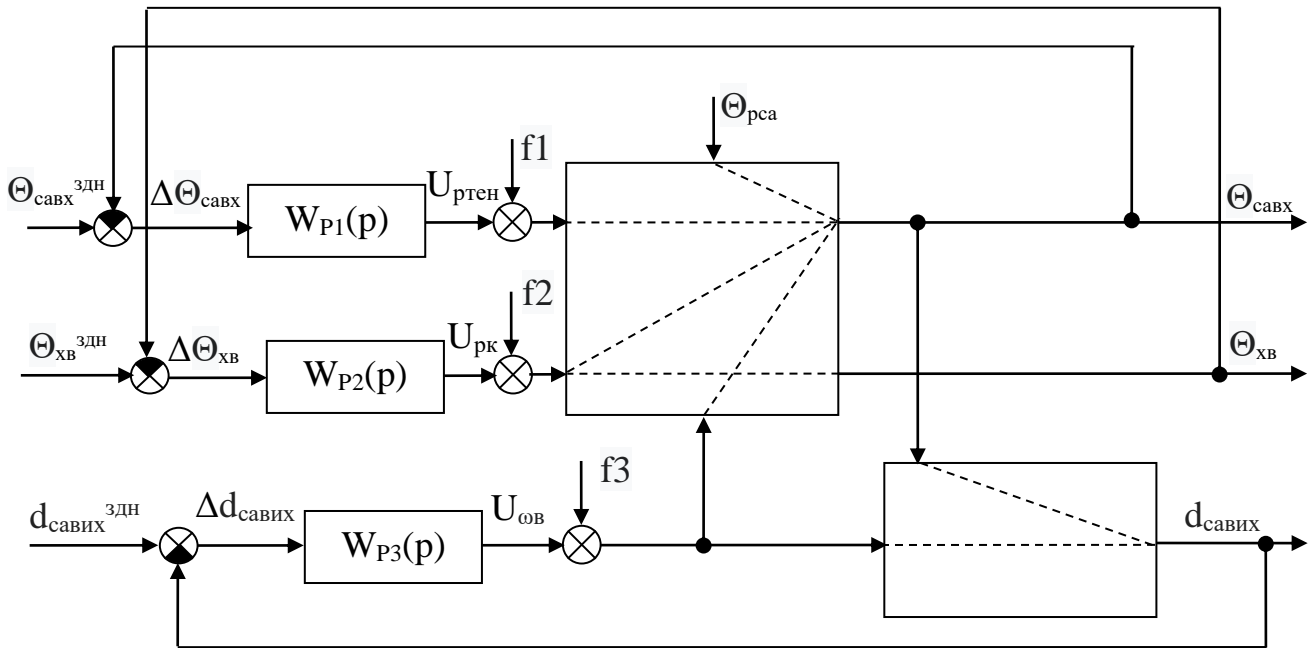


Рис. 1.10 – Структурна схема САК процесу сушіння плодоовочевої сировини в потоці базової структури

В якості алгоритму регулювання вибираю пропорційно-інтегрально-диференціальний алгоритм регулювання (ПІД-регулятор).

Диференціальне рівняння:

$$u(t) = k_p(\Delta y(t) + \frac{1}{T_{из}} \int_0^t \Delta y(t) dt + T_{пр} \frac{d\Delta y}{dt}) + u_0;$$

Передатна функція ПІД регулятора:

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

$k_p$  – коефіцієнт передачі регулятора;

$T_{из}$  – час ізодрому;

$T_{уп}$  – час попередження.

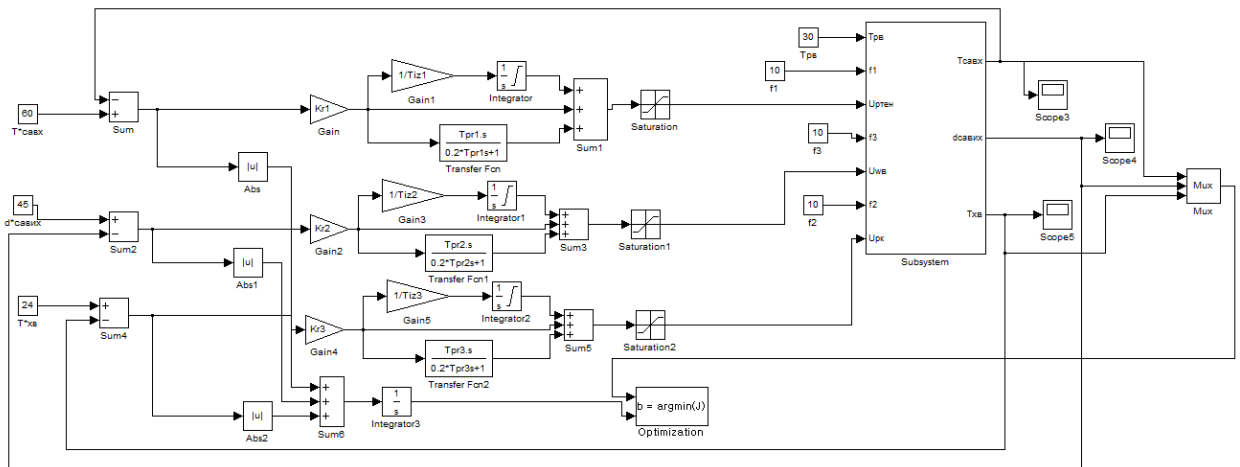


Рис. 1.11 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань регулятора

Таблиця 1.1 - Прямі показники якості

Канали	$\Delta u^{\max}$	$t_{\text{пер}}$
ПІД-регулятор		
« $U_{\text{рген}} - \Theta_{\text{савх}}$ »	1,4	120
« $U_{\text{ов}} - d_{\text{савх}}$ »	1,6	120
« $U_{\text{рк}} - \Theta_{\text{хв}}$ »	1,4	60

Перевірка на грубість САК з оптимальними настройками ПІД-регуляторів .

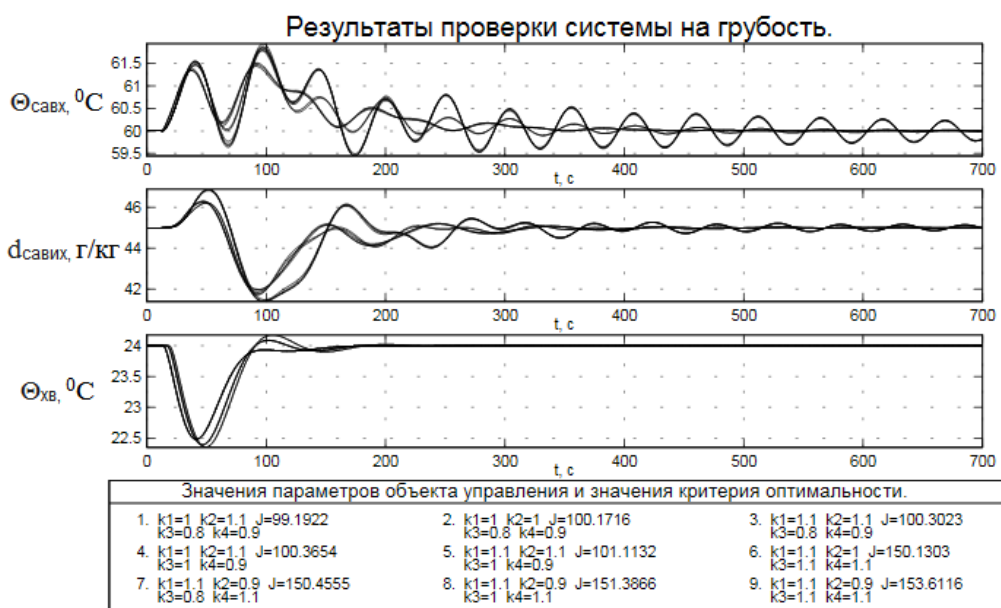


Рис. 1.12 - Перевірка на грубість САК

Система груба.

1.5 Недоліки існуючих САК ТП сушіння плодоовочевої сировини, обґрунтування напрямлень вдосконалення САК, як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу.

Недоліком є низька точність стабілізації вмісту вологи в готовому продукті що призводить до скорочення термінів його зберігання та можливого псування.

#### 1.6 Висновки

Виходячи з вищевказаних обґрунтувань, доцільно розробити для даного процесу абсолютно нову систему, яка забезпечить високу ефективність. Тому задача синтезу САР підвищеної динамічної точності повинна бути вирішена.

## РОЗДІЛ 2

### ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

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

Для САР сушіння плодоовочевої сировини основною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія контрольованого збурення. Основним шляхом підвищення динамічної точності саме розглянутої САР є побудова САР, інваріантної до дії контрольованого збурення.

2.2 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.

В основу підвищення динамічної точності САР буде покладено принцип двоканальний Петрова, суть якого у введенні додаткового каналу впливу " $\Theta_{pca} - \Theta_{cavx}$ " через коригуючий зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема САР, інваріантної до дії контрольованого збурення матиме вигляд, наведений на рис. 2.1.

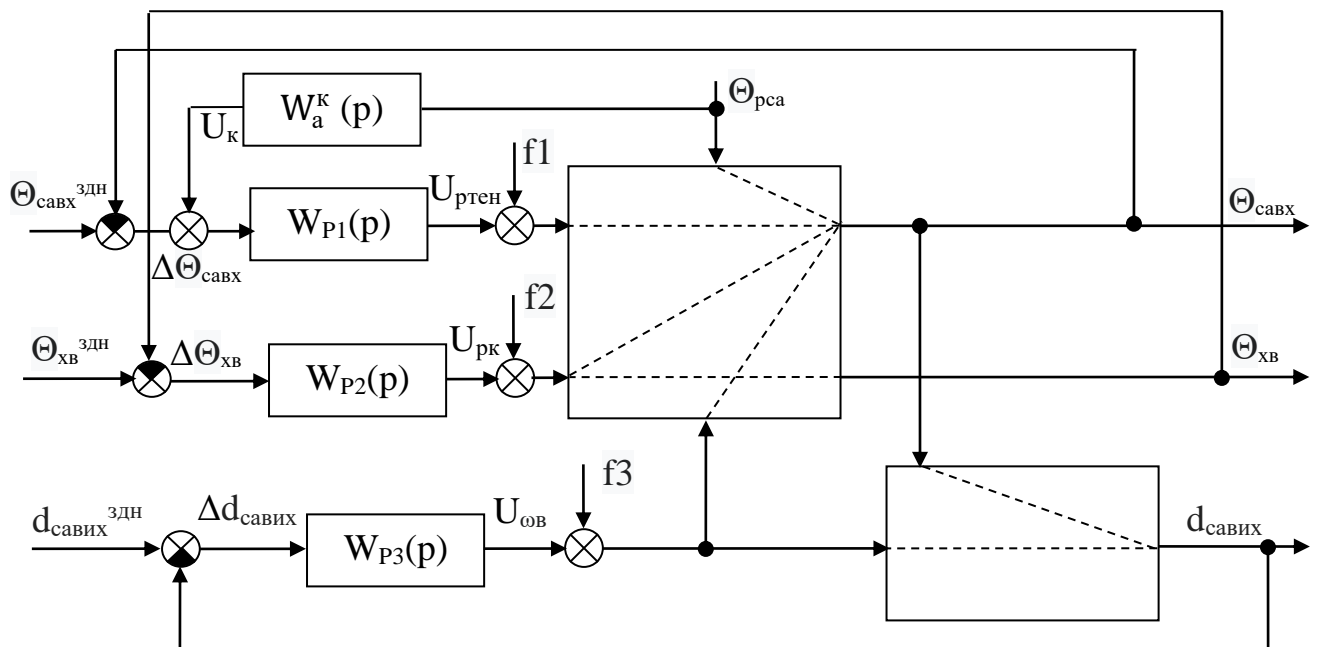


Рис. 2.1 – Структурна схема САР підвищеної динамічної точності  
На схемі  $W_a^k(p)$  – передаточна функція корегуючого зв'язку.

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткового каналу впливу за контрольованим збуренням, а для розглянутої

САР така можливість є. Достатньою умовою реалізації САР є фізична реалізація передаточної функції коригуючого зв'язку.

Для забезпечення інваріантності до дії контрольованого збурення САР каналу « $U_{ртен}-\Theta_{савх}$ » повинна забезпечити помилку стабілізації, що має дорівнювати нулю:

$$\Delta\Theta_{савх} = 0$$

Відомо, що

$$\Delta\Theta_{савх} = W_{\Theta_{рса}-\Theta_{савх}}^C(p) \cdot \Theta_{савх} = 0$$

Відомо, що  $\Theta_{рса} \neq 0$ , тоді

$$W_{\Theta_{рса}-\Theta_{савх}}^C(p) = \frac{W_{\Theta_{рса}-\Theta_{савх}}^o(p)}{1 + W_P(p) * W_{U_{ртен}-\Theta_{савх}}^o(p)} + \frac{W_d^k(p) \cdot W_P(p) \cdot W_{U_{ртен}-\Theta_{савх}}^o(p)}{1 + W_P(p) * W_{U_{ртен}-\Theta_{савх}}^o(p)} = 0$$

Звідси

$$W_k(p) = \frac{W_{U_{ртен}-\Theta_{савх}}^o(p)}{W_P(p) * W_{\Theta_{рса}-\Theta_{савх}}^o(p)}$$

Якщо

$$W_{U_{ртен}-\Theta_{савх}}^o(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-20,9p}}{19,6p+1}; \quad W_{\Theta_{рса}-\Theta_{савх}}^o = \frac{0,6 \cdot e^{-46,27p}}{37,94p+1}$$

$$W_P(p) = 3,9 \cdot \left(1 + \frac{1}{26p} + 12,62p\right)$$

Тоді

$$W_k(p) = \frac{\frac{0,5 \cdot e^{-20,9p}}{19,6p+1}}{3,9 \cdot \left(1 + \frac{1}{26p} + 12,62p\right) * \frac{0,6 \cdot e^{-46,27p}}{37,94p+1}} =$$

$$= -0,3 * e^{25,37p} * \frac{26p + (19,6p+1)}{(328p^2 + 26p + 1) * (37,94 + 1)}$$

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку є фізично нереалізовуваною, оскільки містить ланку чистого випередження. Для забезпечення фізичної реалізованості передаточної функції проведемо заміну ланки чистого випередження форсуючою ланкою:

$$e^{25,37p} = 1 + \frac{25,37p}{2,537p+1}$$

Тоді передаточна функція фізично реалізованого коригуючого зв'язку матиме вигляд:

$$W_k(p) = -0,3 * \left(1 + \frac{25,37p}{2,537p+1}\right) * \frac{509,6p^2 + 26p}{12449p^3 + 986,44p^2 + 64p + 1}$$

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

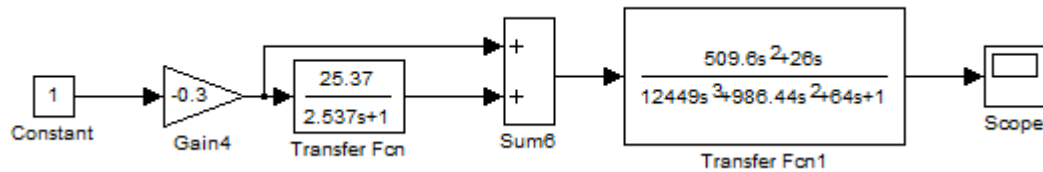


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку

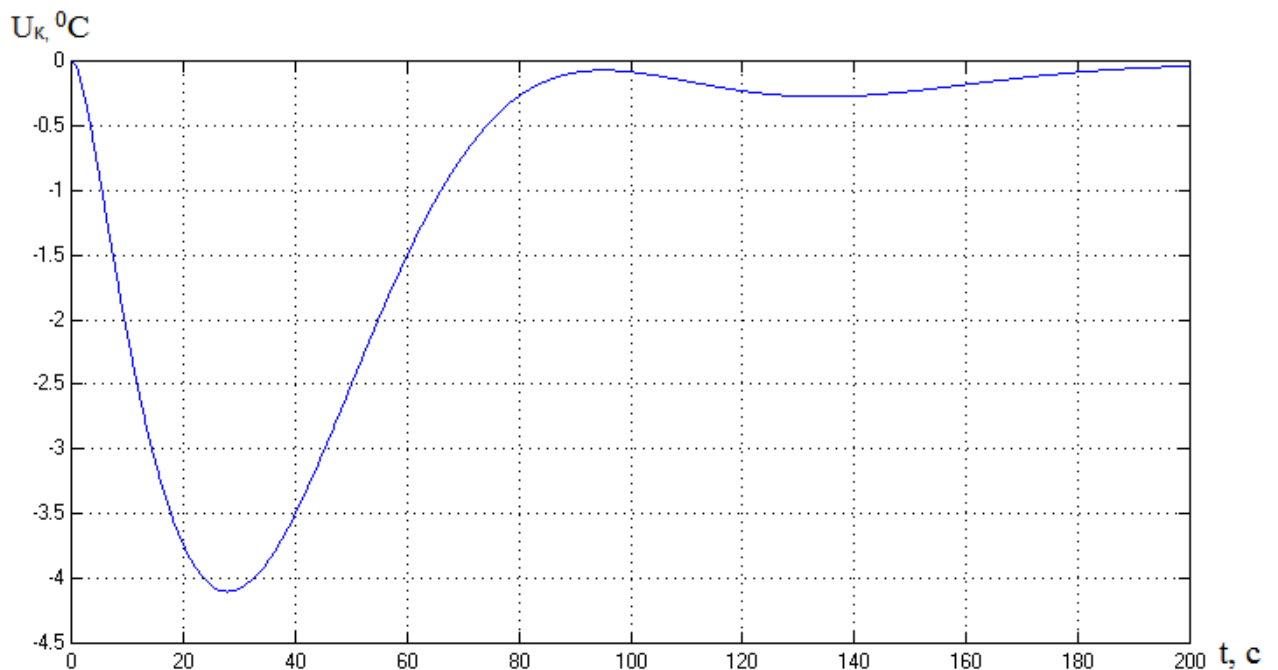


Рис. 2.3 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку представлена занадто складною передаточною функцією, тому її доцільно спростити при збереженні її диференціюючих властивостей. Спрощена передаточна функція коригуючого зв'язку матиме вигляд:

$$W_K(p) = K_K \cdot e^{-T_{K1}p} \cdot \frac{T_{K2}p}{(T_{K2}p+1)^2}$$

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку приймемо такі значення параметрів:  $K_K = -0,3$ ;  $T_{K1} = 25,37$ ;  $T_{K2} = 26$ ;  $T_{K3} = 64$ . Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання, наведеної на рис. 2.4. Результати

розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку наведені на рис. 2.5, а результати моделювання – на рис. 2.6.

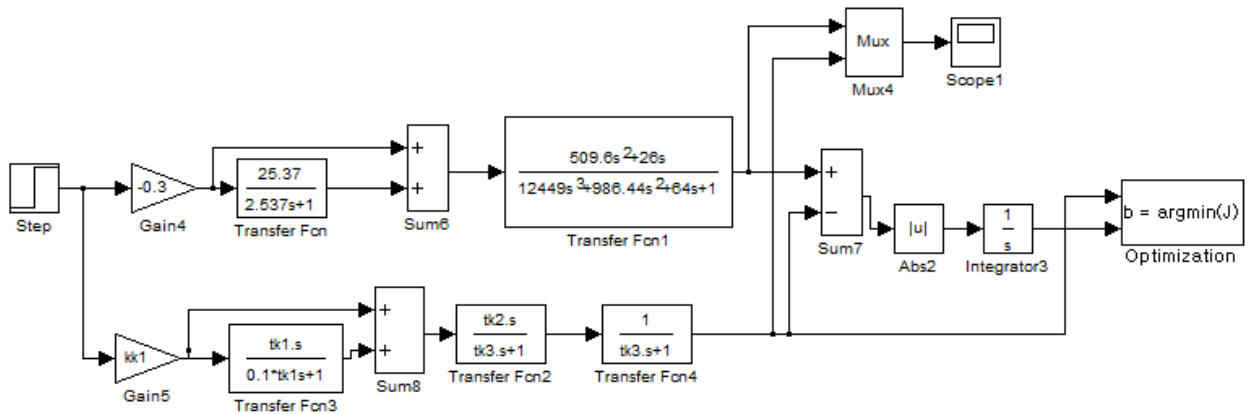
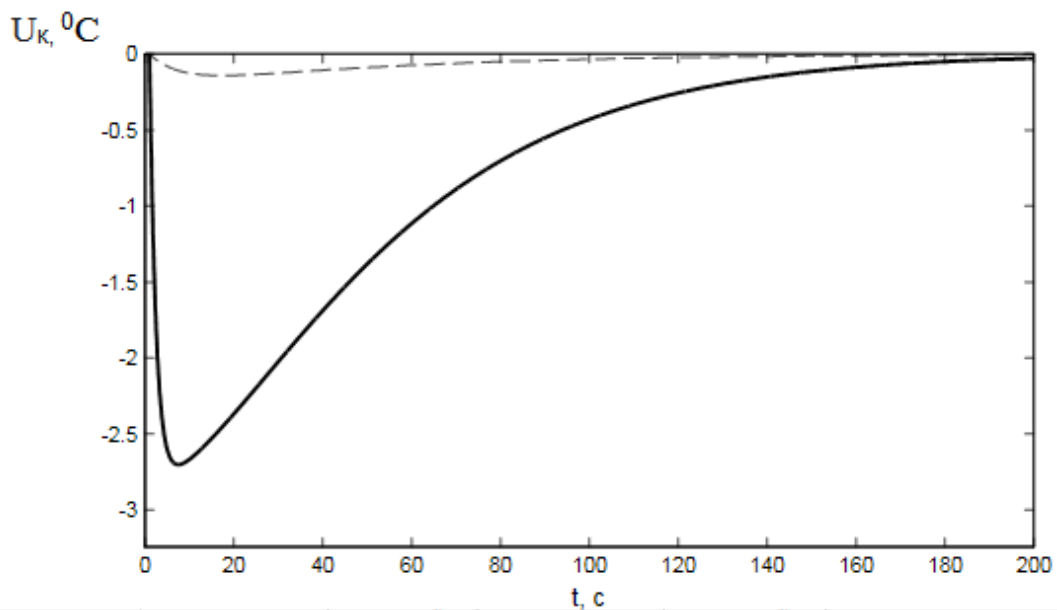


Рис. 2.4 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kk1	-1.9133	-20	-0.3	10	до - 526.5193
tk1	15.1262	-10	70	100	после - 140.3995
tk2	83.3429	1	34	100	Количество шагов процедуры оптимизации:
tk3	30.6007	1	64	200	
					максимальное - 1000
					фактическое - 78

Рис. 2.5 – Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку

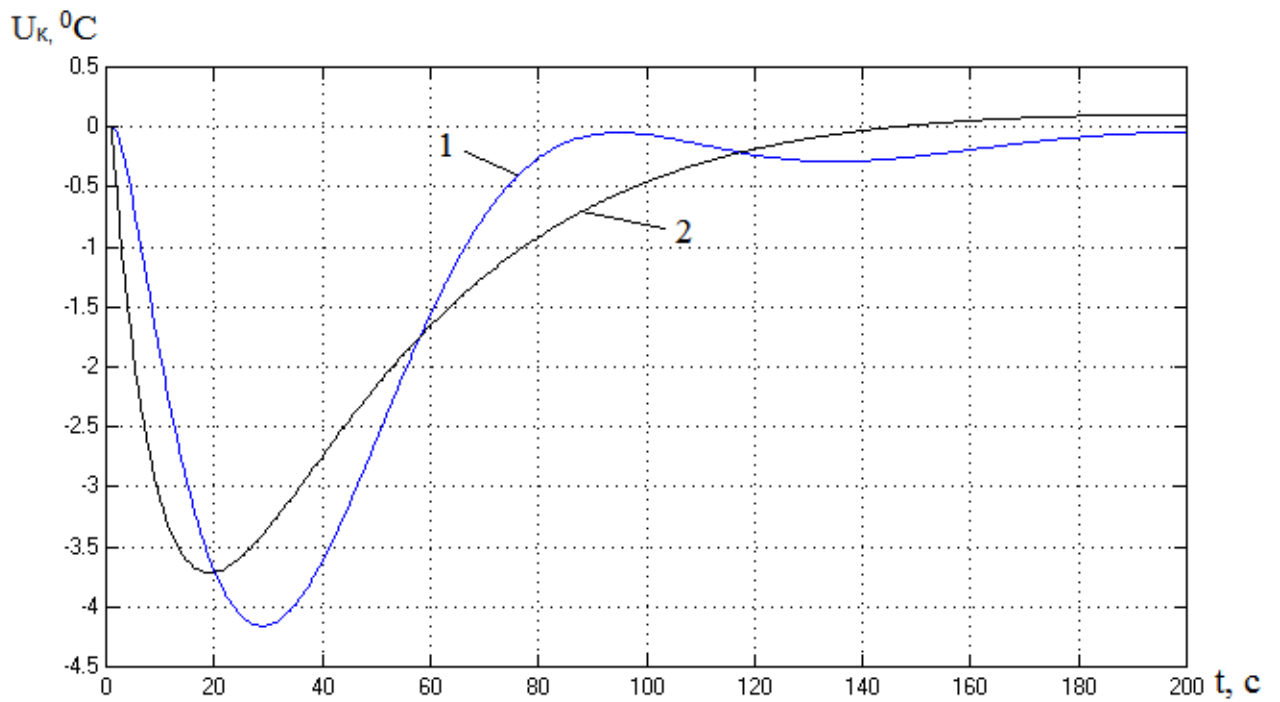


Рис. 2.6 – Перехідні характеристики розрахункового - 1 та спрощеного - 2 коригуючого зв'язку

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

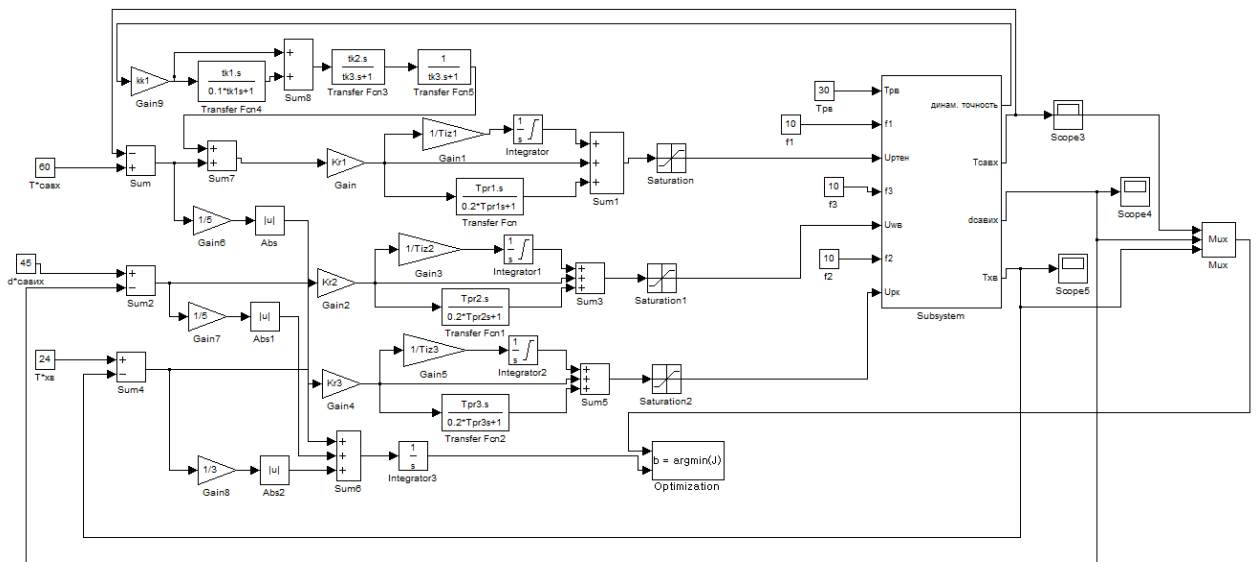
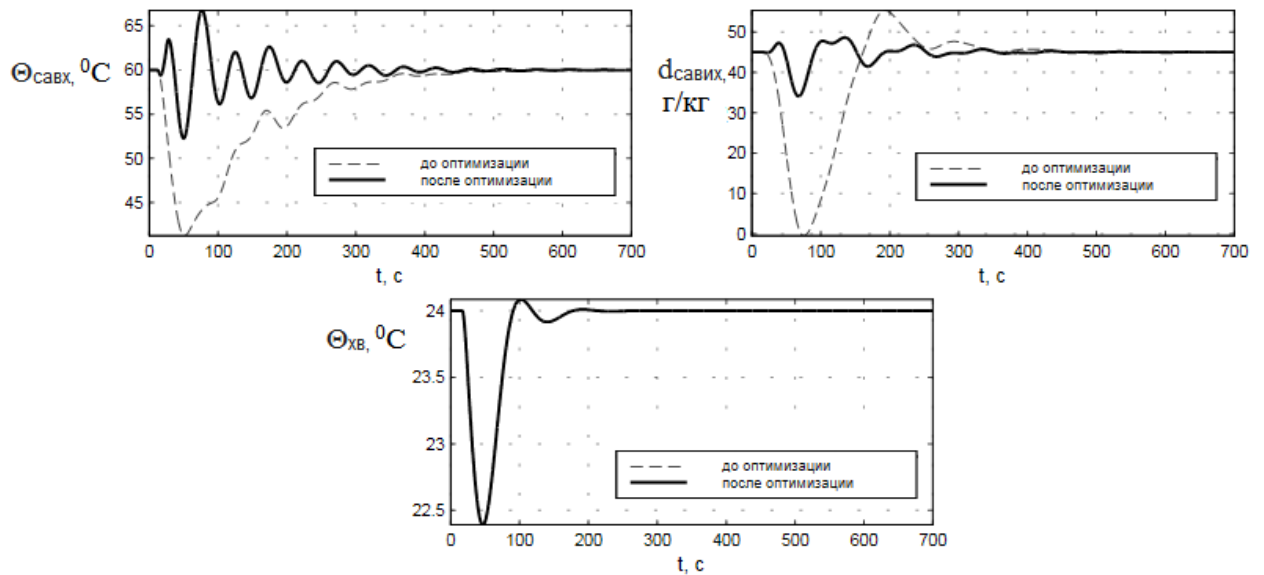


Рис. 2.7 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kk1	-2.3047	-20	-1.9	10	до - 1337.3361
tk1	4.0658	-10	15.1	100	после - 275.207
tk2	77.2096	1	83	100	оптимизации.
tk3	2.2478	1	30.6	200	Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 106

Рис. 2.8 – Результати оптимізації параметрів коригуючого зв'язку

Проведемо аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіацій параметрів об'єкта регулювання

Як і в випадку з САР базової структури, САР підвищеної динамічної точності досліджуємо на грубість в умовах варіації параметрів ОК, а саме, часу запізнення в каналах ОК  $\pm 20\%$ .

