

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет

Кафедра Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

На тему Підвищення ефективності автоматичного керування процесом стерилізації томат-продуктів

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача(ки) Серебряков О.М.

(прізвище, ініціали)

2 курсу Ам-20 групи

Керівник к.т.н доцент, Мазур О.В.

(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: Зав. кафедри АТПіРС

д.т.н., професор Хобін В.А.

(посада, прізвище та ініціали)

к.т.н доцент Гурский О.О.

(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

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

Завідувач(ка) кафедри АТПіРС

(назва кафедри)

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса-2024 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС
В.А. Хобін

«22» грудня 2022 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Серебряков Олександр Миколайович

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом стерилізації томат-продуктів»

Затверджена наказом ОНТУ №877-03 від 29.11.22 р.

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

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

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

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

Розділ 1. Технологічний процес стерилізації томат-продуктів, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

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

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

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

Розділ 5. Реалізація та підготовка до впровадження на підприємстві (Вітмарк Україна)

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

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

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

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

Керівник
Завдання прийняв до виконання

Мазур О.В.
Серебряков О.М.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач-дипломник Серебряков О.М. Керівник роботи Мазур О.В.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник Серебряков О.М. _____
ПІБ Підпис

Анотація:

Кваліфікаційна робота магістра присвячена дослідженню системи автоматичного керування (САК) технологічного процесу стерилізації томатопродуктів з метою вдосконалення алгоритмів керування, що повинно забезпечити мінімізацію енерговитрат, підвищення якості готової продукції та зменшення вірогідності отримання нестерильного продукту, за рахунок впровадження інтелектуальних алгоритмів гарантуючого керування, на основі апарату нечіткої логіки та нейронних мереж. В роботі проведено аналіз впливу режимів ведення ТП і роботи обладнання на його техніко-економічні показники. Проаналізована поведінка САК процесом стерилізації томатопродуктів типової структури. Виявленні основні недоліки її роботи.

Проведено аналіз особливостей технологічного процесу стерилізації томатопродуктів як об'єкту керування, що знижують динамічну точність систем керування. Проведено структурний аналіз та синтез САК процесу стерилізації підвищеної динамічної точності. Запропоновано вдосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання систем автоматичного керування (САК) на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж. Проведено синтез САК процесом стерилізації томатопродуктів з використанням інтелектуальних алгоритмів гарантуючого керування.

Результати дослідження можуть бути використані на підприємствах харчової промисловості для підвищення ефективності, якості та безпеки продукції.

Кількість сторінок:177, кількість рисунків 171, кількість таблиць 14.

Ключові слова: система керування, математична модель, перехідний процес, підвищення ефективності, підвищена динамічна точність, система гарантуючого керування, нечітка логіка, нейронний регулятор.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами	9
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СТЕРИЛІЗАЦІЇ ТОМАТОПРОДУКТІВ І ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	11
1.1 Опис технологічного процесу та його особливості.....	11
1.2 Параметризація схеми технологічного процесу й загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.....	13
1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкту керування.....	17
1.4 Ідентифікація моделей каналів перетворення координатних дій об'єкту керування	18
1.5 Ідентифікація моделей збурень об'єкту керування	40
1.6 Реалізація моделі технологічного процесу як ОК Моделі ОК, що підлягають відтворенню у середовищі імітаційного моделювання, зведемо до таблиці 1.6. ...	47
1.7. Типові структура й алгоритми САК ТП стерилізації томато-продуктів,.....	59
1.8 Висновки за розділом 1	67
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК СТЕРИЛІЗАЦІЇ ТОМАТОПРОДУКТІВ	68
2.1 Синтез і аналіз САК підвищеної динамічної точності.....	68
2.2. Визначення недоліків існуючих САК і формулювання мети вдосконалення систем автоматичного керування процесом стерилізації томатопродуктів.....	77
2.3. Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САУ процесом стерилізації томатопродуктів.....	78
2.4 Висновки за розділом 2	78
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	80
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем керування, побудованих на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого об'єкта керування	80
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійною характеристикою	81
3.3 Параметричний синтез САУ з традиційними ПІД регуляторами для об'єкта з нелінійними характеристиками за каналом регулювання	83
3.4 Розробка моделі САУ з нечіткими регуляторами (НР) для об'єкта з нелінійними характеристиками за каналами регулювання	89
3.5 Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів керування	104
3.6 Синтез моделі САУ з нейрорегуляторами.....	106
3.7 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегуляторами	121
3.8 Аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють	127
3.9 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера	130
3.10 Висновки за розділом 3	135
Розділ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	136

4.1. Опис загальних принципів побудови модернізованої системи керування. ...	136
4.2. Розробка структурної схеми САУ та опис принципу її дії.	139
4.3. Доопрацювання математичної моделі ОР для вирішення задачі синтезу та аналізу системи гарантуючого керування.	141
4.4. Розробка імітаційної моделі системи гарантуючого керування температури стерилізації соку та дослідження її роботи.	142
4.5 Висновки за розділом 4	149
РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ НАПІДПРИЄМСТВІ	151
5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми керування процесом стерилізації тоματοпродуктів і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.....	151
5.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.	155
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.	168
5.4 Висновки за розділом 5	168
ВИСНОВКИ.....	169
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	170
Додаток А.....	175

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТП – технологічний процес;

ПП – перехідний процес;

ПХ – перехідна характеристика;

АК – алгоритм керування;