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК наведено на рис. 2.9. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР дає перехідні процеси, що сходяться, а значить, САР є грубою.

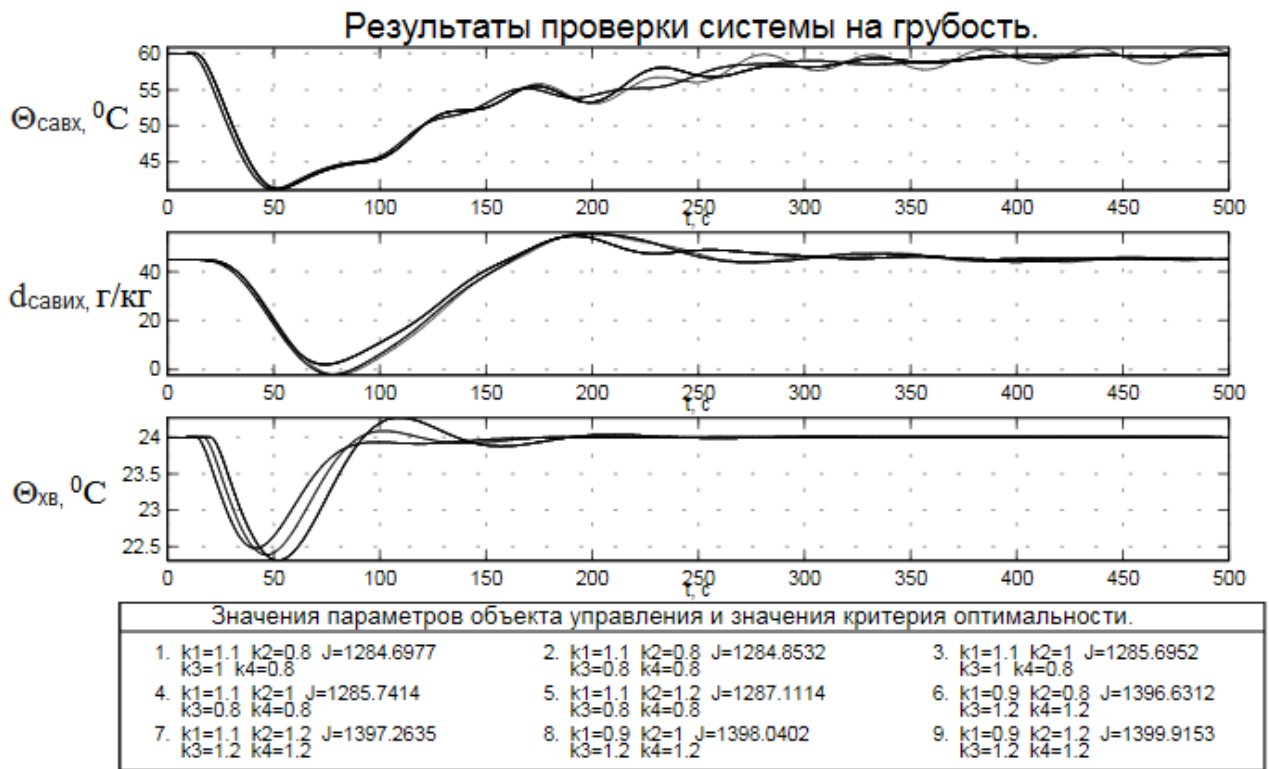


Рис. 2.9 – Аналіз САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК

### 2.3. Висновки

Як видно з результатів оцінки САР на грубість, найбільш "несприятливим" для керування є зменшення часу запізнення на 10% за каналом « $U_{ртен} - \Theta_{савх}$ » збільшення часу запізнення на 20% за каналами « $U_{рк} - \Theta_{савх}$ », « $U_{ов} - d_{савих}$ », « $U_{рк} - \Theta_{хв}$ ». Найбільш "сприятливим" для керування є більший на 10% час запізнення каналу « $U_{ртен} - \Theta_{савх}$ » та зменшення на 20% часу запізнення за каналами « $U_{рк} - \Theta_{савх}$ », « $U_{ов} - d_{савих}$ ».

Як видно з результатів аналізу САР на грубість, САР підвищеної динамічної точності є грубою, тому що при будь-яких поєднаннях параметрів ОУ дає перехідні процеси, що сходяться і які, до того ж, не виходять за рамки зони незначних відхилень.

## РОЗДІЛ 3

### ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ, НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

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

Особливою проблемою в сфері автоматизації є керування об'єктами, функції яких описуються нелінійними залежностями. При проектуванні систем керування для нелінійних об'єктів зазвичай використовуються такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація. Однак застосування цих методів у реальних технічних пристроях не завжди дозволяє досягнути бажаного ефекту. У цьому випадку для забезпечення збільшення ефективності можна використовувати систему керування з нечіткою логікою («fuzzylogic»).

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

Для технічних систем з випадковим характером впливу, що збурює, складністю розробки динамічної моделі, її високим порядком, та нелінійним характером можна говорити про проблему керування в умовах невизначеності. Використання нечітких регуляторів забезпечує грубість і стабільну збіжність процесів, тому такий підхід слід вважати доцільним.

Таким чином, в умовах наявності істотних невизначеностей у статичних і динамічних характеристиках сушильної камери як об'єкта керування представляються труднощі в формалізації завдань синтезу

регуляторів системи керування. У зв'язку з цим доцільним (актуальним) є застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

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

Для забезпечення актуальності застосування системи керування побудованої на базі апарату нечіткої логіки для сушильної камери необхідно перейти до нелінійної моделі об'єкта керування. Таким чином, моделі каналів регулювання об'єкта керування, що розглядається, повинні характеризуватись несуттєво нелінійною статичною характеристикою.

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

Для підтвердження актуальності застосування системи керування, побудованої на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого у даній роботі об'єкта керування, необхідно перейти до його нелінійної моделі. Таким чином, моделі каналів регулювання розглянутого об'єкта керування повинні характеризуватися несуттєво нелінійною статичною характеристикою.

Спочатку представимо несуттєво нелінійну статичну характеристику об'єкта керування для переходу від лінійної моделі об'єкта керування до первісної нелінійної. На рисунку 3.1 представлена екстремальна статична характеристика об'єкта керування для того, щоб переконатися у присутності нелінійних властивостей об'єкта, та в яких саме каналах регулювання.

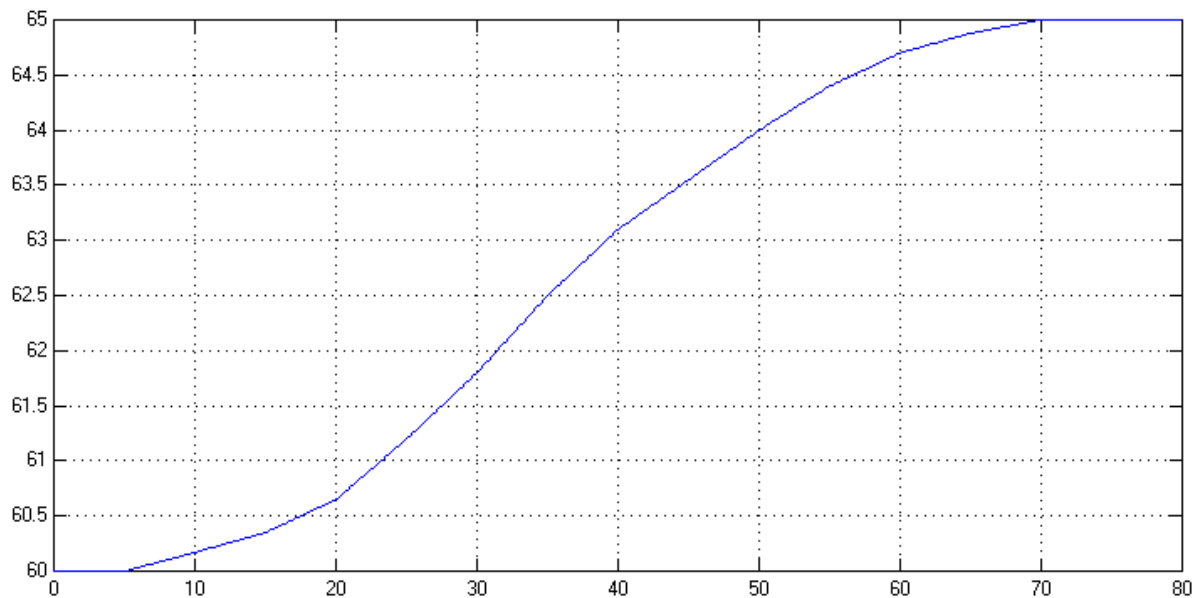


Рис. 3.1 – Статична характеристика об'єкта керування за каналом «керуюча дія  $u_{rтен}$  – температура сушильного агента,  $C^{\circ}$ »

Для представлення нелінійної моделі об'єкта керування необхідно до відповідних моделей каналів регулювання додати відповідні нелінійні ланки. Нелінійність необхідно реалізувати за допомогою включення блоку LookUpTable у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта керування з додатковими блоками LookUpTable, які визначають нелінійність статичних характеристик, представлена на рисунку 3.2.

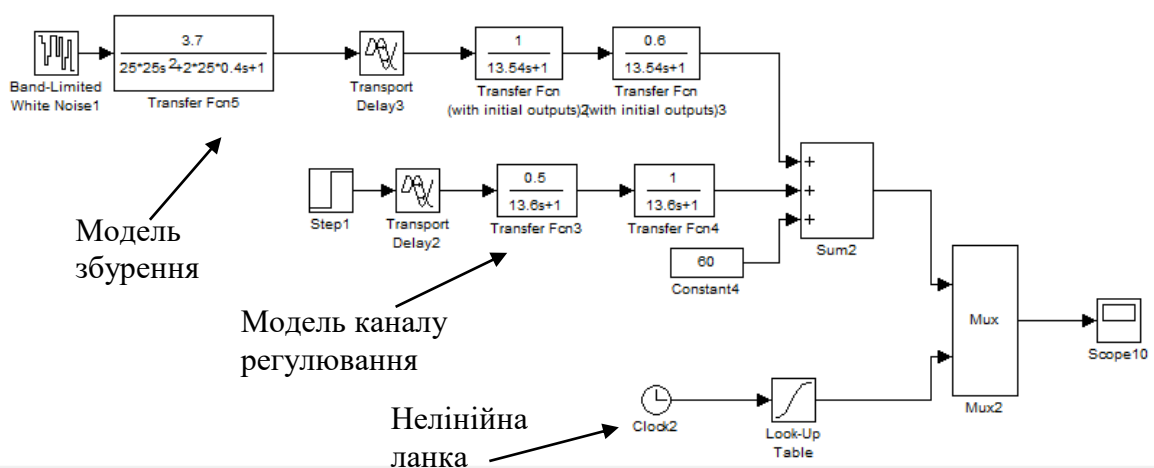


Рис. 3.2 – Структурна схема моделі об'єкта керування, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

У блоці LookupTable у табличній формі задається нелінійний зв'язок (залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

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

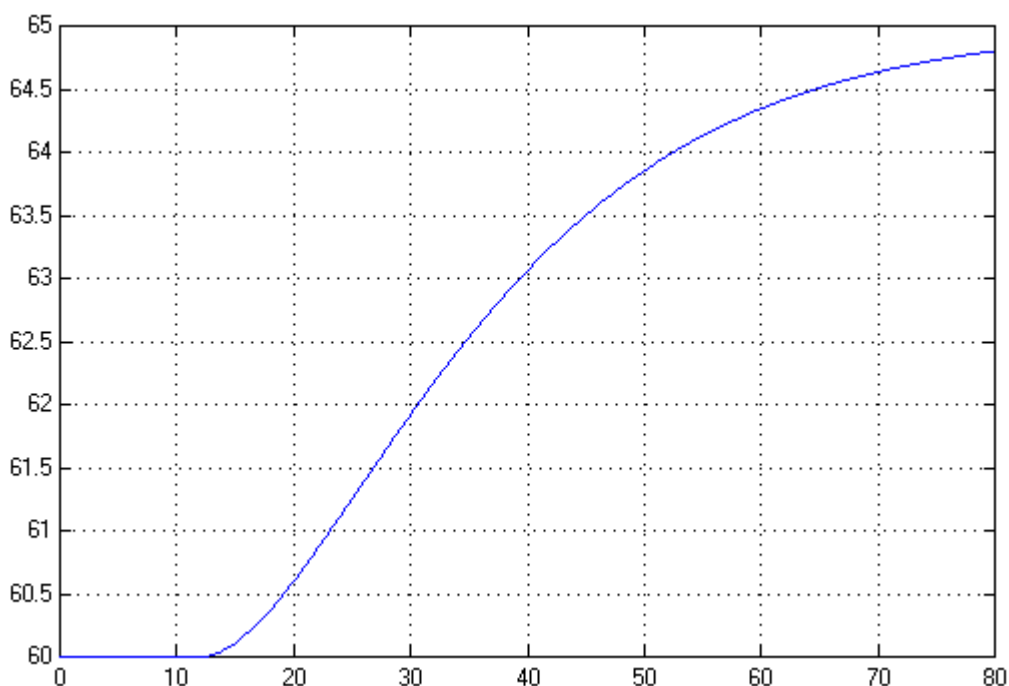


Рис. 3.3– Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

З рисунку 3.3 видно, що статична характеристика несуттєво нелінійна і схожа зі статичною характеристикою на рисунку 3.1, це дає можливість виконати синтез САК з традиційними ПІД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

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

У цій роботі було виконано параметричний синтез САК з традиційним – лінійним (П, ПІ, ПІД) регулятором для об'єкта з нелінійною статичною

характеристикою каналу регулювання. Слід зазначити що нелінійність статичної характеристики була реалізована у моделі, «гладкою» і несуттєвою для одержання стійких перехідних процесів при застосуванні традиційних – лінійних (П, ПІ, ПІД) регуляторів.

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

Для реалізації параметричної оптимізації регуляторів системи керування в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була розроблена схема моделювання системи керування з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів за інтегральним критерієм оптимальності.

Передаточна функція ПІД – регулятора має вигляд:

$$W_P(p) = K_P \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{ІЗ}p} + \frac{T_{ІІР}p}{0,2 \cdot T_{ІІР}p + 1} \right)$$

Розрахуємо початкові наближення параметрів алгоритму регулювання для кожного каналу ОК.

Розрахунок параметрів ПІД-регулятора температури:

$$K_P = \frac{1 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{1 \cdot 19,6}{0,5 \cdot 20,9} = 1,86 \frac{\%x.p.o.}{^{\circ}C}$$

$$T_{ІЗ} = 2 \cdot \tau_o = 2 \cdot 20,9 = 41,8c$$

$$T_{ІІР} = (0,5...1) \cdot \tau_o = 0,7 \cdot \tau_o = 0,7 \cdot 20,9 = 14,63$$

Розроблена схема моделювання системи керування з автоматичним оптимізатором у середовищі MATLAB\Simulink 5.2 представлена на рисунку 3.4.

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.

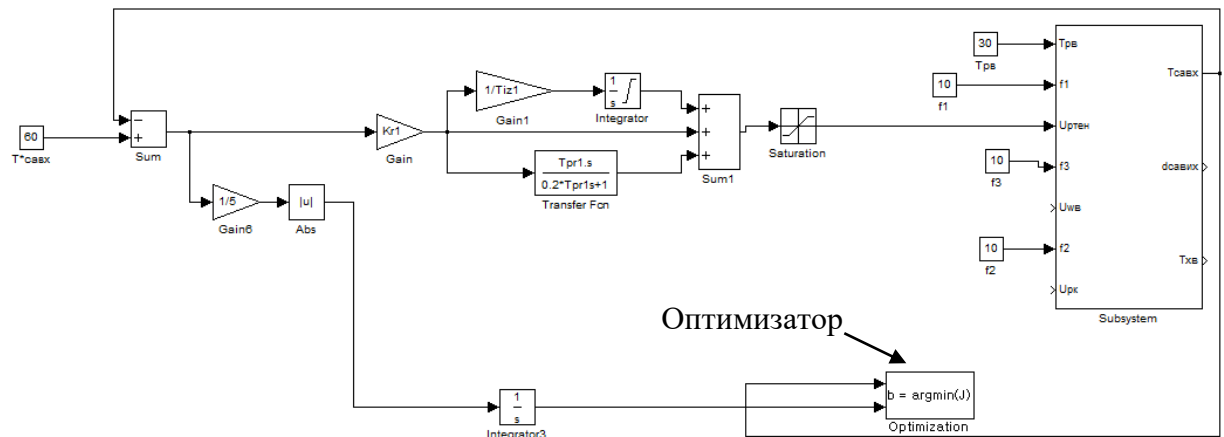
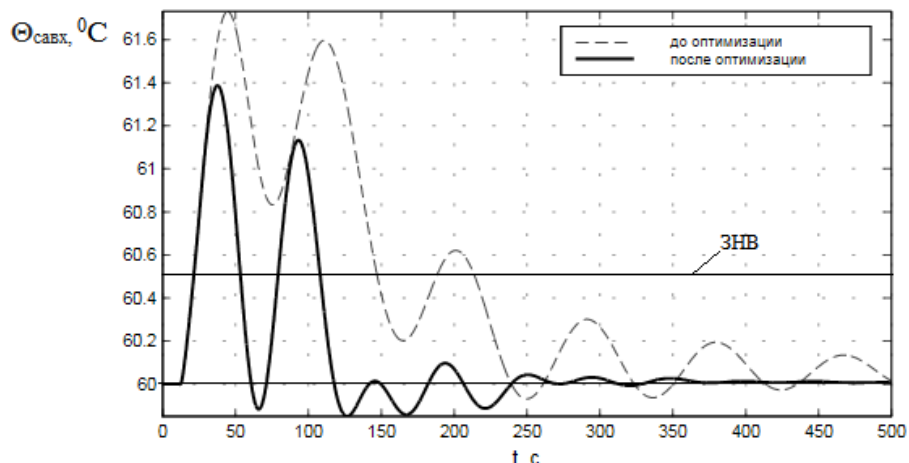


Рис. 3.4 – Результати оптимізації налаштувань ПІД – регулятора.

Первісні значення параметрів настроювання регулятора і відповідні оптимальні значення представлені на рисунку 3.5 у вікні результатів оптимізації. Також на рисунку 3.5 представлені відповідні графіки перехідних процесів, отримані до і після оптимізації системи. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання температури сушильного агенту помітно покращилася після оптимізації САК.



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr1	3.8986	1	1.86	100	до - 43.2736
Tiz1	26.0378	1	41.8	100	после - 16.1712
Tpr1	12.6204	1	14.63	100	после оптимизации.
					Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 147

Рис. 3.5 – Результати параметричної оптимізації значень параметрів регуляторів САК за каналом регулювання, що характеризуються нелінійною статичною характеристикою

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

Нечіткий регулятор являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків керування: фазифікації, логічного висновку та дефазифікації.

Також у роботі розглядаються особливості нечітких алгоритмів регулювання та відмінності динаміки автоматичних систем регулювання з класичними та нечіткими алгоритмами.

Застосування нечіткого-логічного регулятора (Fuzzy – регулятора) обумовлене наявністю нелінійного об'єкта керування, а також досить складних в описі статичних режимів роботи.

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

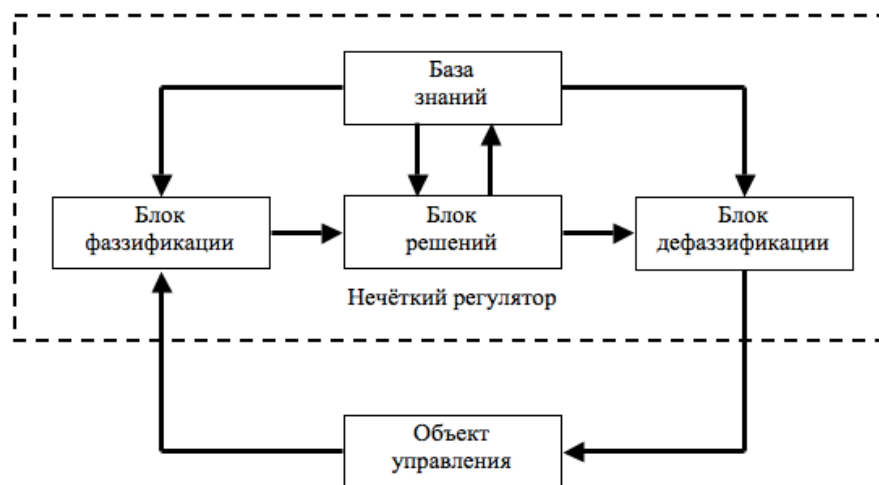


Рис. 3.6 – Спрощена структурна схема нечіткого логічного регулятора

Нечіткий логічний регулятор формується за трьома стадіями – фазифікація, логічний розв'язок, дефазифікація. Схему нечіткого регулятора, яка має місце в САК, представлено на рисунку 3.6. З погляду структури, дана схема нічим не відрізняється від схем класичних регуляторів і будується за класичними зразками.

До теперішнього часу запропоновано кілька алгоритмів нечіткого висновку (алгоритм Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено та ін.). У даній роботі розглянутий алгоритм Сугено.

Незалежно від вибору алгоритму, усі системи з нечіткою логікою функціонують по одному принципу: показання вимірювальних приладів фазифікуються, обробляються і дефазифікуються.

Розглядаючи структуру керування, можна визначити наступні п'ять правил функціонування НЛР у форматі «if – then»:

П1: Якщо помилка регулювання  $\psi$  належить нечіткій множині «велика позитивна» і приріст помилки регулювання  $\Delta\Psi$  належить множині «приблизно нульова», то приріст керуючої дії  $\Delta u_1 = w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_2 = w_2$ ;

П2: Якщо помилка регулювання  $\psi$  належить нечіткій множині «велика негативна» і приріст помилки регулювання  $\Delta\Psi$  належить множині «приблизно нульова», то приріст керуючої дії  $\Delta u_1 = -w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_2 = -w_2$ ;

П3: Якщо помилка регулювання  $\psi$  належить нечіткій множині «приблизно нульова» і приріст помилки регулювання  $\Delta\Psi$  належить множині «приблизно нульова», то приріст керуючої дії  $\Delta u_1 = 0$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_2 = 0$ ;

П4: Якщо помилка регулювання  $\psi$  належить нечіткій множині «приблизно нульова» і приріст помилки регулювання  $\Delta\Psi$  належить множині «велика позитивна», то приріст керуючої дії  $\Delta u_1 = w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_2 = w_2$ ;

П5: Якщо помилка регулювання  $\psi$  належить нечіткій множині «приблизно нульова» і приріст помилки регулювання  $\Delta\Psi$  належить множині «велика негативна», то приріст керуючої дії  $\Delta u_1 = -w_1$ , а приріст керуючої дії  $\Delta u_2 = -w_2$ ;

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

На рисунку 3.7 зображено вікно налаштування `fis`-файлу для нечіткого регулятора температури сушильного агента.

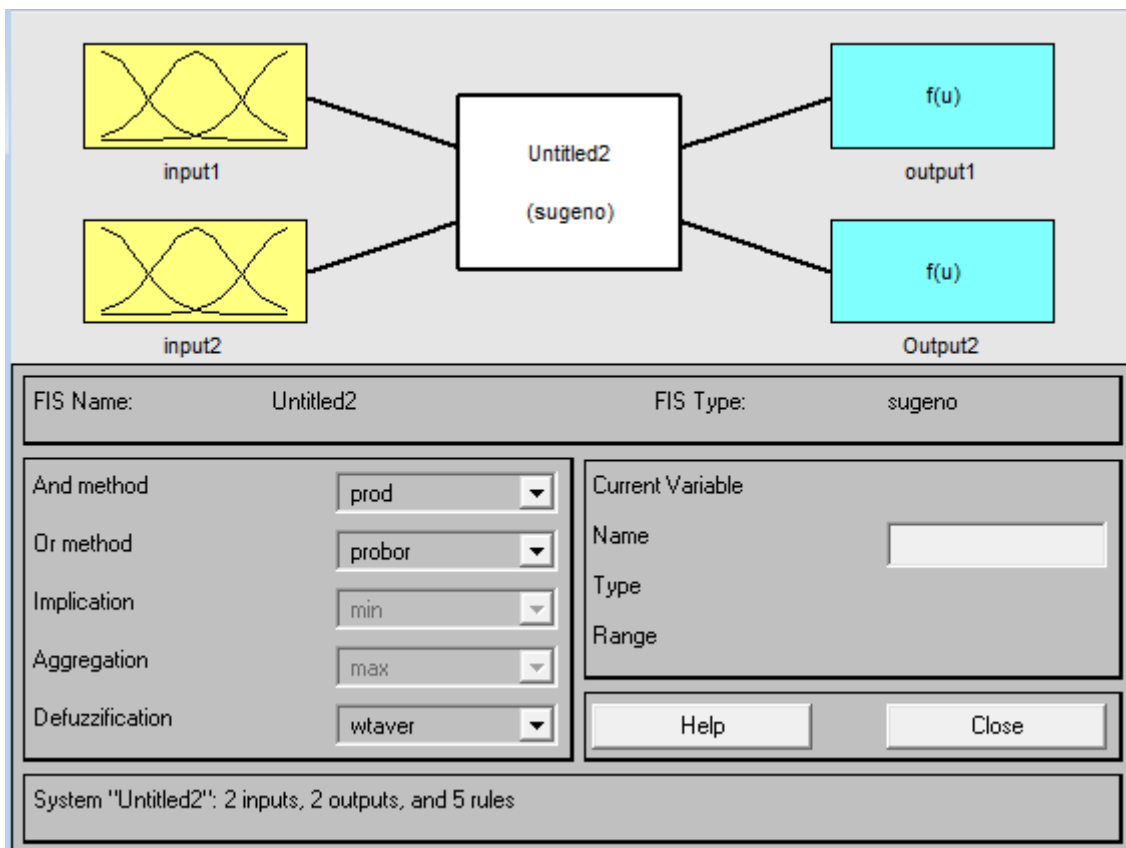


Рис. 3.7 – Вікно налаштування `fis`-файлу для нечіткого регулятора температури сушильного агента.

На вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (`error`) та приріст помилки регулювання (`prerror`). Для змінної `error` задаємо три трикутні функції приналежності «`trimf`». Це проста і найбільш часто застосовувана функція приналежності. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичної 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;

b – найбільш можливе значення змінної.

На рисунку 3.8 зображено вікно налаштування функції приналежності «error+», «error-» та «error0».

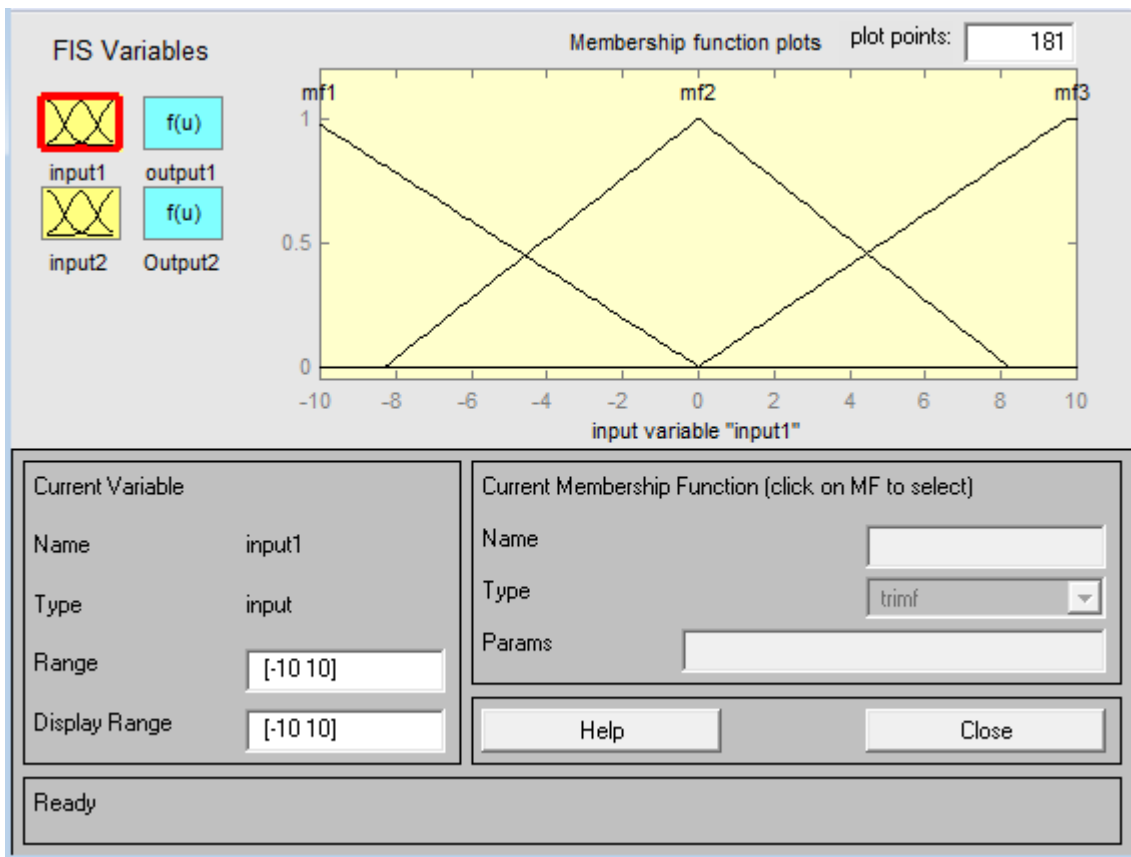


Рис. 3.8 – Вікно налаштування функцій приналежності «error+», «error-» та «error0».

«error+» – функція приналежності вхідної змінної (помилки регулювання) до множини «велика позитивна». «error-» – функція приналежності вхідної змінної (помилки регулювання) до множини «велика негативна». «error0» – функція приналежності вхідної змінної (помилки регулювання) до множини «приблизно нульова». «error-»  $\in [-16.59 -16.59 -6.4 0.064]$ ; «error+»  $\in [-0.048 6.352 14.4 14.4]$ ; «error0»  $\in [-2 0 2]$ .

На рисунку 3.9 зображено вікно налаштування функції приналежності «prirerror+», «prirerror-» та «prirerror0».

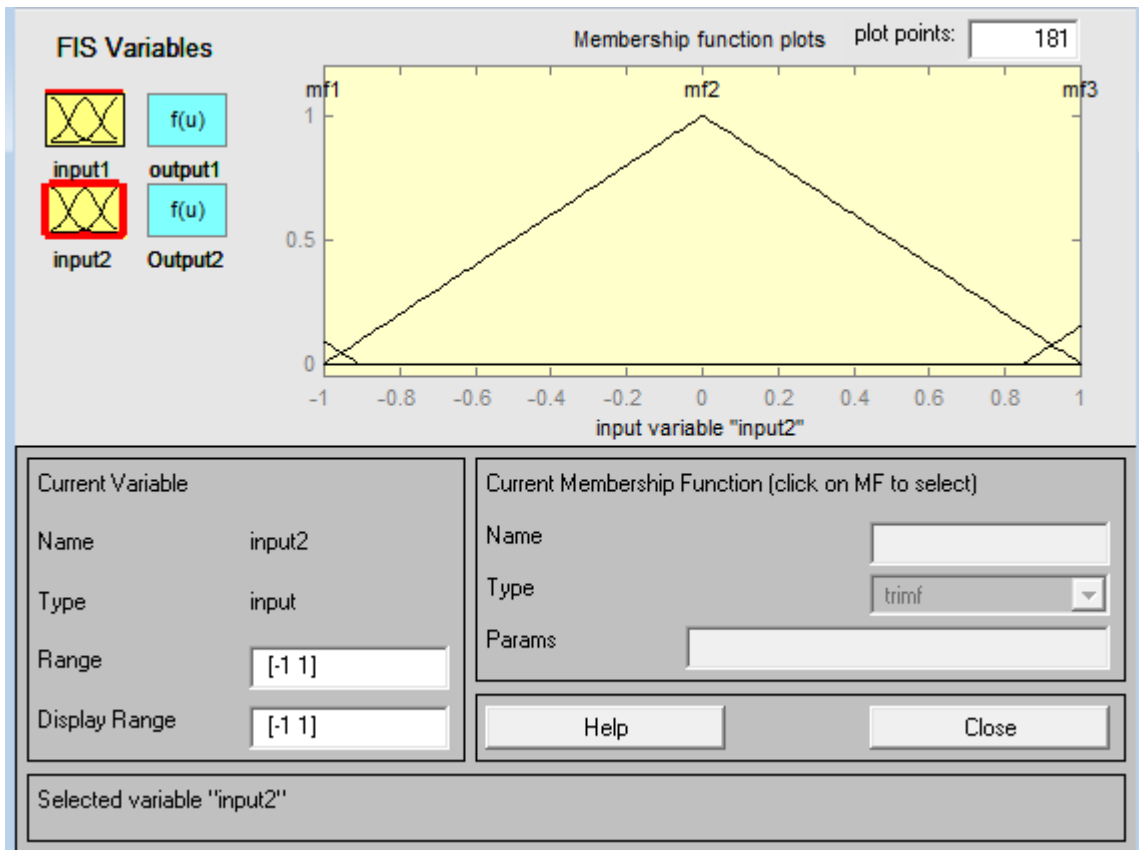


Рис. 3.9 – Вікно налаштування функцій приналежності «prirerror+», «prirerror-» та «prirerror0».

«prirerror+» – функція приналежності вхідної змінної (приріст помилки регулювання) до множини «велика позитивна». «prirerror-» – функція приналежності вхідної змінної (приріст помилки регулювання) до множини «велика негативна». «prirerror0» – функція приналежності вхідної змінної (приріст помилки регулювання) до множини «приблизно нульова». «prirerror-»  $\in [-2.84 -1.84 -0.836]$ ; «prirerror+»  $\in [0.735 1.74 2.74]$ ; «error0»  $\in [-1 0 1]$ .

Варто відмітити, що «prirerror+» та «prirerror-» це Z – подібні функції приналежності. Функція «zmf» задає Z-подібну двопараметричну функцію приналежності. Це незростаюча функція приналежності, що приймає значення від 1 до 0. Параметри функції приналежності визначають інтервал, усередині якого функція нелінійно зменшується від 0 до 1.

Виходами нашого нечіткого регулятора будуть «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати І-складову, а «output2» – ІІ-складову.

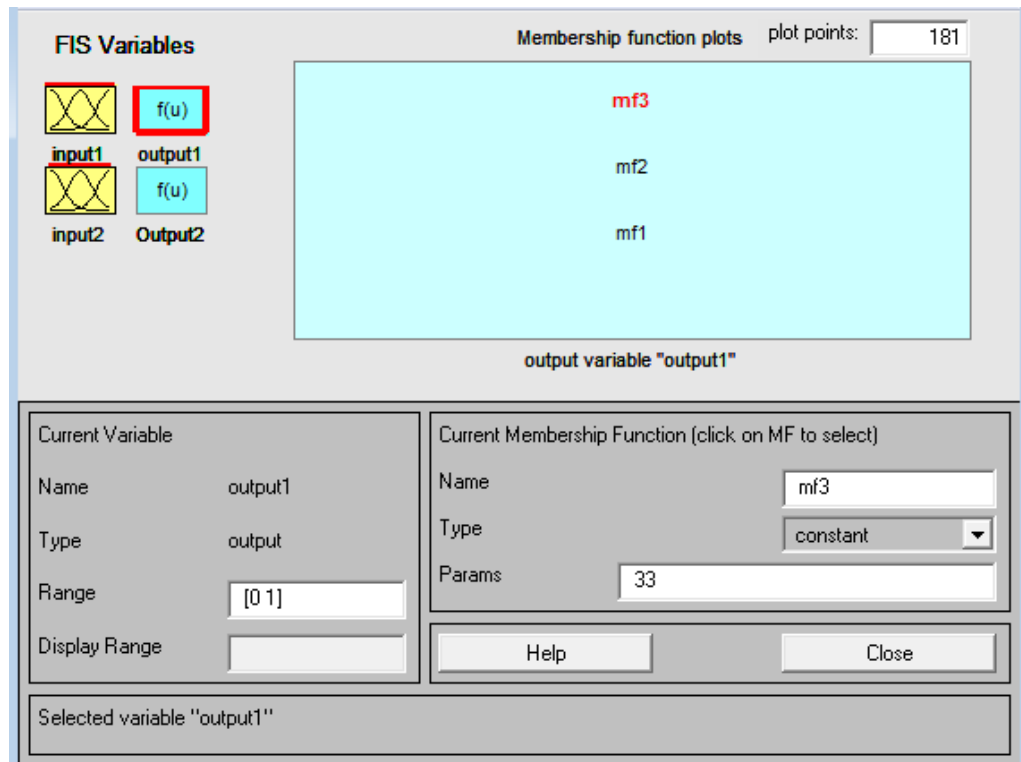


Рис. 3.10 – Вікно налаштування виходу «output1».  $Mf3 = 33$ ;  $mf2 = 0$ ;  $mf1 = -33$ .

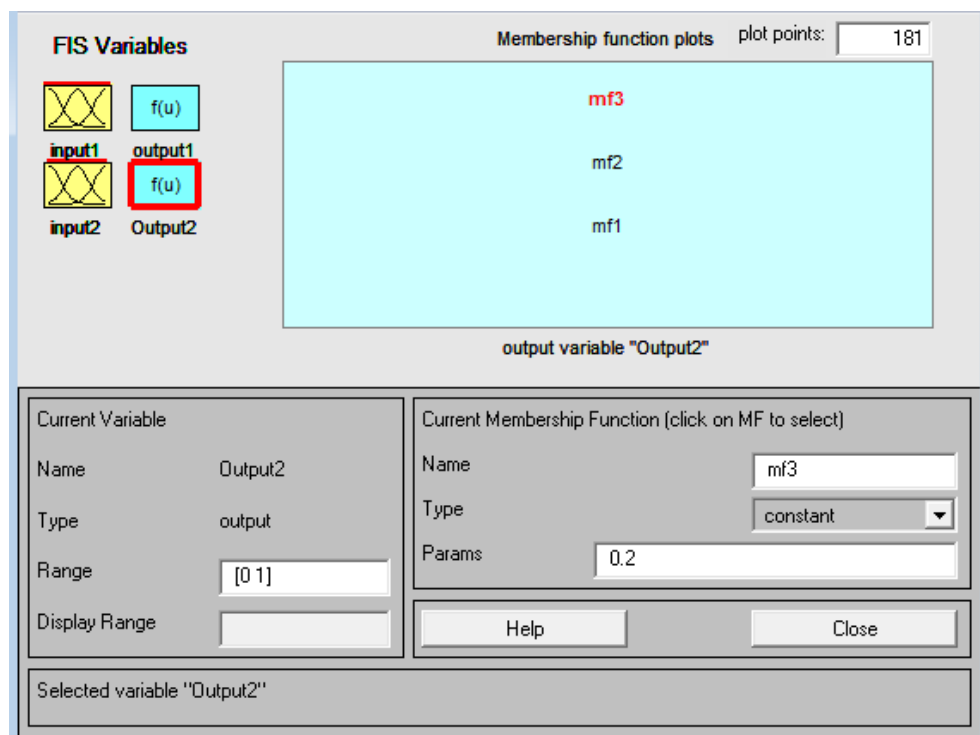


Рис. 3.11 – Вікно налаштування виходу «output2».  $Mf3 = 0.2$ ;  $mf2 = 0$ ;  $mf1 = -0.2$ .

Запишемо правила в алгоритм дефазифікації (рисунок 3.12).

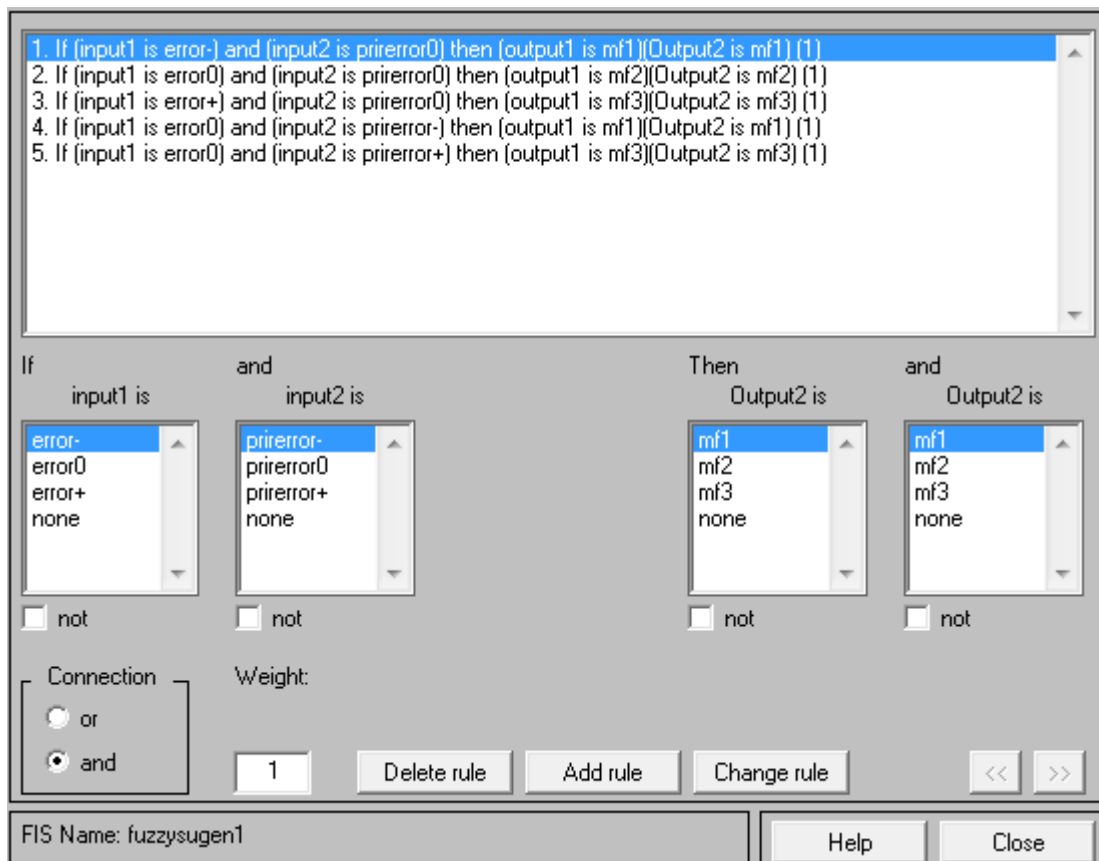


Рис. 3.12 – Вікно редагування бази правил нечіткого регулятора температури.

Для того, щоб запустити синтезований алгоритм необхідно перетягнути на робоче поле створення моделі SIMULINK «FuzzyLogikController» з стандартної бібліотеки, відкрити «FuzzyLogikController» та записати в запропоноване поле ім'я fis-файлу. На останок необхідно з головного вікна налаштування fis-файлу вибрати File / SavetoWorkspace.

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САК з нечітким регулятором, фрагмент якої представлений на рисунку 3.13. З рисунку 3.13 видно, що керуюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

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

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

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

Зібравши схему, що відображена на рисунку 3.13 можна запускати моделювання.

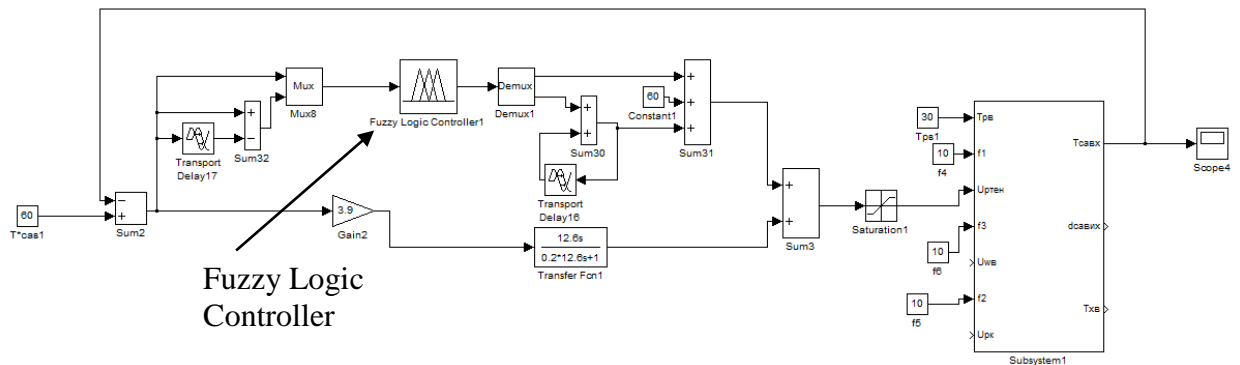


Рис. 3.13 – Схема моделювання САР з нечітким логічним регулятором

### 3.5. Порівняльний аналіз САР температури сушильного агента з традиційним ПІД регулятором та з нечітким регулятором FuzzyLogicController.

Зробивши моделювання САР з нечітким регулятором були отримані графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування при детермінованому впливі, що збурює. Для порівняльного аналізу також був представлений відповідний графік перехідного процесу у САР з традиційним ПІД-регулятором.

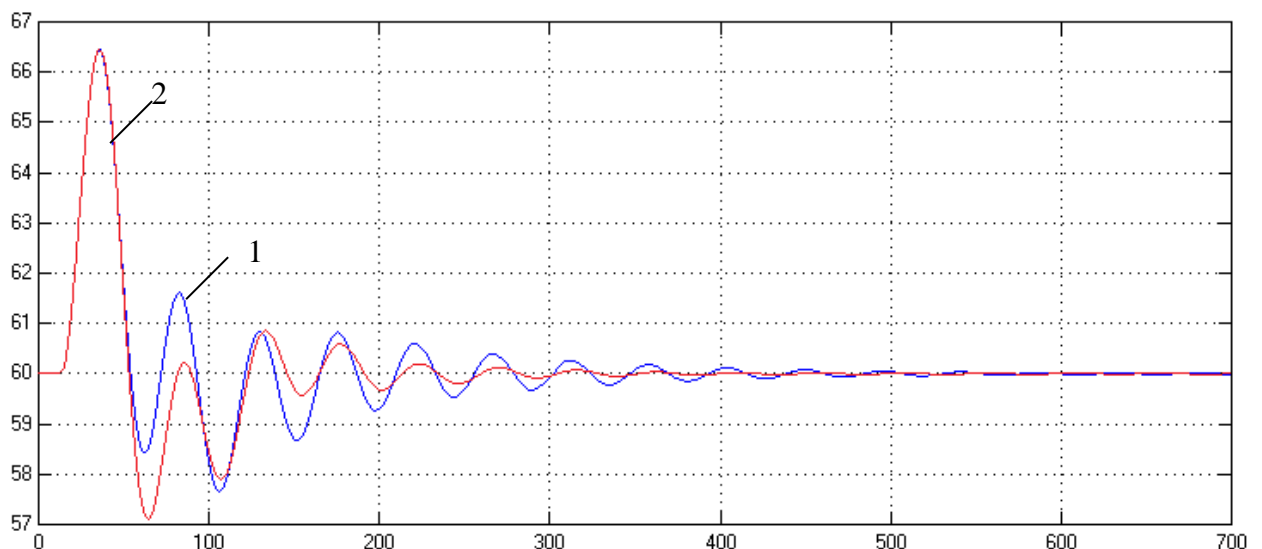


Рис. 3.14 – Графіки перехідних процесів, що отримані в результаті моделювання різних САР, графік 1 – перехідний процес в САР з традиційним ПІД – регулятором; графік 2 – перехідний процес в САР з нечітким регулятором

Можно зробити висновок, що за якістю регулювання різні САР функціонують майже ідентично, як з традиційним, так і з нечітким регулятором. Це отримано завдяки корегуванню параметрів нечіткого регулятора, а також завдяки порівнянню функціонування САК з нечітким регулятором і САР з традиційним регулятором.

3.6. Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів керування.

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; керування, кодування і декодування інформації; апроксимація залежностей і ін.

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

Штучна нейронна мережа як нейрорегулятор здійснює нелінійне перетворення вхідного сигналу і формування керуючого 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.

У системах керування технологічними процесами до регуляторів висуваються високі вимоги. Регулятор повинен забезпечити необхідний порядок астатизма, задану величину перерегулювання, задану смугу пропускання, необхідні статичні і динамічні характеристики. Із-за нелінійної характеристики електродвигунів, особливо електродвигунів змінного струму та деяких теплових процесів теоретичний розрахунок параметрів регуляторів виявляється скрутним і часом досить наближеним, що негативно позначається на роботі системи.

У свою чергу, нейронні мережі можуть легко навчатися нелінійним характеристикам, що відображено в ряді публікацій і тому застосування нейрорегулятора на базі нейронних мереж дозволить досягти більш високих результатів в керування.

Нейронна мережа - це послідовність нейронів, з'єднаних між собою синапсами. Структура нейронної мережі прийшла в світ програмування прямо з біології.

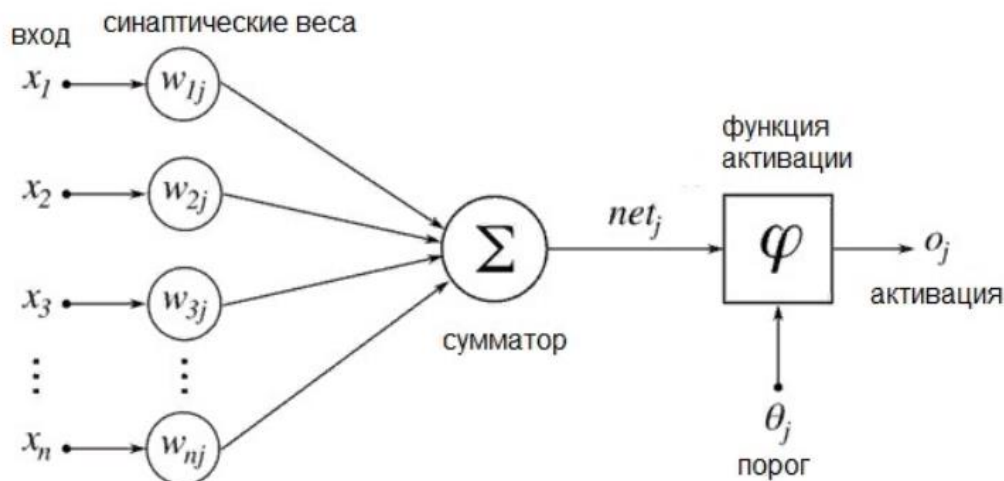


Рис. 3.15 – Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

Сигнали, що поступили на входи множаться на свої ваги. Сигнал першого входу  $x_1$  множиться на відповідний запис вага  $w_1$ . У підсумку

отримуємо  $x_1w_1$  і так до  $n$ -ого входу. У підсумку на останній вхід отримуємо  $x_nw_n$ .

Тепер всі множення передаються в суматор. Уже виходячи з його назви можна зрозуміти, що він робить. Він просто підсумовує всі вхідні сигнали, помножені на відповідні ваги:

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

Просто так подавати виважену суму на вихід досить безглуздо. Нейрон повинен якось обробити її і сформувати адекватний вихідний сигнал. Саме для цих цілей і використовують функцію активації.

Вона перетворює зважену суму в якесь число, яке і є виходом нейрона (вихід нейрона позначимо змінної  $out$ ). В нашому випадку буде використано функцію «гіперболічний тангенс» ( $tansig$ ). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від  $-1$  до  $1$ ), що може бути корисним для ряду мереж. Функція записується в такий спосіб:

$$out(net) = \tanh\left(\frac{net}{a}\right)$$

У даній вище формулі параметр  $a$  також визначає ступінь крутизни графіка цієї функції. А ось так виглядає графік цієї функції (рис. 3.16):

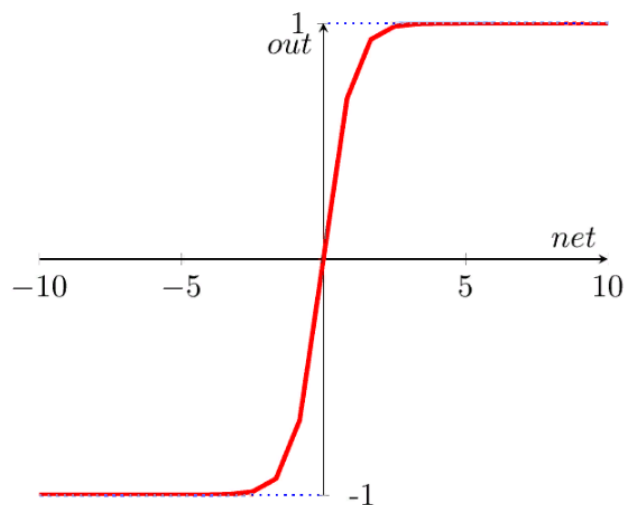


Рис. 3.16 – Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

В одношарових нейронних мережах сигнали з вхідного шару відразу подаються на вихідний шар. Він проводить необхідні обчислення, результати яких відразу подаються на виходи.

На рисунку 3.17 зображена одношарова нейронна мережа.

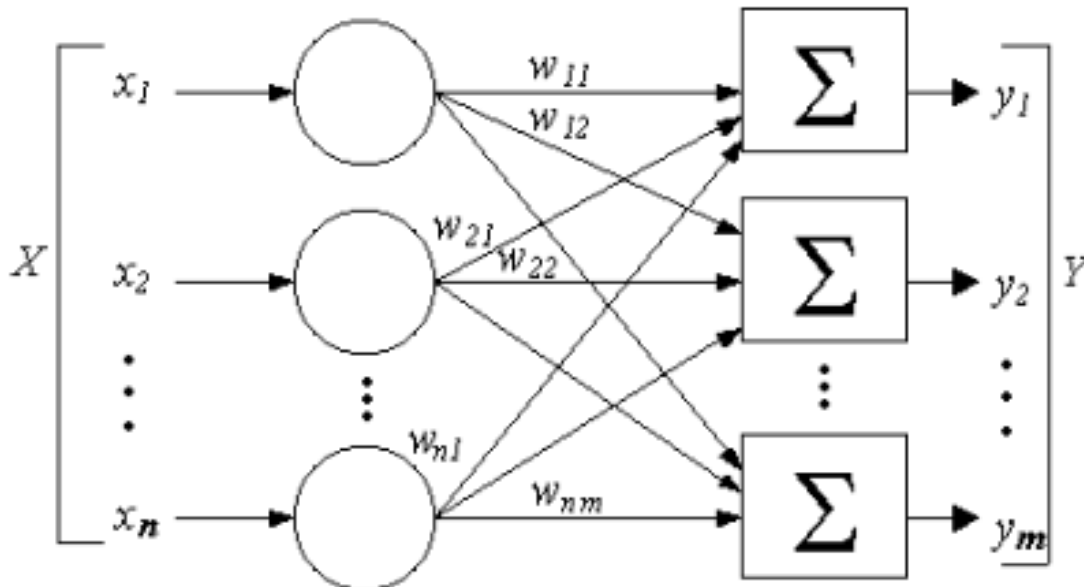


Рис. 3.17 – Одношарова нейронна мережа.

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

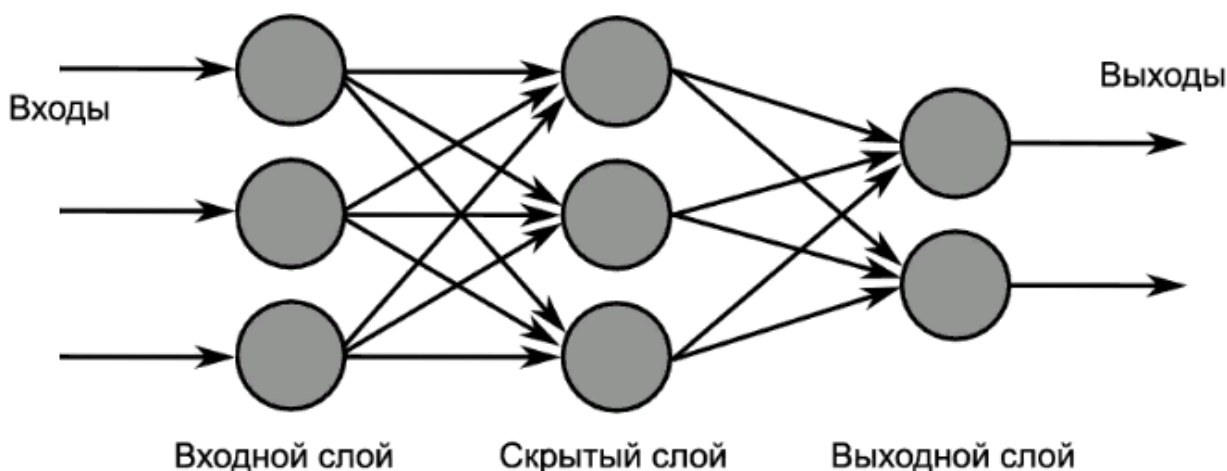


Рис. 3.18 – Багатошарова нейронна мережа.

Наш ПІІ - нейрорегулятор буде багатозаровою (два шари) нейронною мережею з прямою передачею сигналу і зворотнім поширенням помилки. На входи нейромережі буде подаватись сигнал помилки регулювання, а на виході з неї матимемо сигнал керуючої дії.

На рисунку 3.19 зображено загальну структуру НМ, що виконує роль І або ІІ складової нейрорегулятора.

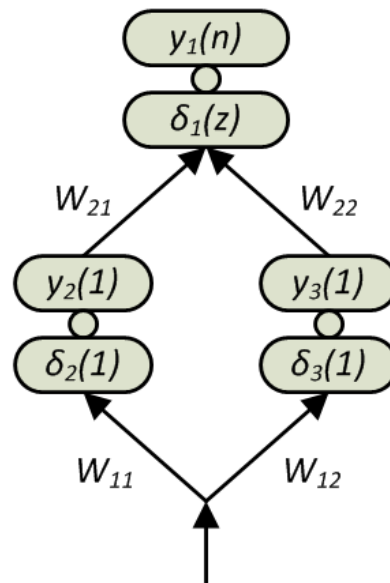


Рис. 3.19 – Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

### 3.7. Розробка моделі САК з нейрорегулятором.

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 керуючого 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 3.1). Дані, представлені у таблиці 3.1, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

Таблиця 3.1 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	I	u	$\Delta u$
1	-15	-0,33	-0,2
2	-10	-0,33	-0,2
3	-7	-0,268	-0,16
4	-3	-0,104	-0,06
5	-1	-0,033	-0,02
6	0	0	0
7	1	0,0346	0,02
8	3	0,108	0,07
9	7	0,274	0,17
10	10	0,33	0,2
11	15	0,33	0,2

Для того щоб згенерувати нейронну мережу скористаємося середою імітаційного моделювання Matlab. Будемо генерувати окремо I та II складову. Створимо файл в якому запишемо наступний виконавчий код:

```

>> P=[-15 -10 -7 -3 -1 0 1 3 7 10 15];
>> t=[-0.33 -0.33 -0.268 -0.104 -0.033 0 0.0346 0.108 0.274 0.33 0.33];
>> net=newff([-15 15], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
>> net.trainParam.epochs=50;
>> net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/50, MSE 0.770242/0, Gradient 8.56779/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/50, MSE 0.000247772/0, Gradient 3.57452e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/50, MSE 0.000247744/0, Gradient 6.8324e-006/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

>> a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7
-0.3300 -0.3267 -0.2629 -0.1260 -0.0398 0.0048 0.0488

Columns 8 through 11
0.1307 0.2532 0.3076 0.3520

>> gensim(net)

```

Рис. 3.20 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворюватиме II – складову нейрорегулятора температури сушильного агента.

```

» P=[-15 -10 -7 -3 -1 0 1 3 7 10 15];
» t=[-0.2 -0.2 -0.16 -0.06 -0.02 0 0.02 0.07 0.17 0.2 0.2];
» net=newff([-15 15], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=50;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/50, MSE 0.63589/0, Gradient 8.46034/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/50, MSE 0.000972457/0, Gradient 0.0353582/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/50, MSE 6.47313e-006/0, Gradient 1.01373e-006/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

-0.2033 -0.1949 -0.1622 -0.0593 -0.0188 -0.0010 0.0188

Columns 8 through 11

0.0707 0.1711 0.1961 0.2028

» gensim(net)
»

```

Рис. 3.21 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворюватиме I – складову нейрорегулятора температури сушильного агента.

В даному виконавчому коді  $p$  – вхід нейромережі (помилка регулювання),  $t$  – відповідне значення виходу нейромережі. На третій строчці задаємо діапазон, кількість шарів нейромережі та функцію активації. Також тут задаємо кількість епох, тренуємо нейромережу та генеруємо.

Характеристика точності навчання показана на рисунках 3.22 – 3.23.

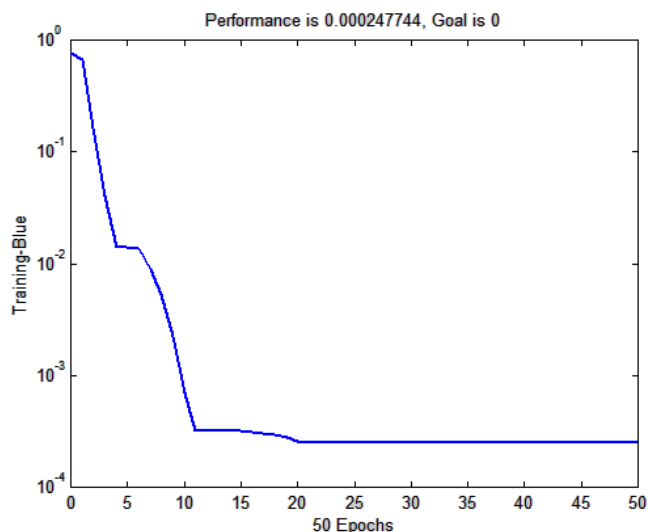


Рис. 3.22 – Характеристика точності навчання II – складової нейрорегулятора температури сушильного агента.

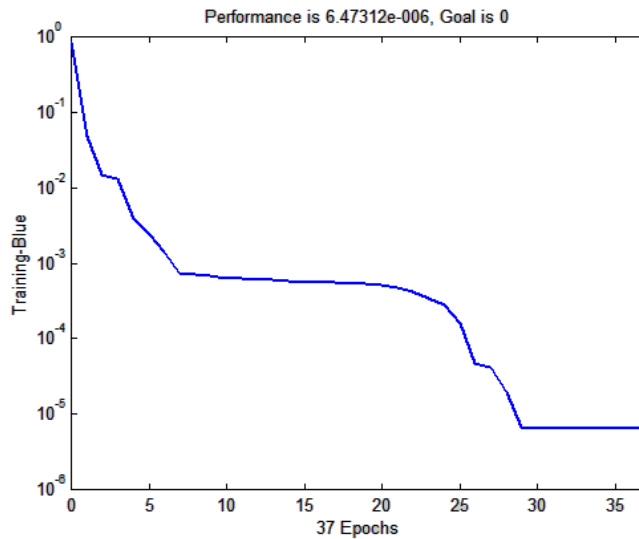


Рис. 3.23 – Характеристика точності навчання I – складової нейрорегулятора температури сушильного агента.

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі.

Бажані значення II – складової: -0.33; -0.33; -0.268; -0.104; -0.033; 0; 0.0346; 0.108; 0.274; 0.33; 0.33;

Фактичні значення II – складової: -0.33; -0.3267; -0.2629; -0.1260; -0.0398; 0.0048; 0.0488; 0.1307; 0.2532; 0.3076; 0.3520;

Бажані значення I – складової: -0.2; -0.2; -0.16; -0.06; -0.02; 0; 0.02; 0.07; 0.17; 0.2; 0.2

Фактичні значення I – складової: -0.2033; -0.1949; -0.1622; -0.0593; -0.0188; -0.0010; 0.0188; 0.0707; 0.1711; 0.1961; 0.2028;

Розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для і-тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі.

Згідно 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 між-нейронного з'єднання  $n+1$  шару;  $\delta_1(n + 1)$  – похибка  $i$ -того нейрону  $n+1$  шару.

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

Розрахунок помилки вихідного шару:

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

$$\delta_i(n) = (0.33(n) - 0.3520) \cdot 0.3520(n) \cdot (1 - 0.3520(n))$$

$$\delta_i(n) = 0.0050181$$

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

$$\delta_2(1) = y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) =$$

$$= -0.8417 * (1 - (-0.8417)) * (1.4741006935811081) * 0.00000296 = -0.00000084$$

$$\delta_3(1) = y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) =$$

$$= 0.8584 * (1 - 0.8584) * (1.5764637692786396) * 0.00000296 = 0.000000567$$



нейронних з'єднань першого-вхідного шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась при таких же умовах, які були при оптимізації САР з традиційним ПІД регулятором. Таким чином, інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний відповідно таким же, як при оптимізації САК з традиційним ПІД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була визначена модель САР з нейрорегулятором і параметричним оптимізатором, фрагмент структурної схеми якої відображено на рисунку 3.25.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги між-нейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленому рисунку 3.26. На рисунку 3.27 представлений результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації при визначеному інтегральному критерії якості роботи системи.

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

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

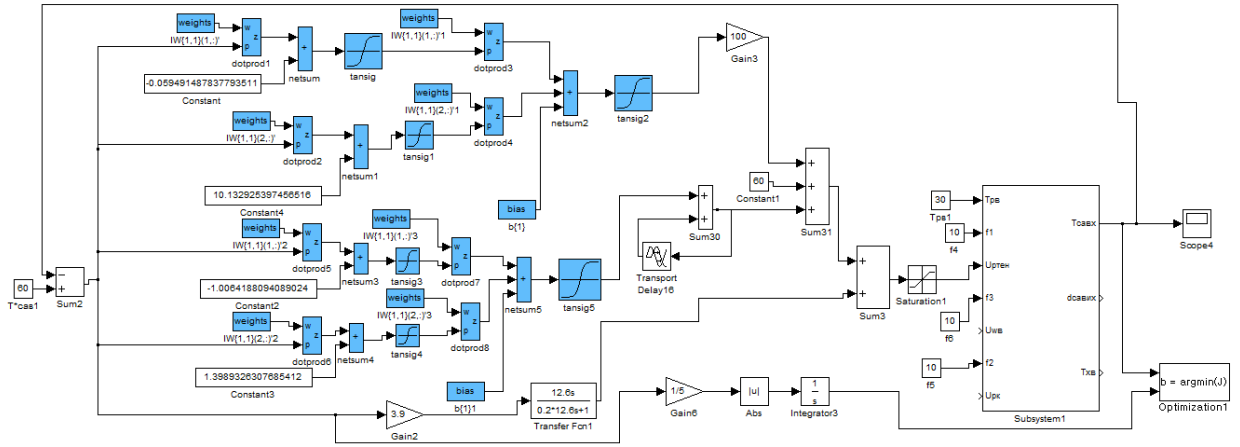


Рис. 3.25– САР з нейрорегулятором та оптимізатором

Конкретизация задачи оптимального параметрического синтеза (ОПС)	
<input type="checkbox"/>	ОПС в условиях параметрической неопределенности ОУ.
<input checked="" type="checkbox"/>	ОПС при фиксированных параметрах ОУ.
Параметры объекта управления (ОУ)	
Имена параметров:	K0 tau T0
Номинальные значения:	0.075 10.5 3.1
Нижние значения диапазонов:	0.8*3.4 0.8*2.5 0.8*12
Верхние значения диапазонов:	1.2*3.4 1.2*2.5 1.2
Оптимизируемые параметры (аргументы)	
Имена параметров:	K1 K2 K3 K4
Начальные приближения:	0.15785097997596242 0.
Нижние ограничения:	0.01 0.01 0.01 0.01
Верхние ограничения:	500 500 500 500
Условия оптимизации (Симплекс метод Нелдера-Мида)	
Максимальное количество шагов процедуры оптимизации:	1000
Минимальное приращение аргументов:	0.01
Минимально значимое приращение критерия:	0.001
Визуализация результатов	
Количество графиков:	1
Имена переменных отображаемых на графиках:	y

Рис. 3.26–Налаштування оптимізатора

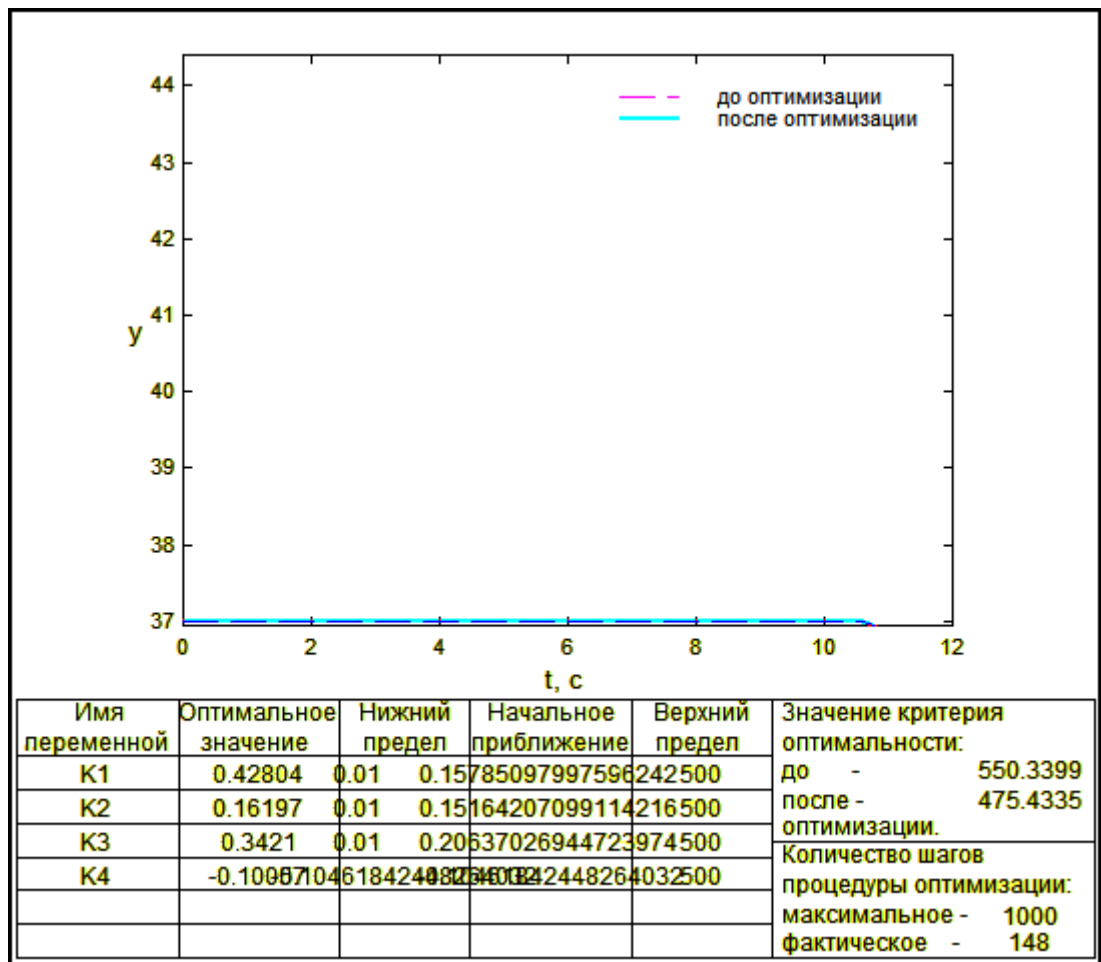


Рис. 3.27– Результат оптимізації

Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САР. Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, представлені на рисунку 3.28. З рисунку 3.28 можливо побачити, що система не втрачає стійкість при різних параметрах у діапазоні +/- 20 %, які відзначені у тому ж вікні перевірки системи на грубість. Отже синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролера для практичного застосування його у відповідній системі керування.



Рис.3.28 – Вікно результатів перевірки системи керування з нейрорегулятором на грубість

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

На заключному етапі розробки САР був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САР за виходом системи на номінальний режим функціонування, що показані на рисунку 3.29. Також у результаті моделювання були отримані відповідні графіки перехідних процесів при детермінованих та випадкових впливах, що збурюють, які відображені на рисунку 3.30. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування значно менший при САР з регулятором, що представлений на базі штучної нейронної мережі, але при випадкових впливах, що збурюють, різниця в якості регулювання різних САК практично непомітна.

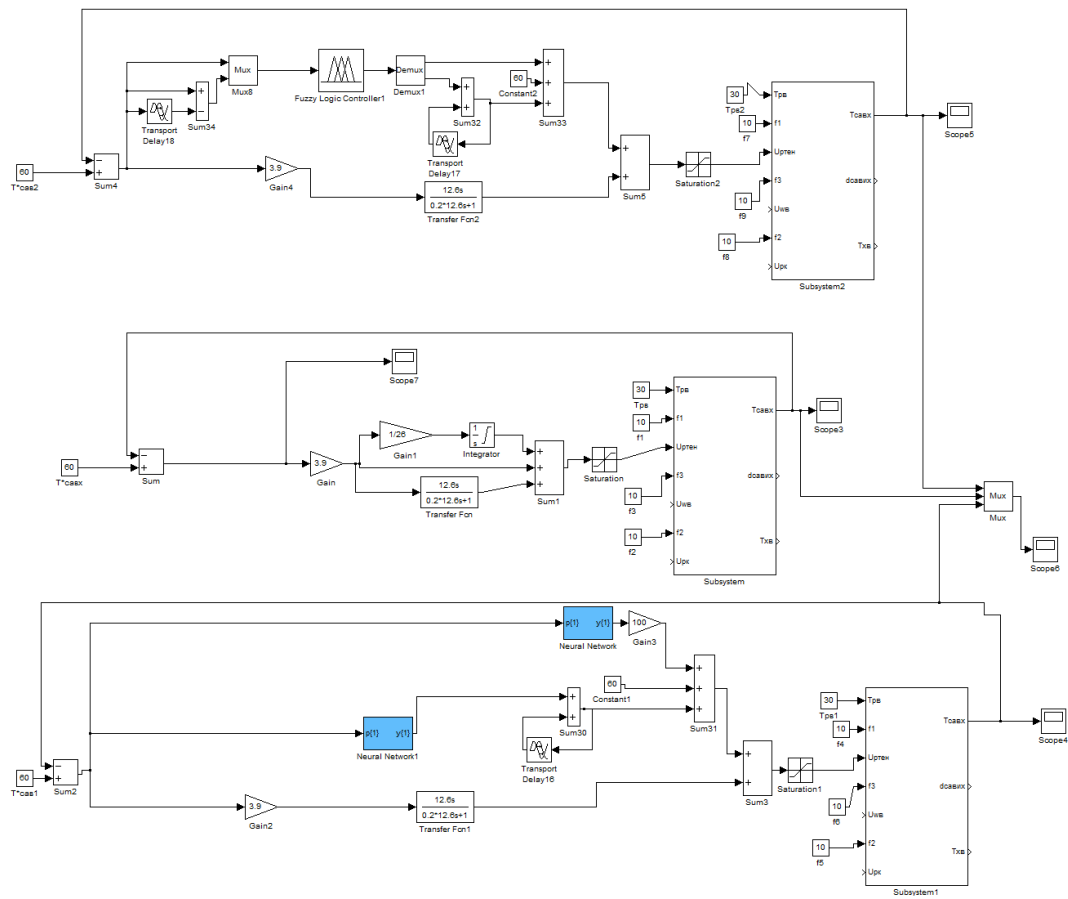


Рис. 3.29 –Схема з усіма САР

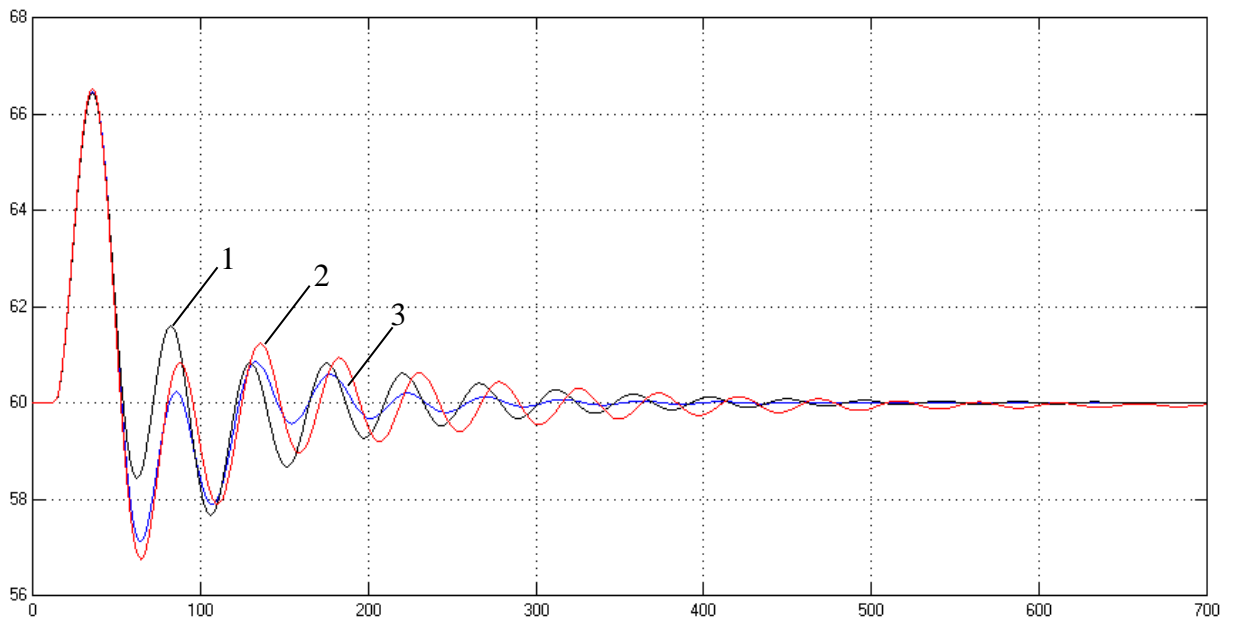


Рис. 3.30. Графіки перехідних процесів, отриманих в результаті моделювання різних САР, графік 1 – перехідний процес в САР з нечітким регулятором; графік 2 – перехідний процес в САР з традиційним ПІД-регулятором; графік 3 – перехідний процес в САР з регулятором побудованим на базі штучної нейронної мережі;

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

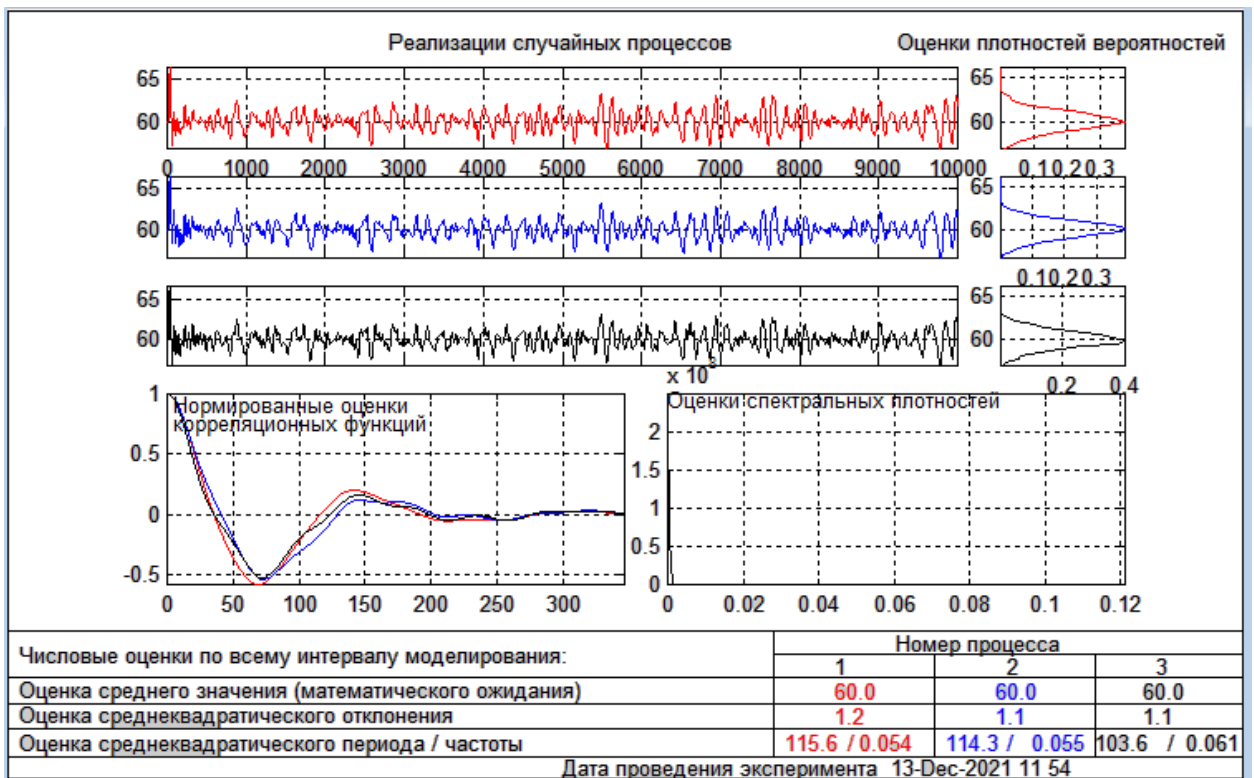


Рис. 3.31. Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

З рисунку 3.31 можливо побачити, що засередньо квадратичним відхиленням САР з традиційним ПД-регулятором і САР з нейронним регулятором практично функціонують ідентично, а САР з нечітким регулятором незначно гірше. В кінцевому випадку показники функціонування різних САР за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.2.

З таблиці 3.2 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САР з нейронним регулятором незначно краще функціонує,

ніж інші розглянуті САР. САР з традиційним ПД-регулятором і САР з нечітким регулятором функціонують за якістю регулювання практично ідентично при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Таблиця 3.2– Показники якості регулювання різних САР

САР	САР з традиційним ПД-регулятором	САР з нечітким регулятором	САР з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈400	≈400	≈300
Максимальне динамічне відхилення	≈6	≈6	≈6
Інтегральний показник	323	377	347
Середнє квадратичне відхилення	0,054	0,055	0,061

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

### 3.10. Висновки

У процесі виконання розділу було проведено дослідження функцій системи автоматичного регулювання САР з нейрорегулятором. Використання нейрорегулятора доречно, коли об'єкт є суттєво нелінійним і нестационарним, саме за цієї умови отримуємо якість регулювання вищою, ніж для типових

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

Розглянута САР з нейронним регулятором гірше справляється з різними видами збурень, ніж базова САР, що впливає з перехідних характеристик.

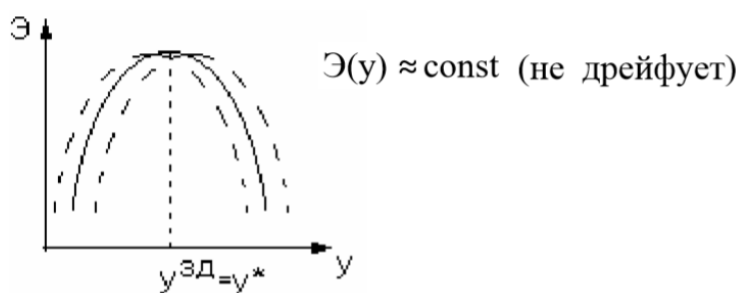
## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СТРУКТУРИ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

#### 4.1. Опис загальних принципів побудови системи керування.

У системах регулювання задані 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 вироджує завдання регулювання. Разом проте існують об'єкти, для котрих 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 САК 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 керування 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:

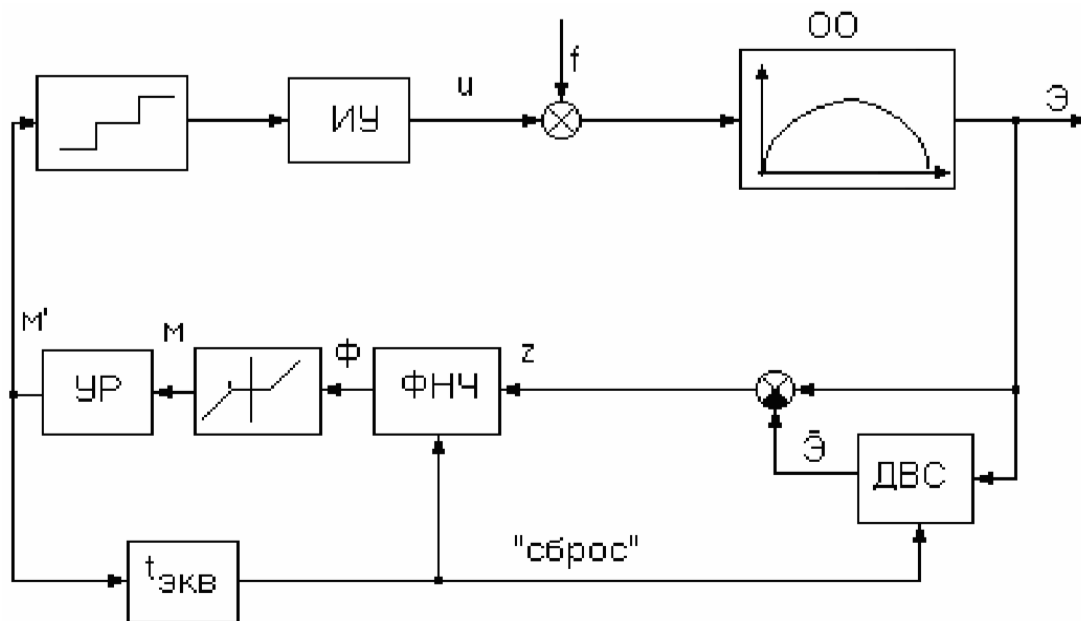


Рис. 4.1. Структурна схема САО із запам'ятовуванням екстремуму (де ДВС – детектор зростаючого сигналу; УР – пристрій реверсу, ФНЧ – фільтр низьких частот).

ДВС «пропускає» через себе тільки зростаюче значення Э. У тому випадку, якщо Э починає зменшуватися, то значення Э на виході детектора буде наступним:

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

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 керує. Реверс відбувається щоразу при зміні знаку  $M$ . Розглянемо часові діаграми роботи системи.

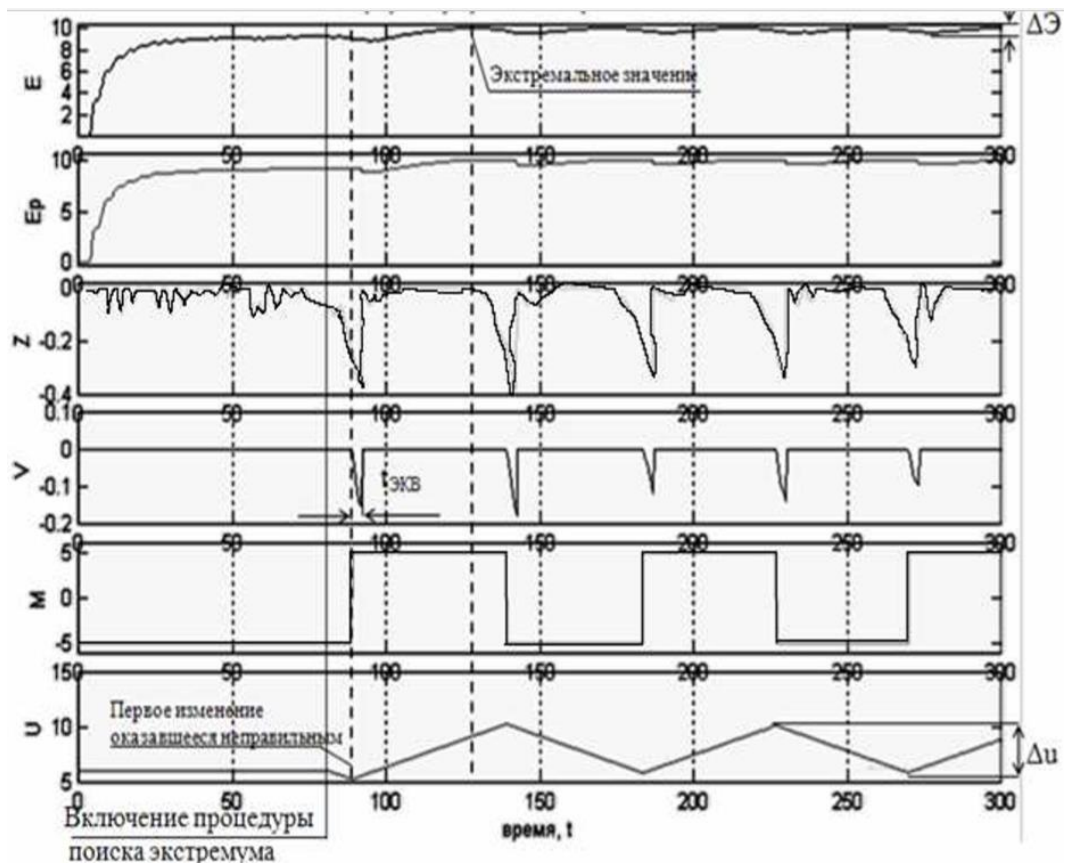


Рис 4.2. Часові діаграми моделювання САО (відображення процедури пошуку екстремуму у часі).

У момент реверсу через ланку запізнення (його значення відповідає еквівалентному запізненню в каналі керування) 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  $\varphi$  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  $Z$ ,  $\Phi$  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  $\Phi$  почнуть зростати по модулю. Коли  $\Phi$  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 безпервною зміною  $u$ . При цьому ця зміна забезпечується зміною  $u$  генерується самої СЕР (самим алгоритмом роботи СЕР). Вона працює у режимі автоколиваний.

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 коливаний 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 коливаний  $u$ , 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 коливаний для кращого потрапляння в  $\mathcal{E}^*$ .

#### 4.2. Розробка структурної схеми САК та опис принципу її дії.

На основі САР базової структури розроблено структуру модернізованої САК, яка передбачає функцію екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Структурна схема САК представлена на рис.

4.3.

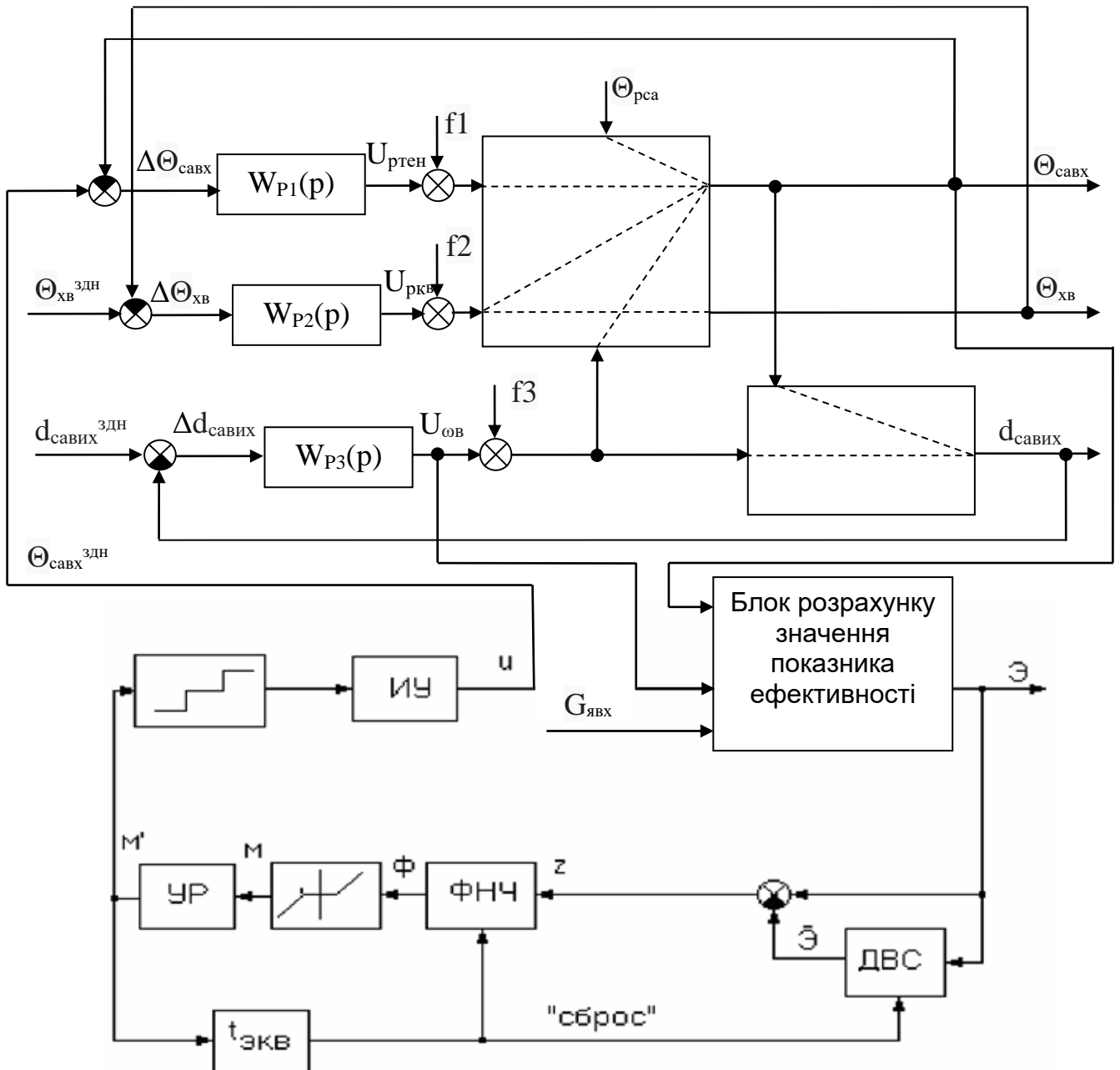


Рис. 4.3. Структурна схема модернізованої системи керування яка додатково реалізує функцію автоматичної оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму.

Показник ефективності  $\mathcal{E}$  розраховується в «Блок розрахунку значення

показника ефективності» на основі наступних виразів:

$$\Xi = G_{\text{явх}} / (P1 + P2 + P3 + P4 + P5)$$

де

$G_{\text{явх}}$  – поточна продуктивність установки, кг/год

$P1$  – потужність електронагрівача, кВт;

$P2$  – потужність вентилятору, кВт;

$P3$  – потужність циркуляційного насосу, кВт;

$P4$  – потужність ПЕД конвеєра, кВт;

$P5$  – потужність компресору теплового насосу, кВт.

Поточна продуктивність установки може розраховуватись у контурі стабілізації кінцевої вологи фруктів ( $M_{\text{я}}(t)$ ) за рахунок зміни швидкості конвеєра і таким чином залежить від поточного значення вологості  $G_{\text{явх}} = f(M_{\text{я}}(t))$ . Поточна продуктивність установки приблизно може розраховуватися за формулою:

$$G_{\text{явх}} = k1 * U1$$

де

$U1$  – керуюча дія швидкість конвеєра з фруктами, % х.р.о.

$k1$  – узгоджуючий коефіцієнт.

Потужності  $P2$ -  $P5$  приймемо за константи, а потужність  $P1$  електронагрівача буде формувати тепловий потік, який буде поступати до камери сушіння з сушильним агентом  $Q$ , кДж/с. Тепловий потік є функцією двох змінних і залежить від їх множення

$$Q = f(G_{\text{са}}(t), \Theta_{\text{савх}}(t)), \text{ кДж/с};$$

$G_{\text{са}}$  – витрата сушильного агента, м<sup>3</sup>/с ;

$\Theta_{\text{савх}}$  – температура сушильного агента на вході в сушильну камеру, задана технологією сушіння, °С.

При фіксованому значенні витрат сушильного агента тепловий потік буде залежати тільки від температури сушильного агента  $\Theta_{\text{савх}}(t)$ .

Спрощено показник ефективності  $\Xi$  можна розраховувати на основі виразу:

$$\Xi = G_{\text{явх}} / Q$$

Цей показник ефективності має екстремальний характер. При зростанні теплового потоку (температури сушильного агенту) швидкість видалення вологи з фруктів теж буде зростати, вологість плодоовочевої сировини на виході з сушарки  $M_{\text{я}}(t)$  буде знижуватися і система стабілізації вологості буде збільшувати продуктивність сушарки  $U_1$ . Тобто критерій буде збільшуватися. При подальшому збільшені температури сушильного агенту можлива ситуація коли швидкість видалення вологи з фруктів перестане зростати і може поступово знижуватися, що призведе до стабілізації продуктивності сушарки або її зменшення. Тобто показник якості спочатку буде зростати а потім буде зменшувати своє значення.

Задача системи, що представлена на рис.2.3 знаходити оптимальне значення температури сушильного агенту ( $\Theta_{\text{савх}}^{\text{здн}}$ ), при якому обраний показник ефективності  $\Xi$  буде приймати максимальне значення.

У розробленій системі передбачено регулювання температури сушильного агенту на вході в сушильну камеру, вологовмісту сушильного агенту на виході з сушильної камери, температури води, що надходить до утилізатора. 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 сушильного агенту. Алгоритм роботи системи описано у п.п. 4.1.2 та передбачає її роботу в режимі автоколиваний. Керуюча дія змінюється таким чином, що поточне значення показника ефективності коливається в області екстремального значення.

4.3. Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів керування.

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

Настроювальні параметри екстремальної системи регулювання із запам'ятовуванням екстремуму задаватимемо на основі динамічних властивостей каналу  $U_{\text{ртен}}-\Theta_{\text{савх}}(t)$  та абсолютних значень показника ефективності (для розрахунку настроювальних параметром зони нечутливості).

4.4. Доопрацювання математичної моделі ОР до моделі ОО на вирішення завдання оптимального керування.

Для побудови екстремальної системи оптимізації с запам'ятовуванням екстремуму модель ОР була дороблена. Розроблена раніше система регулювання не передбачає контуру стабілізації вологості плодоовочевої сировини на виході з сушарки та не відображає нелінійні властивості об'єкта регулювання, тому існуюча модель ОК була доповнена спрощеною моделлю показника ефективності. Модель ефективності представлена наступною нелінійною квадратичною залежністю:

$$\Theta = a * (\Theta_{\text{савх}} - \Theta_{\text{савх\_e}})^2 + \Theta_{\text{e}}$$

де

$\Theta_{\text{савх\_e}}$  і  $\Theta_{\text{e}}$  – координати екстремуму,

$a$  – коефіцієнт крутості параболи.

Повна схема моделювання об'єкту оптимізації представлена на рис. 4.4.

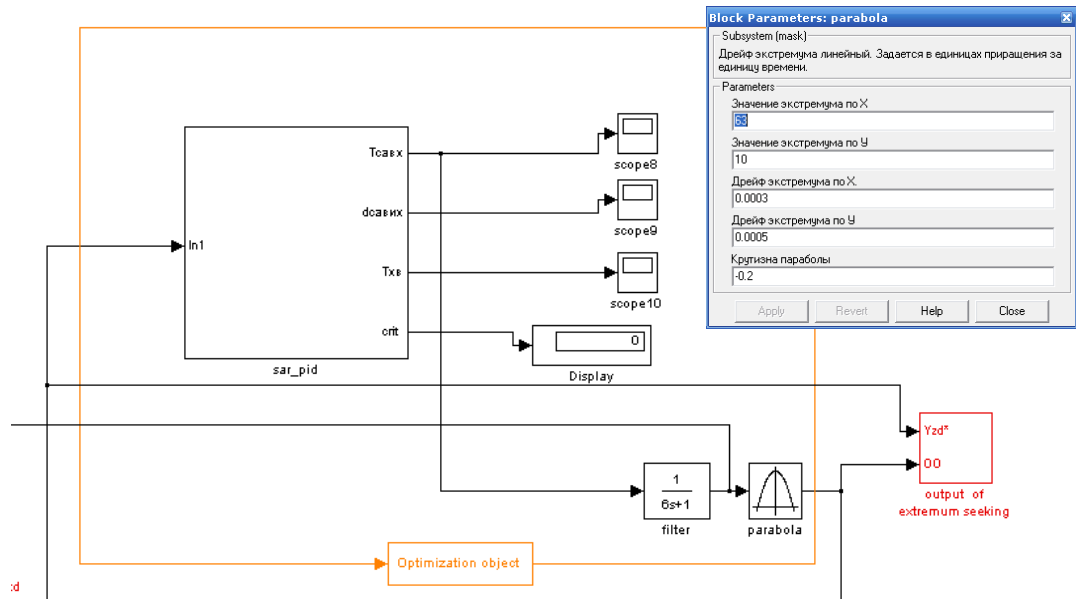


Рис. 4.4. Загальний вид схеми моделювання об'єкту оптимізації (ОО).

#### 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.

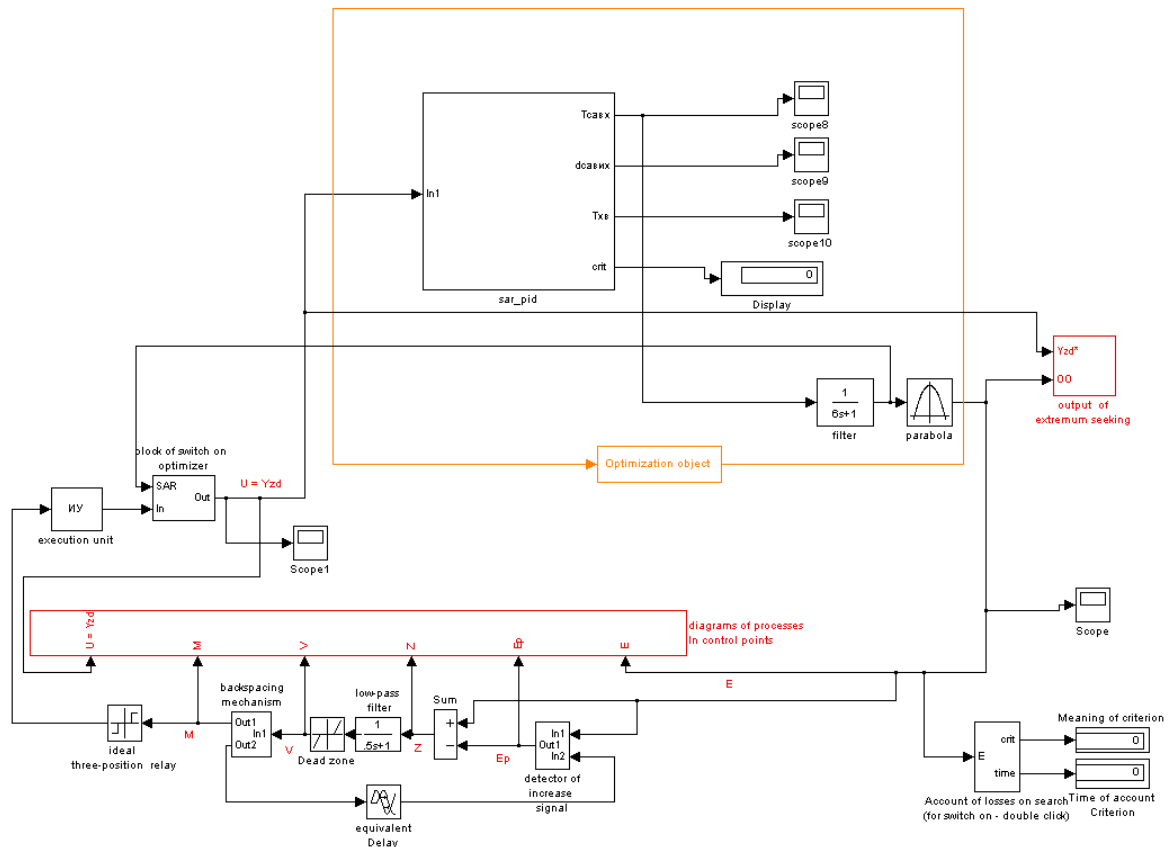


Рис. 4.5. Загальний вигляд схеми моделювання екстремальної системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму.

На рис. 4.6 та 4.7 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.

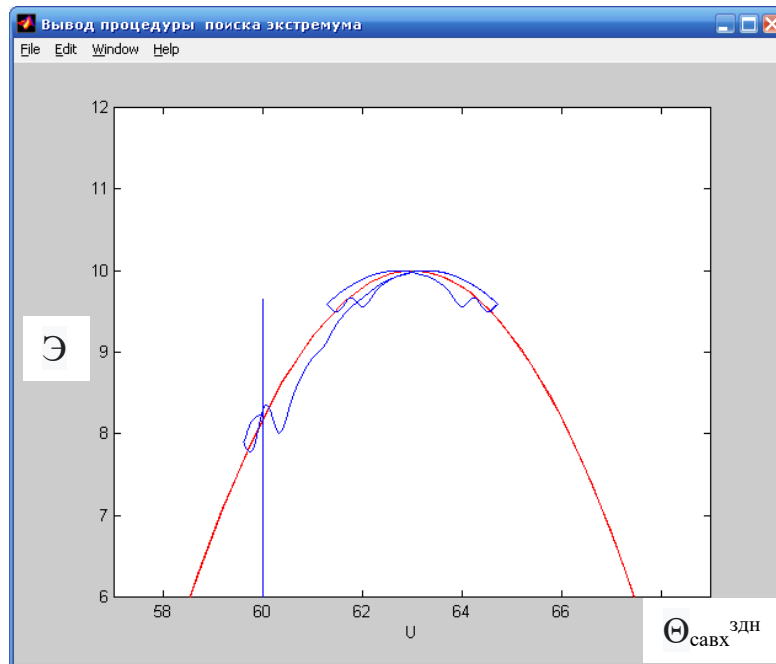


Рис. 4.6. Графік зміни показника ефективності  $\mathcal{E}(\Theta_{\text{савх}}^{\text{ЗДН}})$  (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації.

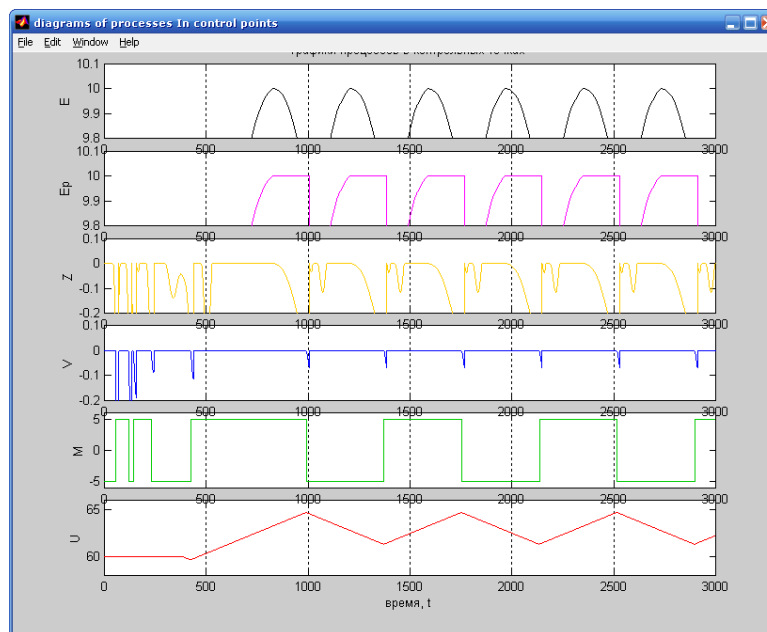


Рис. 4.7. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації.

На рис. 4.8 – 4.13 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.

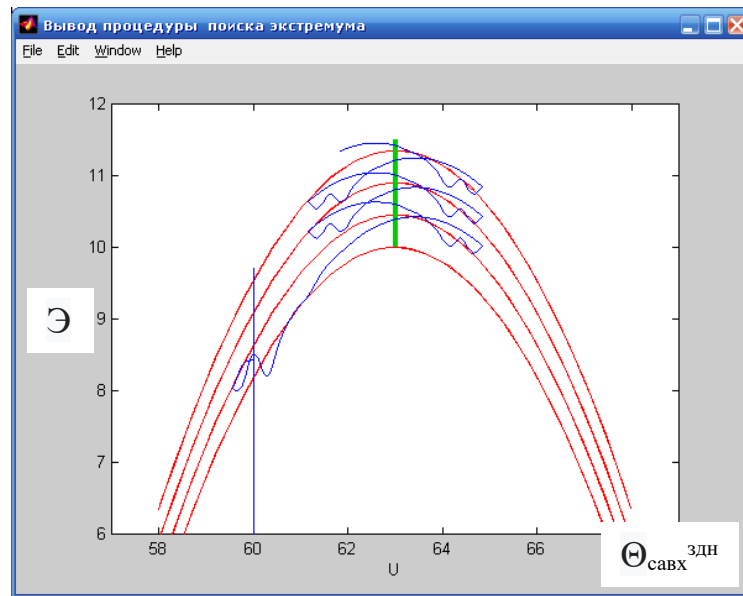


Рис. 4.8. Графік зміни показника ефективності  $\xi(\Theta_{\text{савх}}^{\text{ЗДН}})$  (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

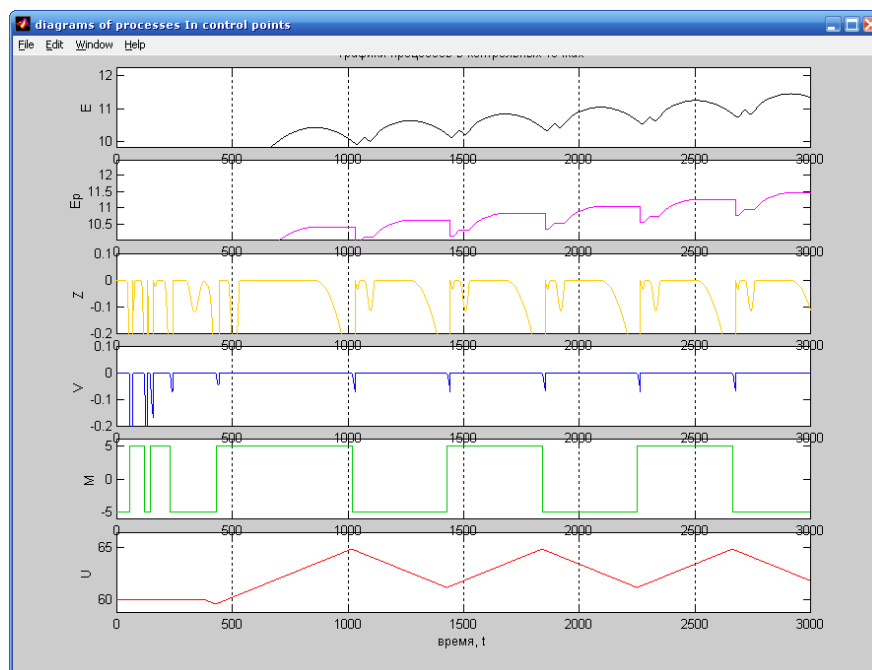


Рис. 4.9. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

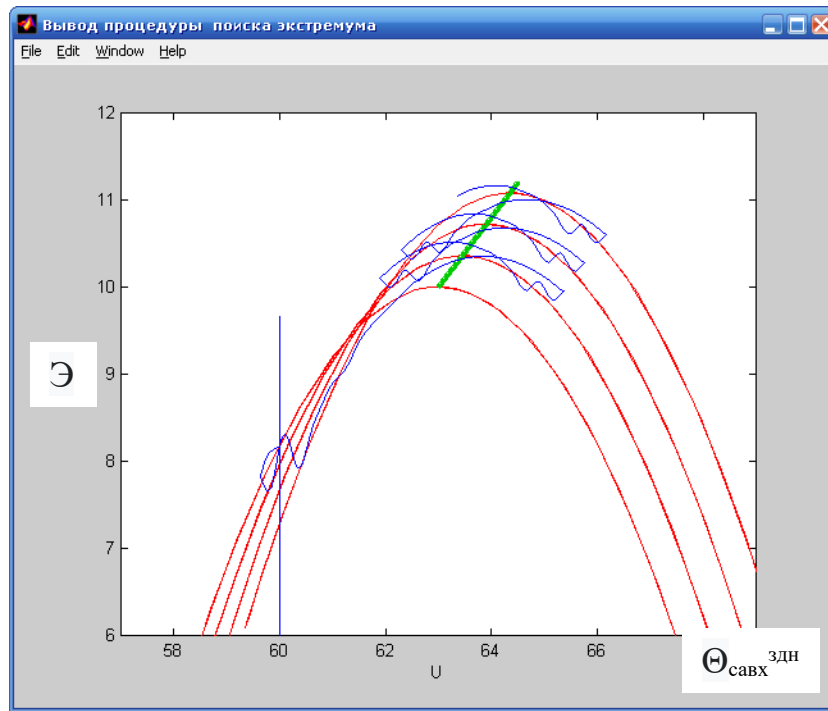


Рис. 4.10. Графік зміни показника ефективності  $\Theta(\Theta_{\text{савх}}^{\text{зДН}})$  (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

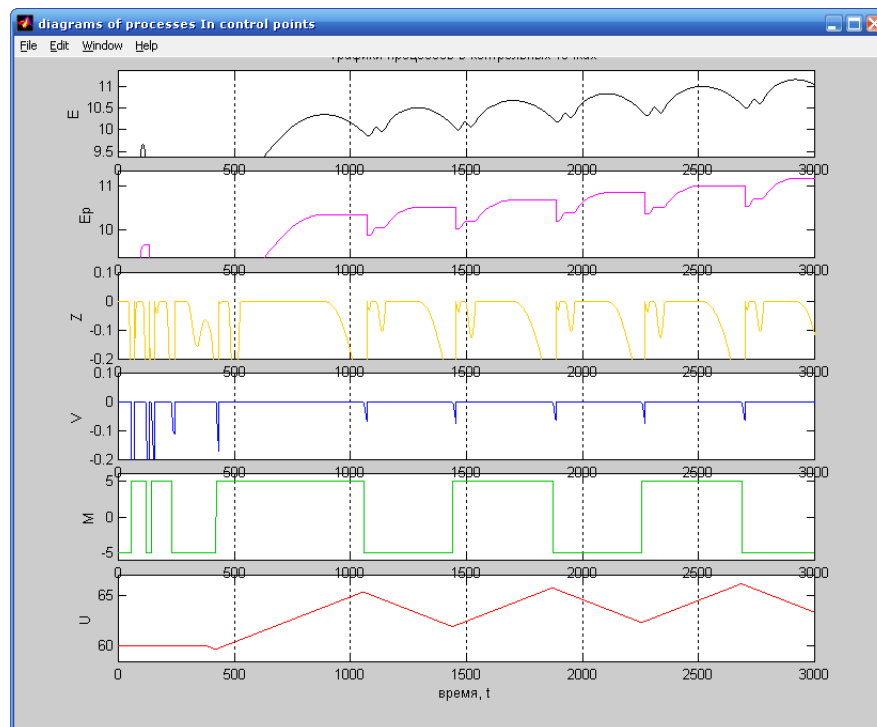


Рис. 4.11. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

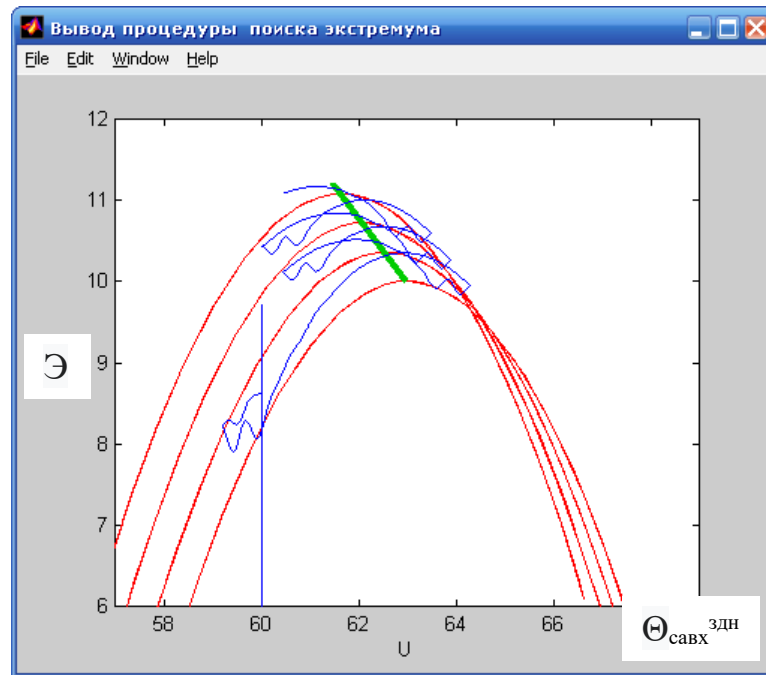


Рис. 4.12. Графік зміни показника ефективності  $\mathcal{E}(\Theta_{\text{савх}}^{\text{здн}})$  (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

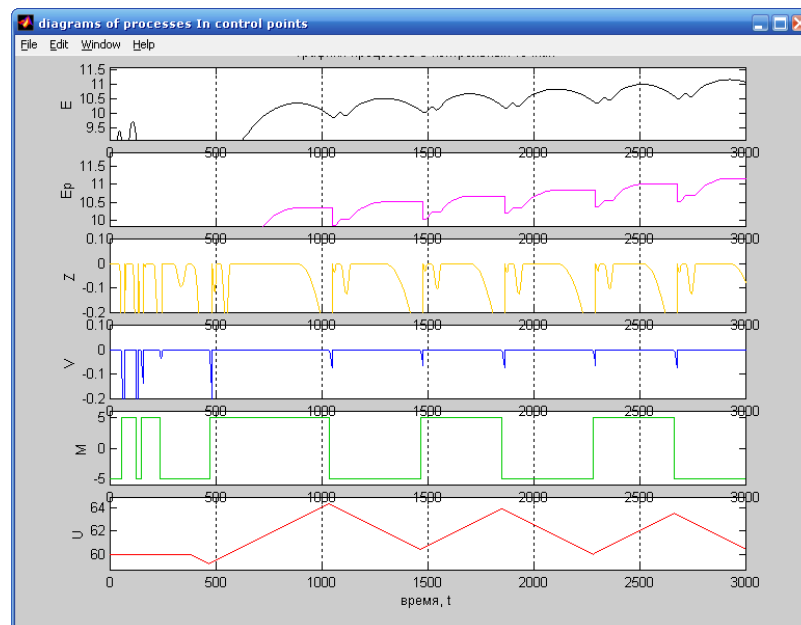


Рис. 4.13. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

На рис. 4.14 – 4.17 представлені результати моделювання екстремальної системи оптимізації при різних значення зони нечутливості, при її зменшенні в два рази (рис. 4.14 і 4.15) та при її збільшенні відносно номінального

значення. Як видно з результатів моделювання система працює коректно, вона знаходить положення екстремуму функції ефективності але при великих значеннях зони нечутливості втрати на пошук більші.

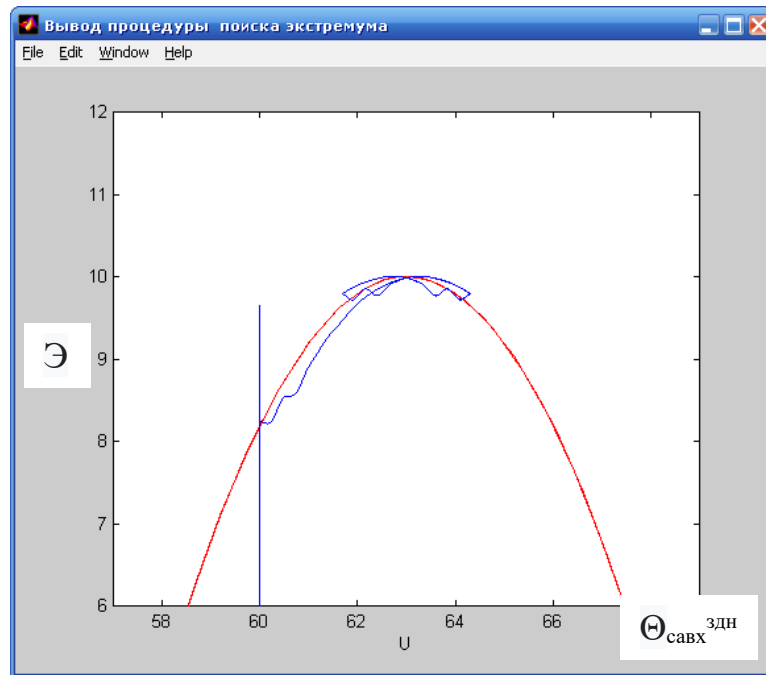


Рис. 4.14. Графік зміни показника ефективності  $\mathcal{E}(\Theta_{\text{савх}}^{\text{здн}})$  (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації зі зменшеною зоною нечутливості.

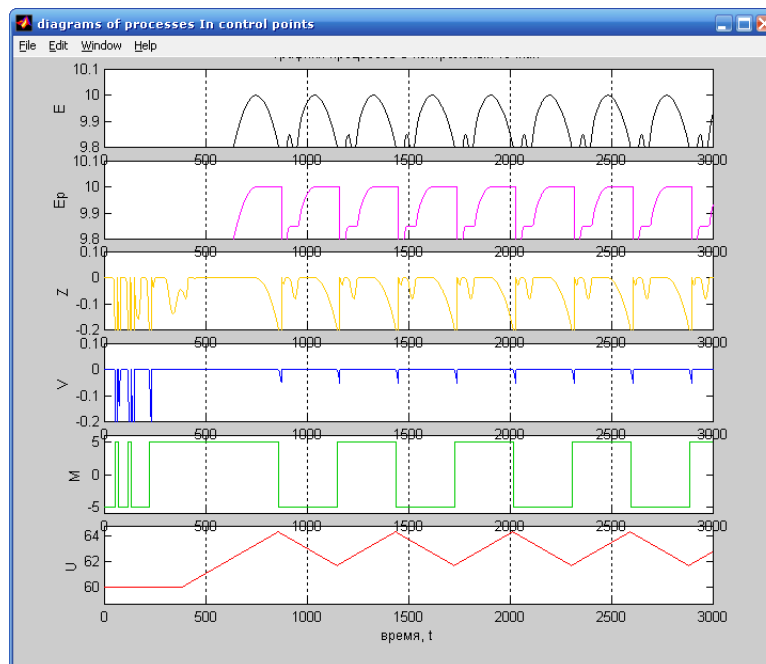


Рис. 4.15. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації зі зменшеною зоною нечутливості.

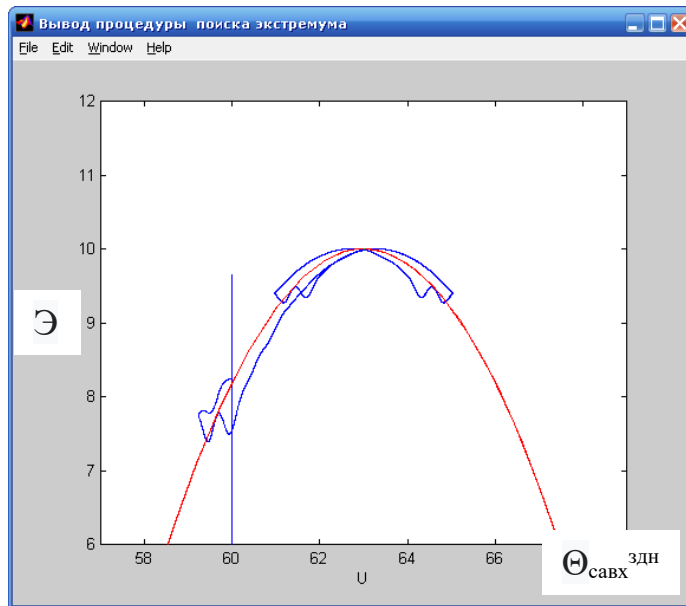


Рис. 4.16. Графік зміни показника ефективності  $\mathcal{E}(\Theta_{\text{савх}}^{\text{здн}})$  (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації зі збільшеною зоною нечутливості.

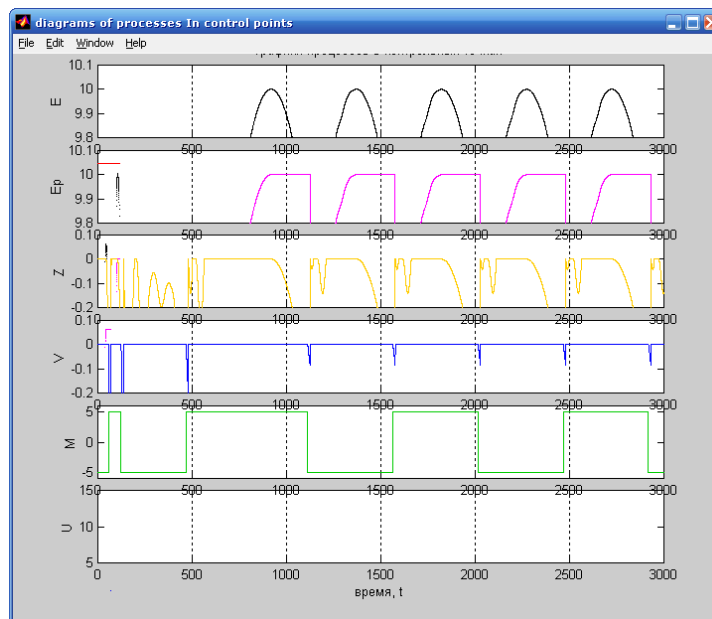


Рис. 4.17. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації зі збільшеною зоною нечутливості.

#### 4.6. Висновки

У розділі розроблено та досліджено модернізовану САК процесом сушіння плодоовочевої сировини у сушарці з тепловим насосом. САК реалізує нову функцію оптимізації температури сушильного агенту з метою мінімізувати питомі витрати електричної енергії на сушіння. Функція реалізована на основі алгоритмів екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Реалізація цієї функції забезпечує підвищення ефективності процесу сушіння плодоовочевої сировини 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

5.1. Існуюча програмно-технічна структура підсистеми керування процесом сушіння плодоовочевої сировини з використанням теплового насосу і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.

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

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


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 керування розробимо на базі контролера Simatic S7-300.

Для реалізації алгоритмів керування в модулях ПЗО контролера повинні бути передбачені: аналогові входи (4); аналогові виходи (3); дискретні входи (9); дискретні виходи (3).

## 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	±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)



Рис.5.3 – Загальний вигляд

	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 V 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 сушінням плодоовочевої сировини з використанням теплового насосу наведено на рис. 5.4.

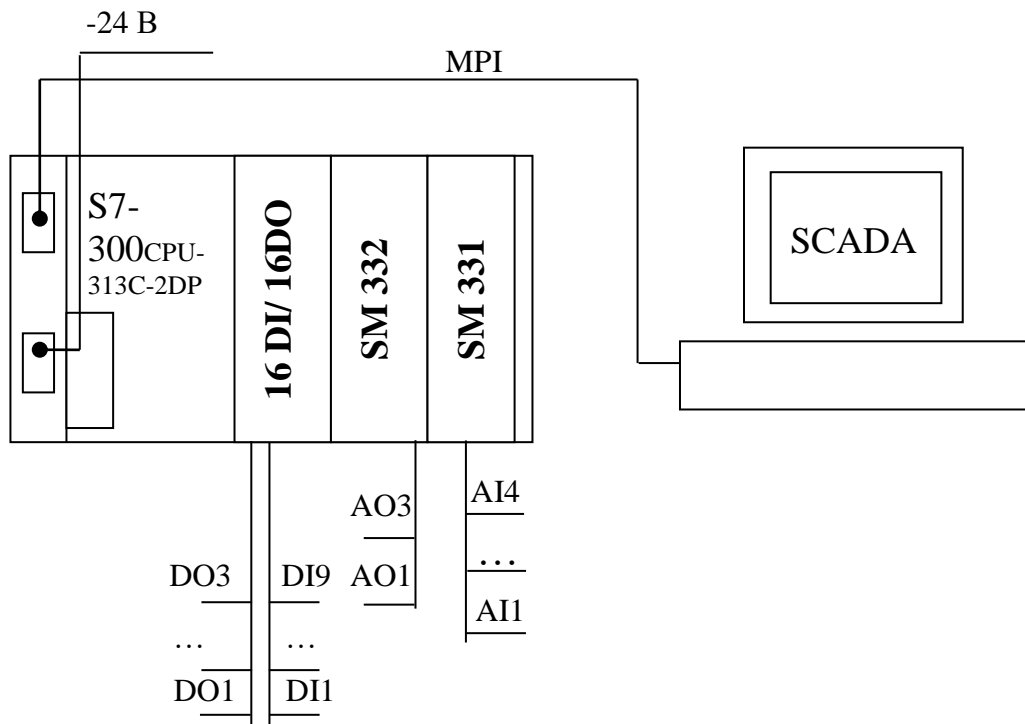


Рис. 5.4. – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом сушіння плодоовочевої сировини.

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».

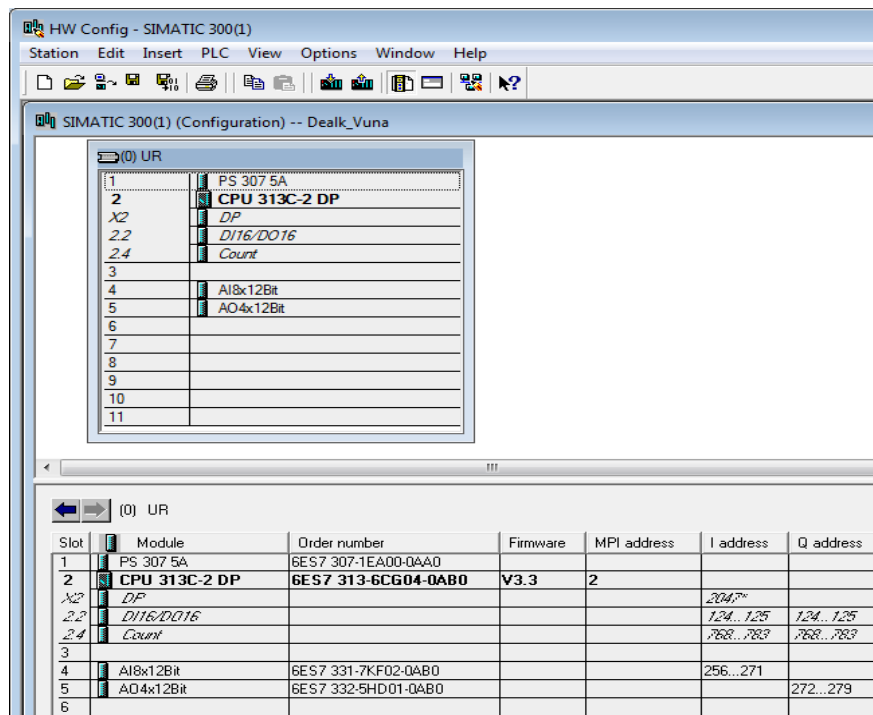


Рис.5.5. – Загальний вид вікна програми «Hardware».

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.

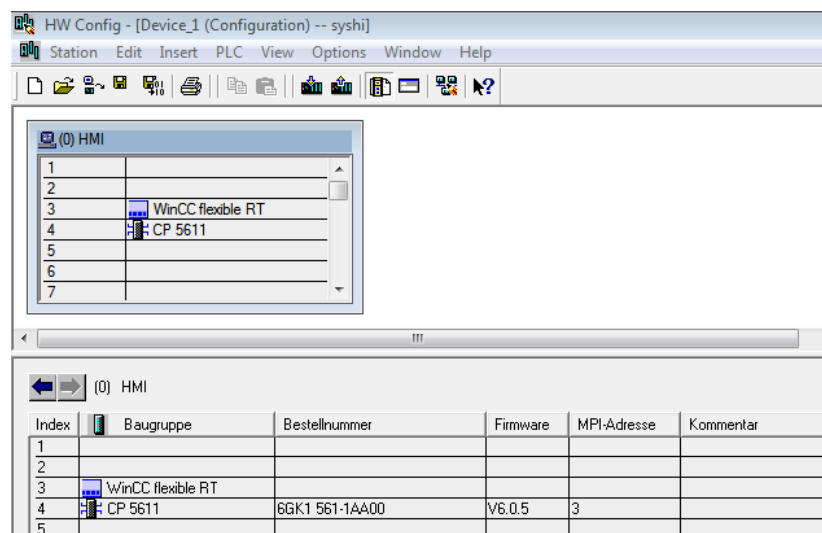


Рис.5.6. – Фрагмент вікна конфігурування РС - станції.

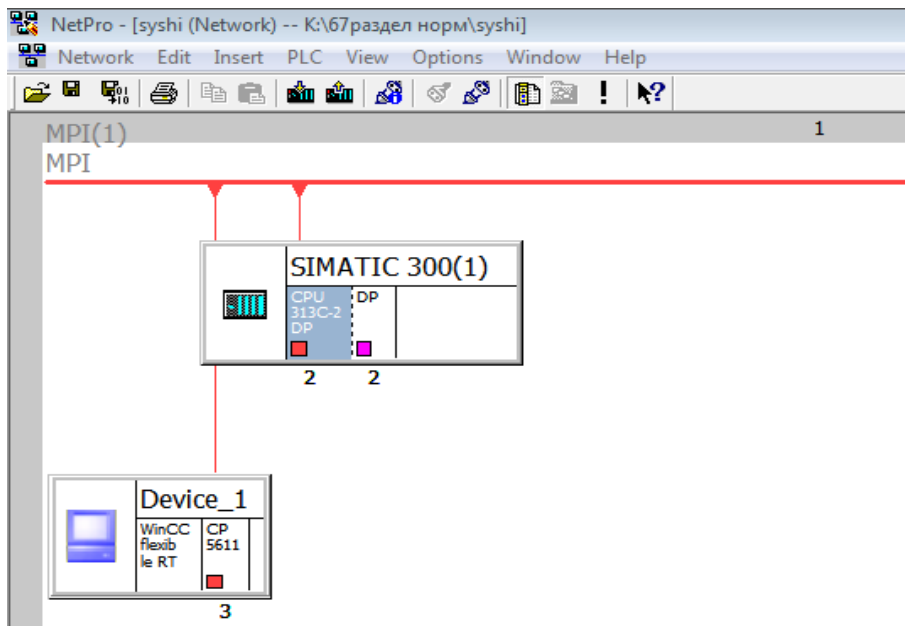


Рис. 5.7. Ілюстрація структури мережі в програмі "Net Pro".

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

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

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені алгоритми керування 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 загальні 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 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.

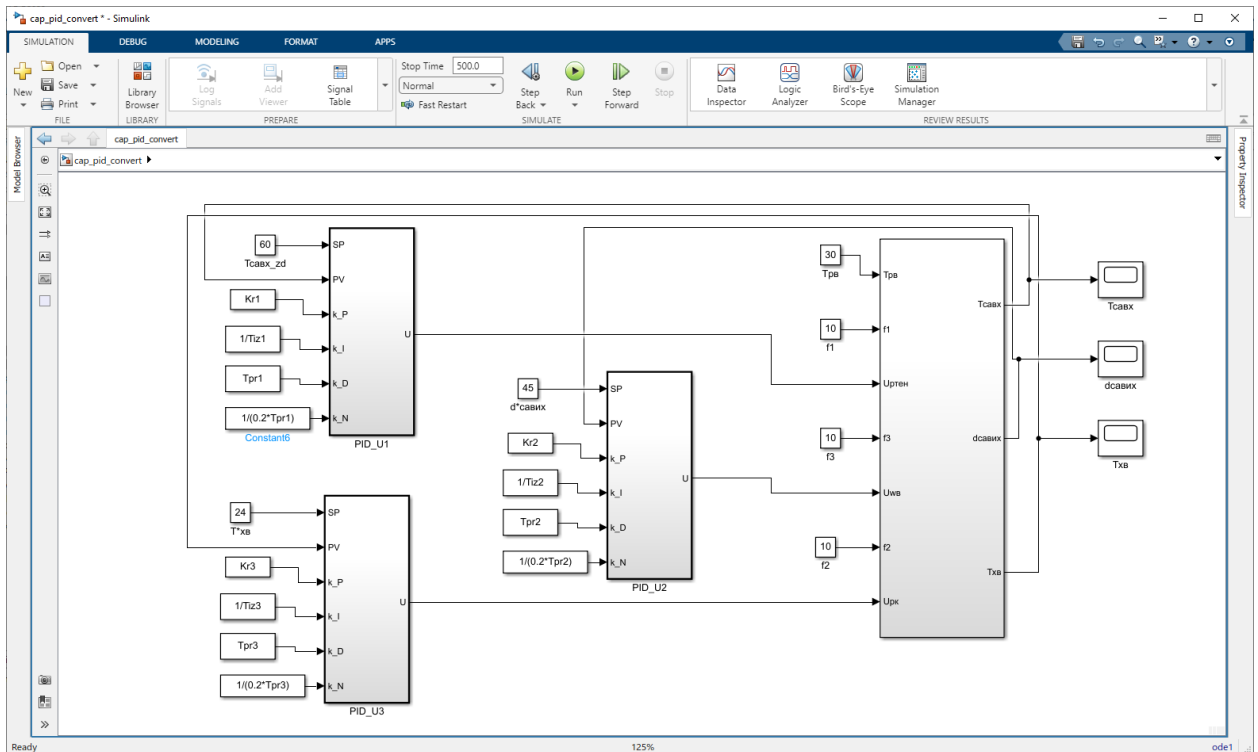


Рис. 5.7. Схема моделювання САК процесом сушіння плодоовочевої сировини з цифровими алгоритмами керування, які підготовлені до конвертації.

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

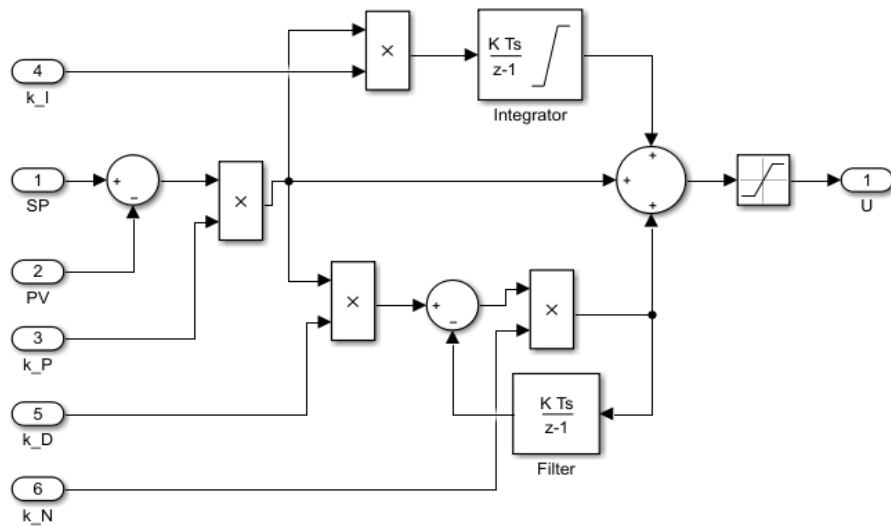


Рис. 5.8. Схема цифрового ПІД-регулятора.

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.

```

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.

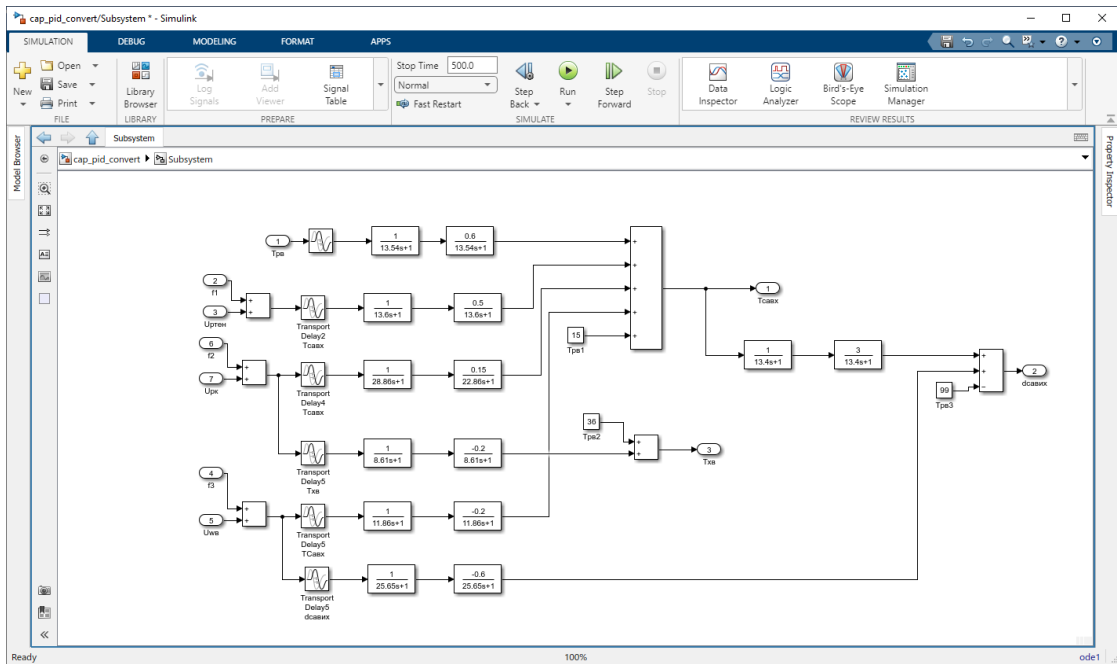


Рис. 5.10. Схема моделювання об'єкта керування.

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

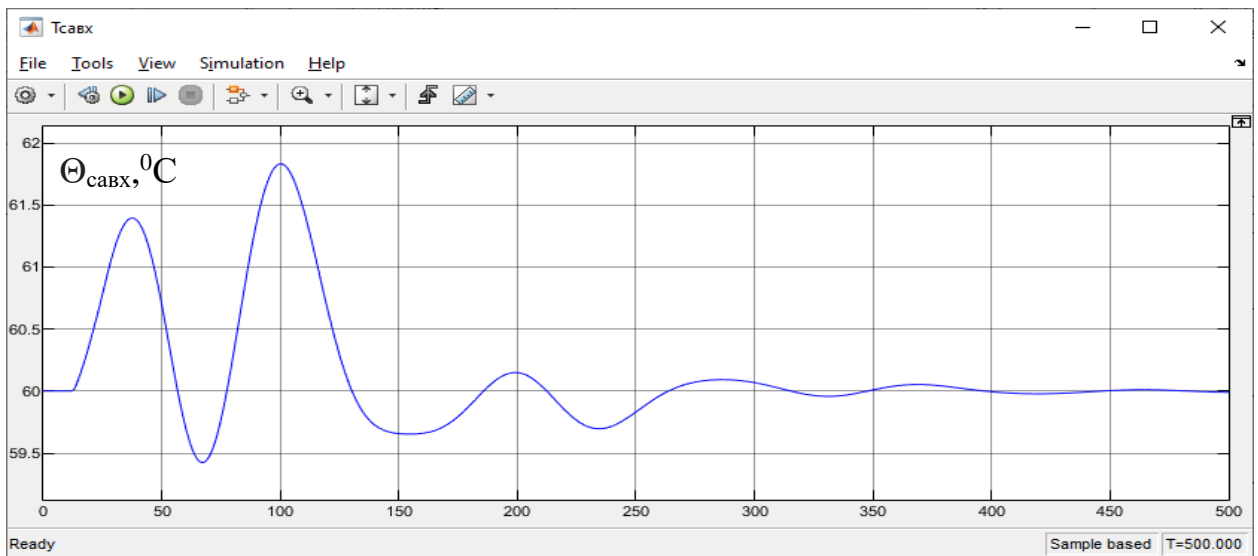


Рис. 5.11. Результати моделювання системи регулювання за каналом регулювання температури сушильного агента.

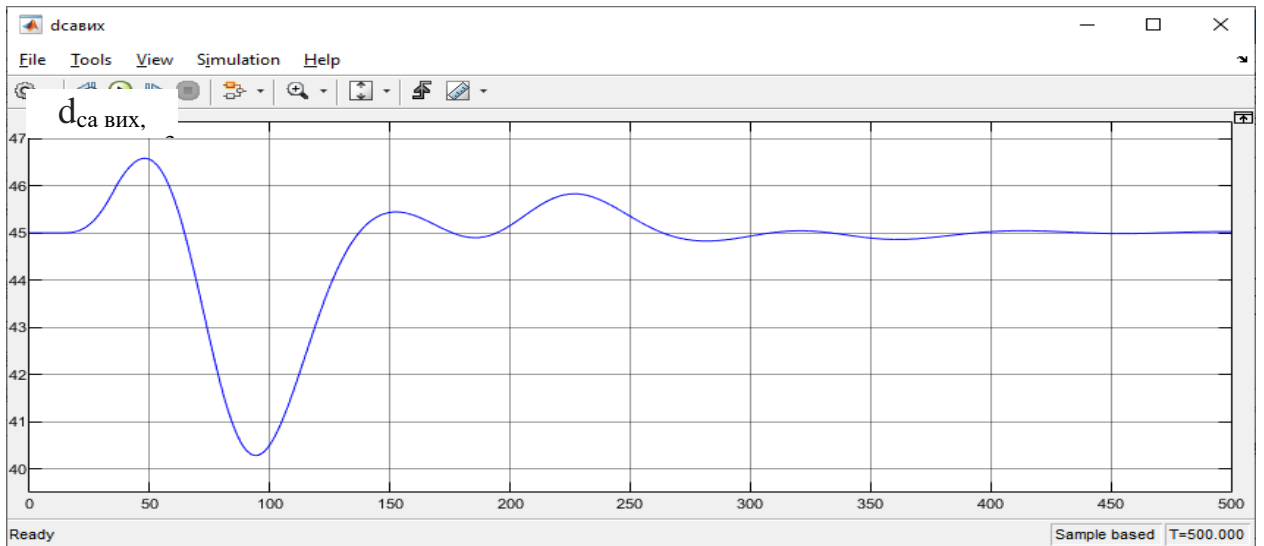


Рис. 5.12. Результати моделювання системи регулювання за каналом регулювання вологовмісту сушильного агенту на виході з сушильної камери.

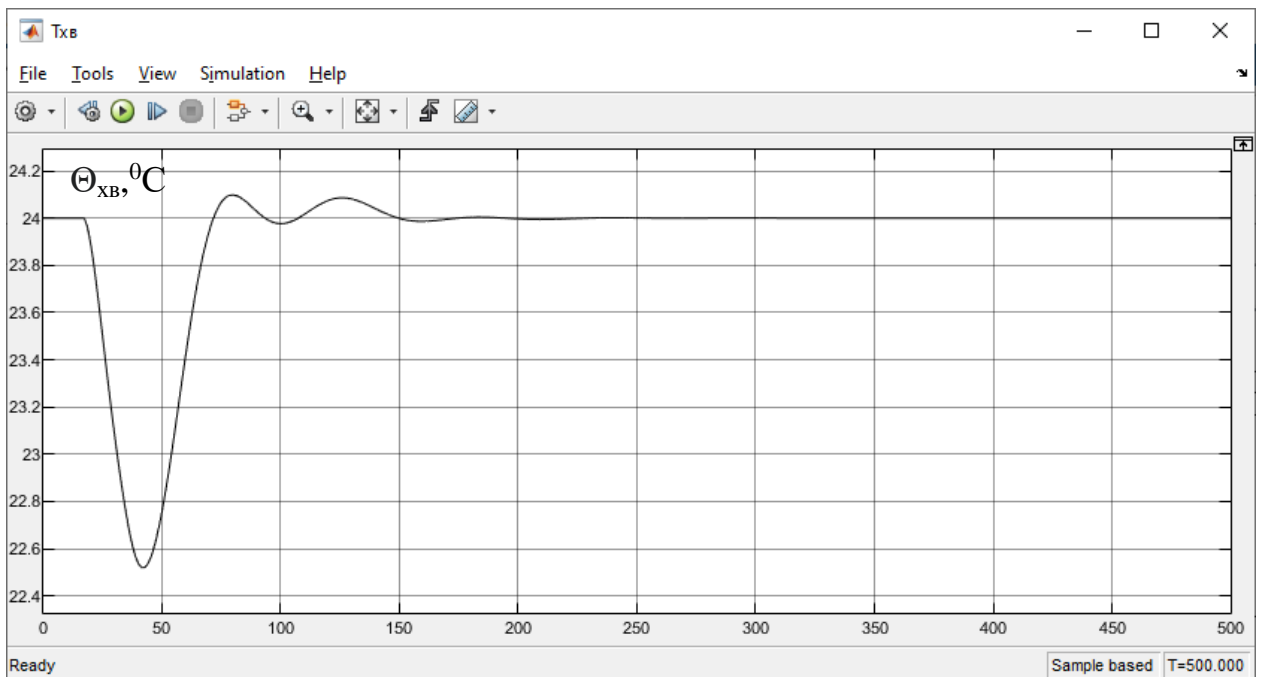


Рис. 5.13. Результати моделювання системи за каналом регулювання температури води, що надходить в утилізатор.

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

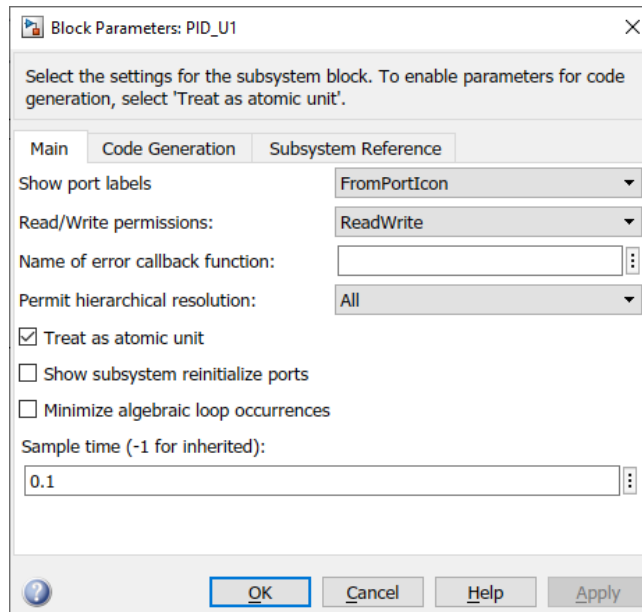


Рис. 5.14. Вікно налаштування підсистем для їх конвертації.

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

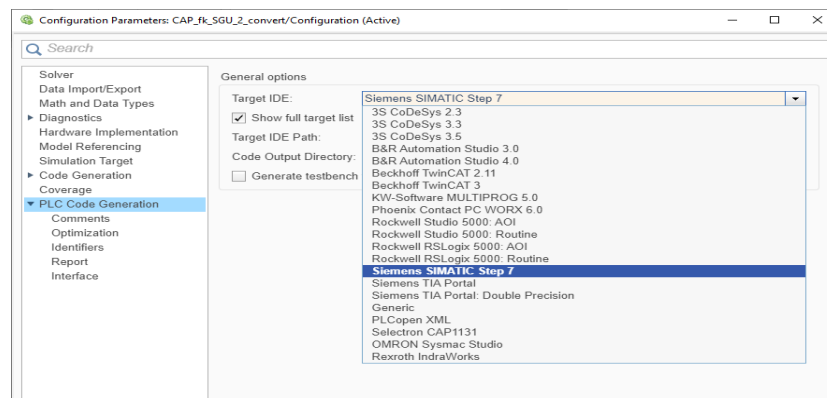


Рис. 5.15. Вікно налаштування пакету SimulinkPLCCoder.

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

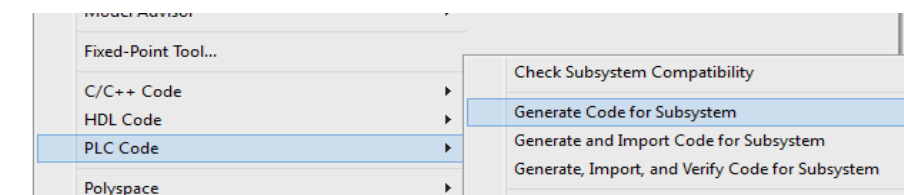


Рис 5.16 – Компіляція коду.

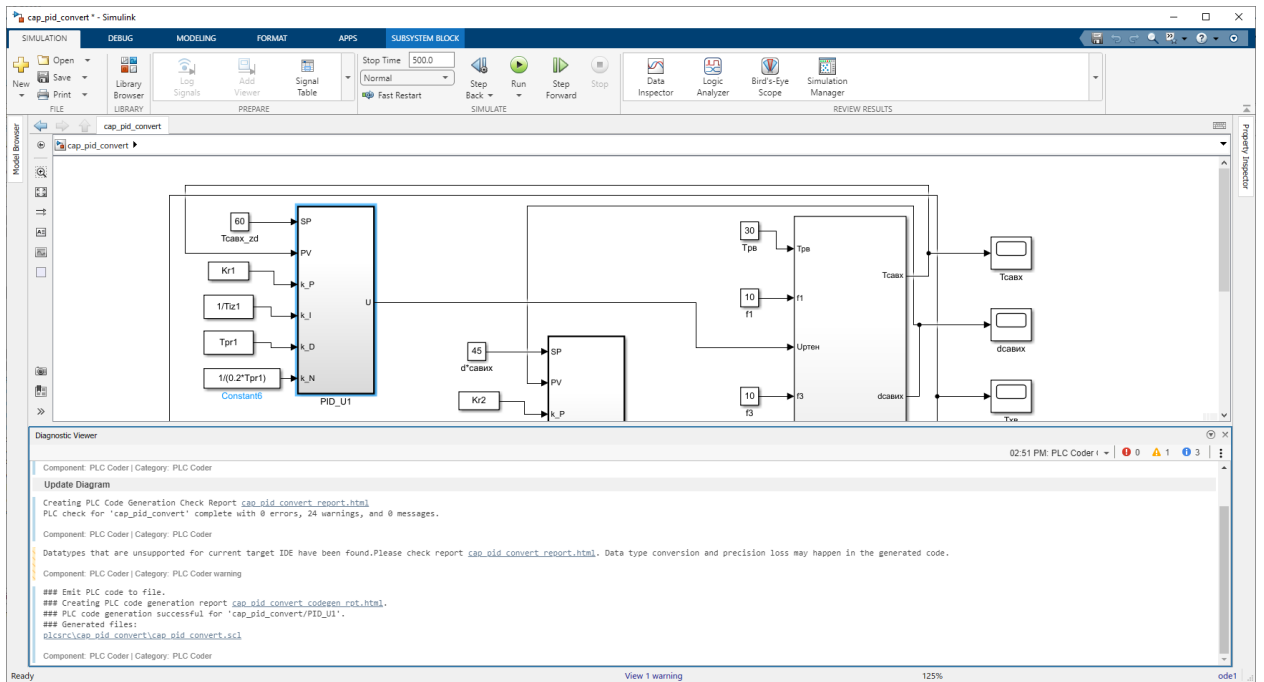


Рис. 5.17 – Результати успішної генерації коду ПІД-регулятора для середовища SIMATIC Step7 5.4.

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

```

1  cap_pid_convert.scl
2  *
3  * File: cap_pid_convert.scl
4  *
5  * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "cap_pid_convert/PID_U1"
6  *
7  * Model name           : cap_pid_convert
8  * Model version        : 1.3
9  * Model creator        : user
10 * Model last modified by : user
11 * Model last modified on  : Sun Jun 11 14:48:43 2023
12 * Model sample time     : 0.1s
13 * Subsystem name       : cap_pid_convert/PID_U1
14 * Subsystem sample time : 0.1s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on   : Sun Jun 11 14:51:59 2023
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   SP: REAL;
26   PV: 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 := 60.0;
46     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
47     Filter_DSTATE := 0.0;

```

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.

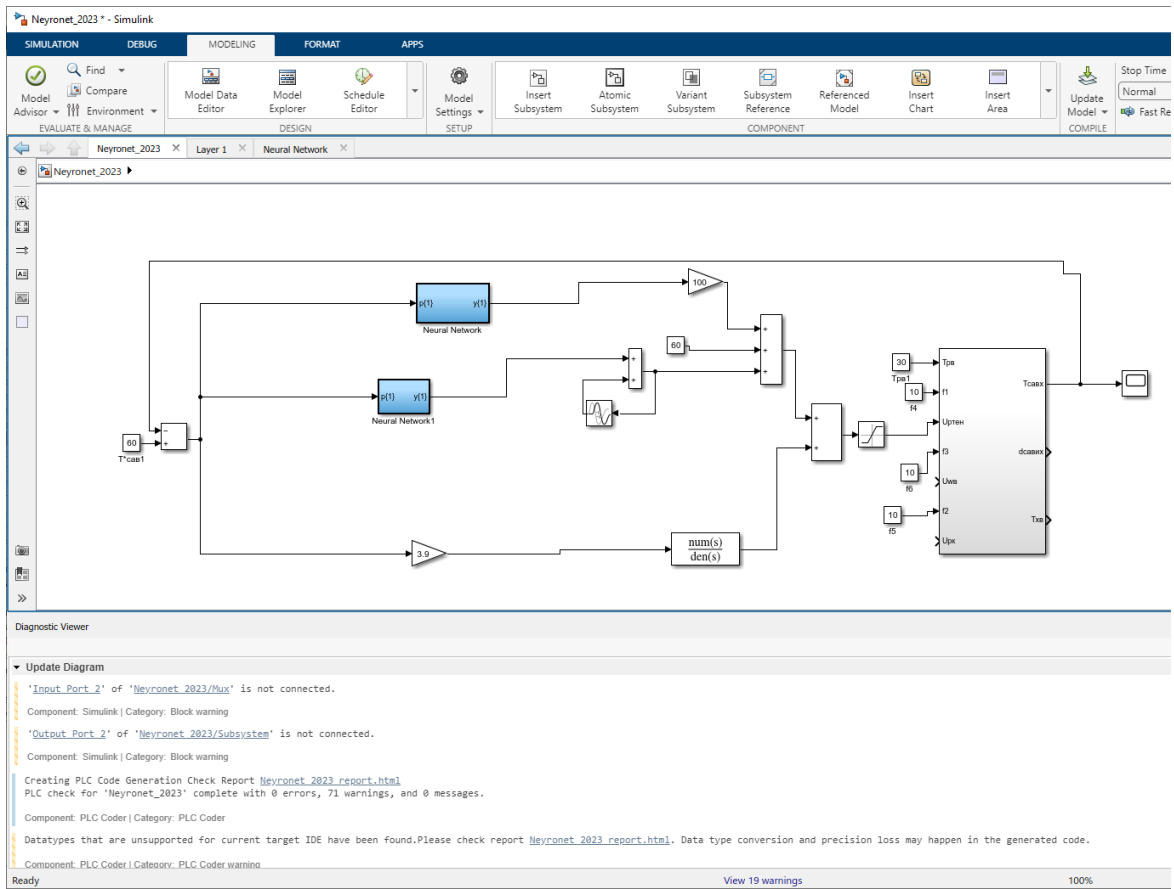


Рис. 5.19. Схема моделювання САР з нейронним регулятором.

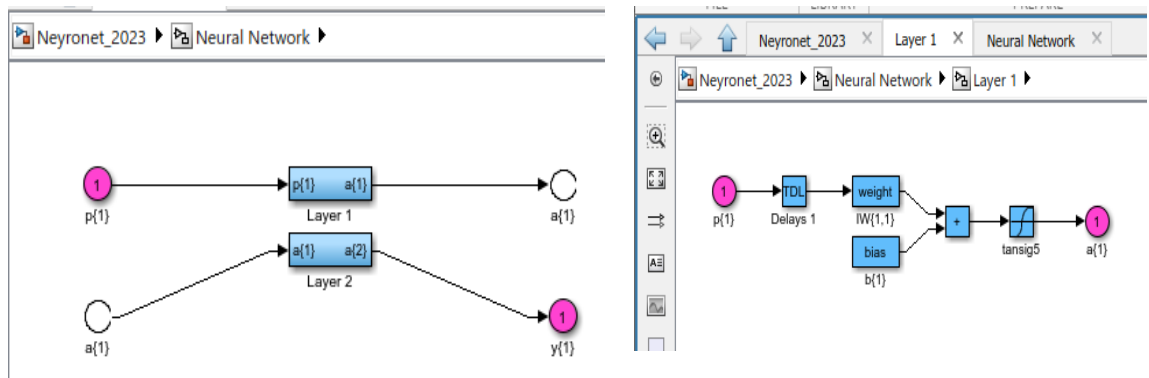
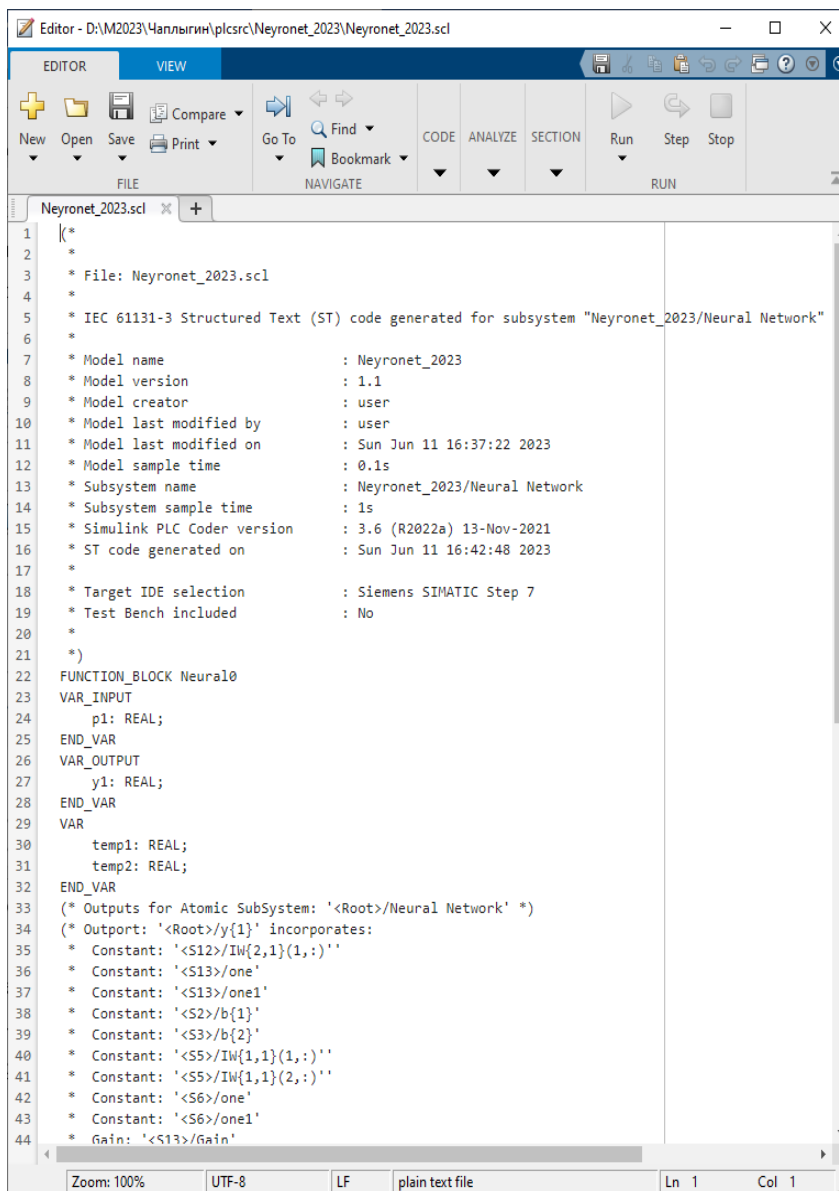


Рис. 5.20. Схема моделювання блоку «Neural Network».

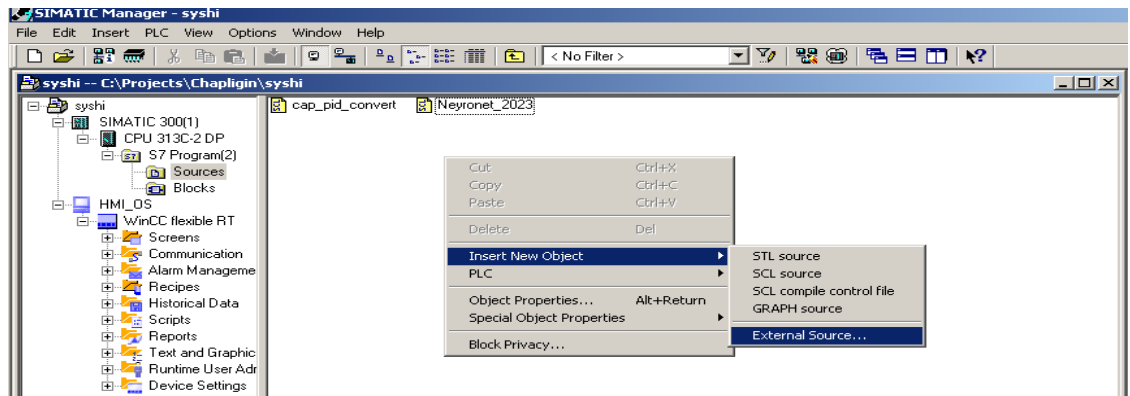
Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для середовища SIMATIC Step7 5.4 На рис. 5.21 наведено вихідний генерований код мовою SCL для блоку нейронної мережі. Повний список вихідних кодів конвертованих блоків наведено у додатку А.



```
1 | (*
2 | *
3 | * File: Neyronet_2023.scl
4 | *
5 | * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "Neyronet_2023/Neural Network"
6 | *
7 | * Model name           : Neyronet_2023
8 | * Model version        : 1.1
9 | * Model creator        : user
10 | * Model last modified by : user
11 | * Model last modified on  : Sun Jun 11 16:37:22 2023
12 | * Model sample time    : 0.1s
13 | * Subsystem name       : Neyronet_2023/Neural Network
14 | * Subsystem sample time : 1s
15 | * Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 | * ST code generated on  : Sun Jun 11 16:42:48 2023
17 | *
18 | * Target IDE selection  : Siemens SIMATIC Step 7
19 | * Test Bench included   : No
20 | *
21 | *)
22 | FUNCTION_BLOCK Neural0
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'
```

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.



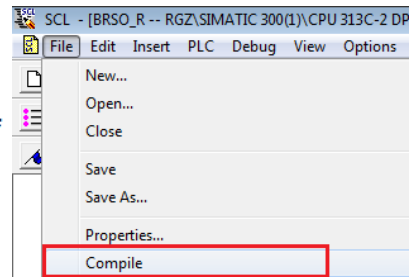
```

FUNCTION_BLOCK BRS01
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    dx: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Gdx: REAL;
    Gx: REAL;
END_VAR
  
```

➔

```

FUNCTION_BLOCK FB771
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    dx: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Gdx: REAL;
    Gx: REAL;
END_VAR
  
```



The screenshot shows the SIMATIC Manager interface with the 'Object Properties' table. The table lists various objects in the project, including data blocks, function blocks, and organization blocks. The object 'FB770' is highlighted in blue.

Object name	Symbolic name	Created in language	Size in the work me...	Type	Version (Header)
System data	...	...	...	SDB	...
OB1	...	LAD	...	Organization Block	0.1
OB35	CYC_INT5	STL	70	Organization Block	0.1
OB122	error1	LAD	38	Organization Block	0.1
FB1	Valve	LAD	432	Function Block	0.1
FB2	Motor	LAD	558	Function Block	0.1
FB3	All_Valve_Motor	LAD	2540	Function Block	0.1
FB4	DEAD_T	STL	430	Function Block	1.0
FB5	SAR	LAD	1918	Function Block	0.1
FB6	Logic_Control	LAD	692	Function Block	0.1
FB7	Valve_c	LAD	238	Function Block	0.1
FB9	LAG1ST	SCL	382	Function Block	1.0
FB41	CONT_C	SCL	1462	Function Block	1.5
FB42	CONT_S	SCL	1734	Function Block	1.5
FB770	PID_r	SCL	312	Function Block	0.0
FB771	N_net	SCL	254	Function Block	0.0
DB1	HML_Valve_Motor_DB	DB	160	Data Block	0.1
DB2	HML_SAU_DB	DB	172	Data Block	0.1
DB3	DB_SAR	DB	836	Instance data block ...	0.1
DB4	DB_TAU1	DB	520	Data Block	0.1

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

```

FUNCTION_BLOCK FB772
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;
    dPV: REAL;
END_VAR
VAR
    Integrator_DSTATE: REAL;
    Filter_DSTATE: REAL;
    rtb_Add: REAL;
    rtb_Add2: REAL;
    rtb_Product: REAL;
    rtb_Product3: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:
        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        Integrator_DSTATE := 0.0;

        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
        Filter_DSTATE := 0.0;
    1:
        (* DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        IF Integrator_DSTATE >= 100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := 100.0;
        ELSIF Integrator_DSTATE <= -100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := -100.0;
        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 ПД-регулятора в середовище програмування Step 7.

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

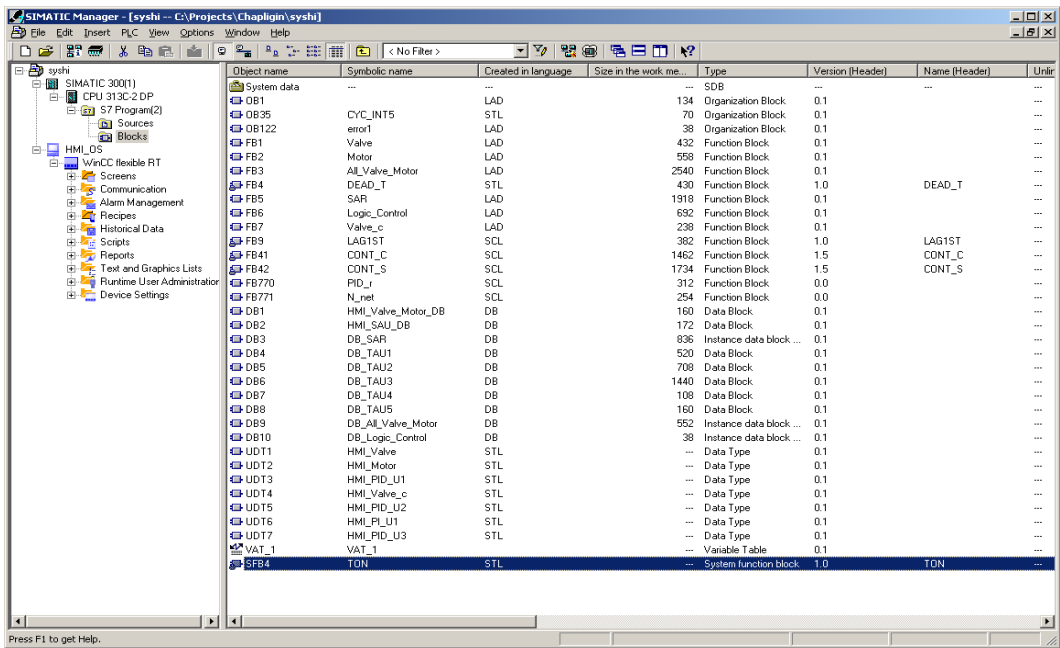


Рис. 5.24. Загальний вид вікна проекту в середовищі Step 7.

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

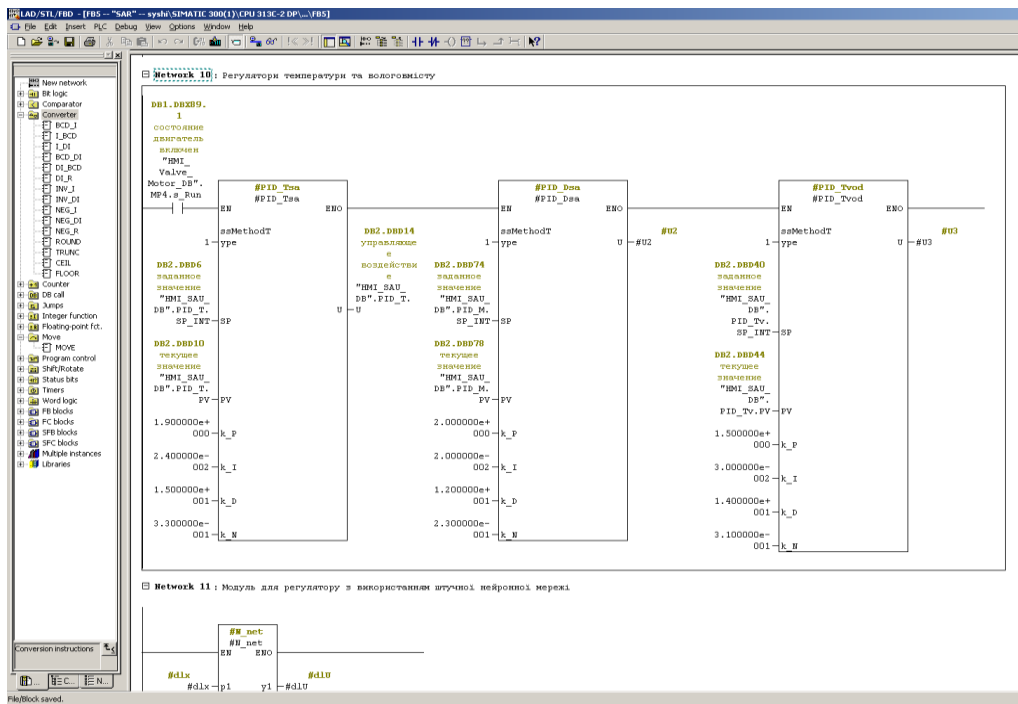


Рис. 5.25. Фрагмент програми в функціональному блоці FB5 яка реалізує розрахунок регуляторів.

Проведемо тестування програми ПІД-регулятора. Для цього доповнимо програму моделлю об'єкта керування і запусимо розрахунок моделі САР за каналом регулювання температури сушильного агенту. Фрагмент програми яка реалізує розрахунок моделі ОК і регулятору температури сушильного

агенту у режимі тестування наведено на рис. 5.26 і 5.27. А результати тестування у вигляді перехідної характеристики САР сушильного агенту наведені у вікні SCADA системи WinCCflexible на рис. 5.28.

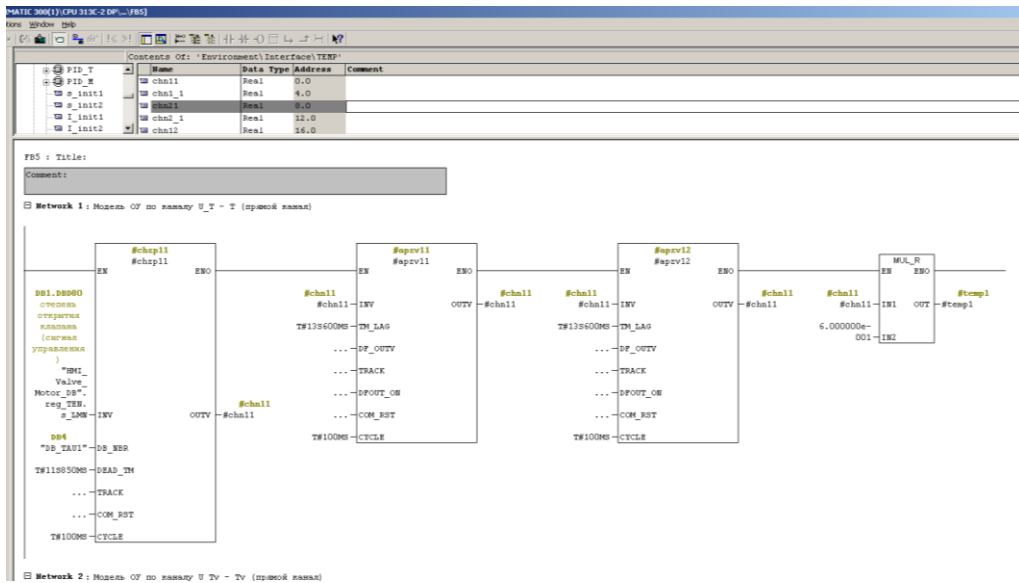


Рис. 5.26. Фрагмент програми яка реалізує розрахунок моделі ОК.

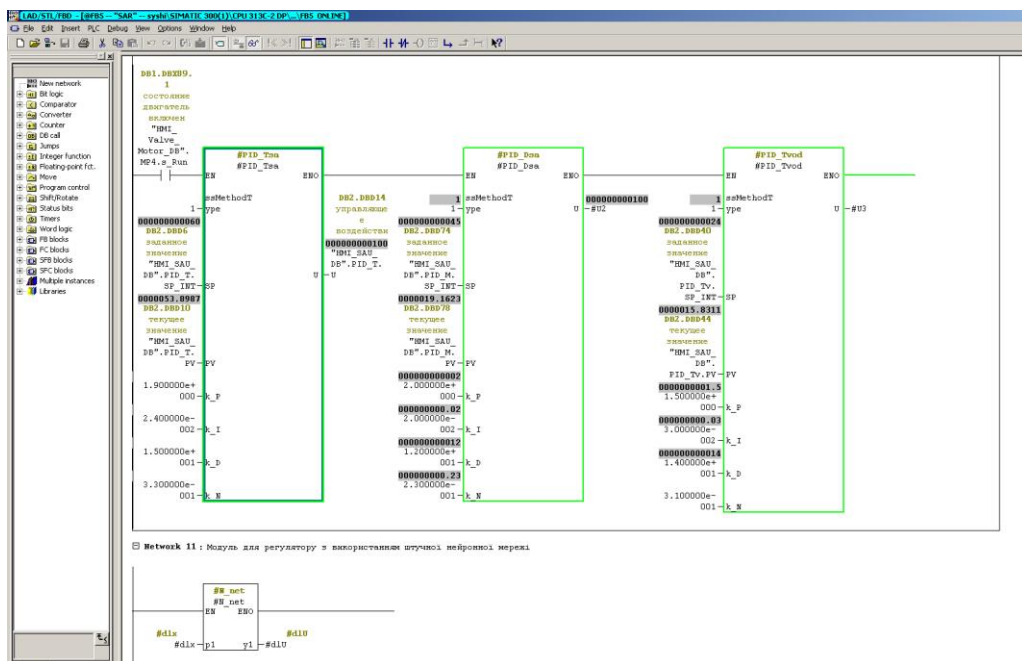


Рис. 5.27. Фрагмент програми конвертованого регулятора температури сушильного агенту у режимі тестування.

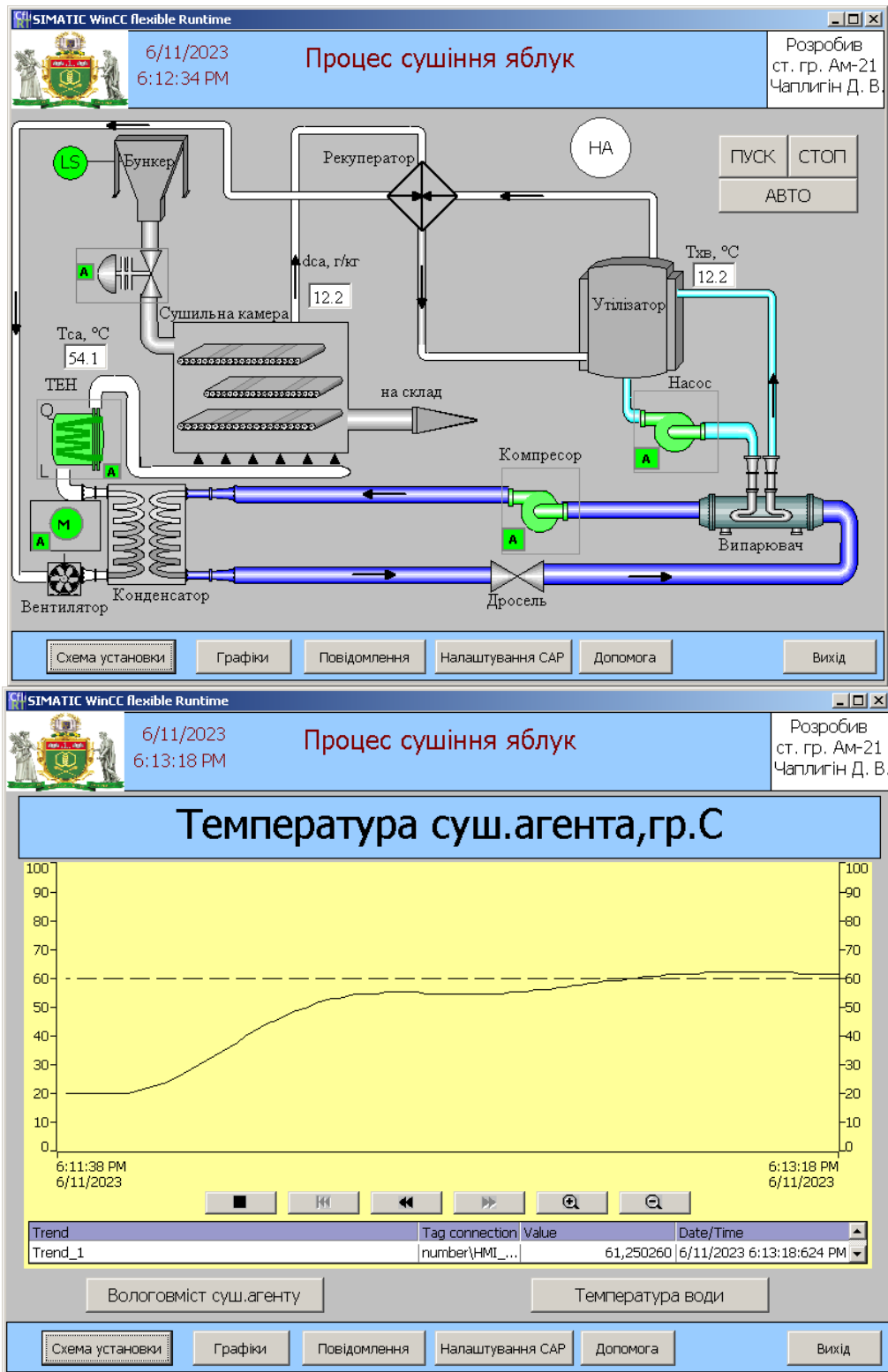


Рис. 5.26. Результати тестування моделі САР температури сушильного агенту.

Результати тестування 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 сушіння плодоовочевої сировини в сушарці з тепловим насосом алгоритмів оптимізації теплового режиму сушіння (температури сушильного агенту) дозволить підтримувати мінімум питомих витрат електричної енергії на сушіння (або максимум кількості висушених фруктів на одиницю витраченої електричної енергії) у поточних технологічних умовах не порушуючи регламенту. Це дозволить забезпечити зниження питомих витрат електричної енергії при сушінні до 4 – 5 % .

### 5.4. Висновки за розділом

1. В цьому розділі розглянута програмно-технічна структура системи керування процесом сушіння плодоовочевої сировини 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 за допомогою пакету Simulink PLC Coder були конвертовані для інтеграції у середовище програмування контролерів фірми Siemens Simatic Step 7. Проведене тестування конвертованого програмного забезпечення підтвердило його працездатність та ефективність застосування конвертору пакета Simulink PLC Coder.

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

Загальні висновки:

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проаналізовано технологічний процес сушіння плодоовочевої сировини в потоці з використанням теплового насоса, як об'єкт керування. На основі аналізу, що визначає якість сушіння, визначено параметри, які мають найбільший вплив на процес, обґрунтовані вимоги до системи керування та обрані технічні засоби для реалізації системи. Вибраний об'єкт керування – технологічний об'єкт сушіння плодоовочевої сировини. Це агрегат, що має досить високу продуктивність і повинен забезпечувати високу якість сушіння. Рівень цих показників не може бути досягнутий шляхом ручного керування та автоматичного керування з використанням базових алгоритмів. Тому актуальність створення системи автоматичного керування процесом сушіння є беззаперечною.

Проведено синтез і аналіз САР системи сушіння в якій забезпечується регулювання температури сушильного агенту на вході сушильної камери, вологовмісту сушильного агенту та температури води на вході в утилізатор, обґрунтовано принципи автоматичного регулювання, проведено аналіз показників якості варіантів розроблених САР.

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. Це означає підвищення працездатності й надійності системи.

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

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

Також, було розроблено систему, яка окрім традиційних функцій реалізує функцію екстремального регулювання, що є окремим випадком системи

автоматичної оптимізації, це дає можливість працювати системі у своєму максимально ефективному режимі, тобто за мінімальних затрат електроенергії. Було доведено актуальність створення такої системи, раціональність її використання на даному об'єкті.

Була розроблена технічна структура мікропроцесорного ядра системи керування та програмне забезпечення системи автоматичного керування системою сушіння плодоовочевої сировини.

Були вивчені основні характеристики контролерів фірми Siemens сімейства S7-30. Отримано практичний досвід програмного конфігурування контролерів в середовищі Step7.

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

## Список літератури

1. Хобін В. А. Конспект курсу лекцій по дисципліні «Идентификация и моделирование объектов Автоматизации». Одеса-2008 р.
2. Хобін В. А. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу «Идентификация и моделирование технологических объектов», Одеса-2000 г.
3. Киричков В.Н. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами. - К.: Высшая шк., 1990. - 263 с.
4. Конспект курса лекций по дисциплине “Теория автоматического управления” (часть I)– Хобин В.А. ОНАПТ. Одесса – 2012 г.
5. Конспект курса лекций по дисциплине “Теория автоматического управления” (часть II)– Хобин В.А. ОНАПТ. Одесса – 2012 г.
6. Методические указания к выполнению и оформлению курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов специальностей 2105 дневной и заочной форм обучения / Сост. В.А. Хобин, - Одесса: ОТИПП, 1992 г. – 15 с.
7. Конспект лекцій з курсу „Автоматизація технологічних процесів та виробництв” для студентів напряму підготовки бакалаврів 6.050202 „Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” всіх форм навчання / Укл. Л.М.Сичук, І.М.Світій. – Одеса: ОНАХТ, 2013. – 88 с.
8. User's Manual .WinCC flexible 2008 Compact / Standard / Advanced.
9. «Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика». – Усков А.А., Кузьмин А.В. 2004. – 143 с.
10. «MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики». – Дьяконов В.П., Круглов В.В М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.
11. Методические указания к лабораторной работе «Моделирование нейронных сетей в matlab». – Федотов А.В., 2002. – 22с.

12. Конспект курса лекций по дисциплине «Специальные разделы теории управления» для студентов специальности 8.092501. – Хобин В.А.- Одеса: ОНАХТ 2010. – 62 стр.

13. Каталог ИК PI «Промышленная связь для систем автоматизации и приводов». – Siemens AG, 2005. – 666с.

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

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

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

## Додаток А

### Вихідний текст модулю ПІД регулятора..

```
SCL - [PID_R - RGZSIMATIC 300(1)CPU 313C-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help
FUNCTION_BLOCK FB772
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;
    dPV: REAL;
END_VAR
VAR
    Integrator_DSTATE: REAL;
    Filter_DSTATE: REAL;
    rtb_Add: REAL;
    rtb_Add2: REAL;
    rtb_Product: REAL;
    rtb_Product3: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:
        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        Integrator_DSTATE := 0.0;

        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
        Filter_DSTATE := 0.0;
    1:
        (* DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        IF Integrator_DSTATE >= 100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := 100.0;
        ELSIF Integrator_DSTATE <= -100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := -100.0;
        END_IF;

        (* Sum: '<S1>/Add2' incorporates:
        * Inport: '<Root>/PV'
        * Inport: '<Root>/SP' *)
        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
```

## Вихідний текст модулю нейронного регулятора.

```
(*
*
* File: Neuronet_2023.scl
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "Neuronet_2023/Neural Network"
*
* Model name           : Neuronet_2023
* Model version        : 1.1
* Model creator        : user
* Model last modified by : user
* Model last modified on : Sun Jun 11 16:37:22 2023
* Model sample time    : 0.1s
* Subsystem name      : Neuronet_2023/Neural Network
* Subsystem sample time : 1s
* Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
* ST code generated on  : Sun Jun 11 16:42:48 2023
*
* Target IDE selection : Siemens SIMATIC Step 7
* Test Bench included  : No
*)
FUNCTION_BLOCK Neural0
VAR_INPUT
    p1: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    y1: REAL;
END_VAR
VAR
    temp1: REAL;
    temp2: REAL;
END_VAR
(* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Neural Network' *)
(* Output: '<Root>/y{1}' incorporates:
* Constant: '<S12>/IW{2,1}(1,:)'
* Constant: '<S13>/one'
* Constant: '<S13>/one1'
* Constant: '<S2>/b{1}'
* Constant: '<S3>/b{2}'
* Constant: '<S5>/IW{1,1}(1,:)'
* Constant: '<S5>/IW{1,1}(2,:)'
* Constant: '<S6>/one'
* Constant: '<S6>/one1'
* Gain: '<S13>/Gain'
* Gain: '<S13>/Gain1'
* Gain: '<S6>/Gain'
* Gain: '<S6>/Gain1'
* Math: '<S13>/Math Function'
* Math: '<S13>/Math Function1'
* Math: '<S6>/Math Function'
* Math: '<S6>/Math Function1'
* Product: '<S10>/Product'
* Product: '<S15>/Product'
* Product: '<S9>/Product'
* Sum: '<S13>/Sum'
* Sum: '<S13>/Sum1'
* Sum: '<S15>/Sum'
* Sum: '<S2>/netsum'
* Sum: '<S3>/netsum'
* Sum: '<S6>/Sum'
* Sum: '<S6>/Sum1'
*
* About '<S13>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S13>/Math Function1':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S6>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S6>/Math Function1':
* Operator: reciprocal *)
temp1 := EXP((-0.10722898974144889 * p1) + -0.059491487837793511) * -2.0);
temp2 := EXP(((0.65621812813121017 * p1) + 10.132925397456516) * -2.0);
y1 := (((1.0 / (EXP((((((1.0 / (temp1 + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * -0.41632300715714332) + (((1.0 / (temp2 + 1.0)) * 2.0) - 1.0)
    * -0.0800442544192819)) + 0.06007385603041436) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0);
(* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Neural Network' *)
END_FUNCTION_BLOCK
```