ОК – об'єкт керування;

ОР – об'єкт регулювання;

САР – система автоматичного регулювання;

САК – система автоматичного керування;

ПДТ – підвищена динамічна точність;

СГК – система гарантуючого керування;

НМ – нечіткі множини;

НР – нейронний регулятор;

ВСТУП

Сучасна харчова промисловість ставить високі вимоги до якості та безпеки продукції, що вимагає застосування ефективних методів технологічного контролю та автоматизації. Одним із ключових етапів виробництва томатопродуктів є процес стерилізації, який забезпечує тривалий термін зберігання та безпечність продукту для споживача. Стерилізацію томатного соку здійснюється на відповідних підприємствах, та, навіть, у домашніх умовах. Основними цілями таких підприємств є зниження енергоємності виробництва, зменшення втрат, та підвищення якості готового продукту.

Актуальність теми. Підвищення енергоефективності та зменшення енергоспоживання відповідних технологічних процесів є важливою задачею рішення якої підвищує енергетичну безпеку підприємства та в цілому в країні. На сьогоднішній час в харчовій промисловості все більшого значення набуває розробка та впровадження нових технологій що дозволяють отримувати якісну продукцію та зменшити енерговитрати на її виробництво.

На основі аналізу літературних джерел пов'язаних з стерилізацією томатопродуктів можна зробити висновок що в існуючих системах управління відсутні функції, які забезпечують підвищення техніко-економічних показників процесу стерилізації томатопродуктів, в умовах дії нестационарних координатних та параметричних збурень. Існуючі системи не здатні ефективно забезпечити зниження питомих енерговитрат на стерилізацію томатопродуктів, зокрема за рахунок підтримки температури стерилізації соку поблизу нижньої межі регламенту без її порушення. Таким чином, традиційні системи керування стерилізацією мають низку недоліків, таких як невисока точність та тривалий час реакції на збурення.

Вдосконалення САУ процесом стерилізації томатопродуктів у першу чергу повинно бути направлено на зниження питомих енерговитрат (витрат теплової енергії) на стерилізацію за рахунок реалізації функції гарантуючого

керування температури стерилізації соку. Впровадження систем гарантуючого управління, які підтримують параметри стерилізаційного процесу на границі нижніх допустимих значень, є актуальним завданням для підвищення ефективності виробництва.

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

Результати дослідження різних алгоритмів керування можуть бути використані у науково-дослідницькій роботі НДР кафедри автоматизації технологічних процесів та робототехнічних систем ОНТУ, за відповідними темами.

Мета і задачі дослідження.

Розробка САК технологічного процесу стерилізації томато-продуктів що забезпечує зниження питомих енерговитрат при реалізації процесу, за рахунок застосування інтелектуальних алгоритмів керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- Провести аналіз існуючих систем керування процесами стерилізації томато-продуктів;
- Розробити САК підвищеної динамічної точності з реалізацією функції гарантуючого керування процесами;
- Розробити САК з використанням нейронного регулятора та САК з регулятором на нечіткій логіці;
- Провести порівняльний аналіз ефективності розроблених САК шляхом їх імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження: Системи керування процесами стерилізації томатного соку.

Предмет дослідження: Моделі та алгоритми системи автоматичного керування процесом стерилізації томат-продуктів.

Методи дослідження базуються на теорії автоматичного керування, теорії багатоконтурних систем керування та систем гарантуючого керування, а також теорії нечіткої логіки, нейромережових систем і імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше формалізовано алгоритм нейромережевого керування процесами стерилізації томатного соку на основі задачі нечіткого керування;
- отримала подальший розвиток методика перетворення нечіткого регулятора до нейромережевого алгоритму керування на основі дослідження процесу керування стерилізації томатного соку;
- розроблено модель автоматичної системи з функціями гарантуючого керування, яка забезпечує ефективний режим функціонування відповідної установки з стерилізації томатного соку.

Практичне значення отриманих результатів.

Матеріали досліджень відповідної магістерської роботи можуть бути використані в наступних дипломних проектах і магістерських роботах за відповідною темою пов'язаною з стерилізації томатного соку.

Результати дослідження можуть бути безпосередньо впроваджені на підприємствах харчової промисловості для підвищення ефективності процесу стерилізації томатопродуктів. Вдосконалені алгоритми керування, розроблені на основі штучних нейронних мереж та системи гарантуючого керування на нижніх допустимих межах, забезпечують мінімізацію енерговитрат і стабільність процесу. Це дозволить знизити виробничі витрати, покращити якість та безпеку продукції, а також оптимізувати використання ресурсів.

Особистий внесок здобувача: У роботі був проведений літературний пошук та систематизація зібраної інформації. Розроблено структуру та визначено основні функції створюваної системи автоматичного регулювання. Проведено аналіз чинників, що впливають на технологічний процес стерилізації томатопродуктів, розроблені математичні моделі процесу як ОК. Розроблені варіанти САК з нечітким регулятором, нейронним регулятором та САК с функцією гарантування. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СТЕРИЛІЗАЦІЇ ТОМАТОПРОДУКТІВ І ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Опис технологічного процесу та його особливості

Суть технологічного процесу стерилізації соку в перетворенні нестерилізованого соку під впливом гріючої пари, гарячої води та охолоджуючої води у стерилізований та охолоджений томатний сік. Технологічний процес реалізується в трубчастому стерилізаторі. Технологічна схема процесу наведена на рис. 1.1.

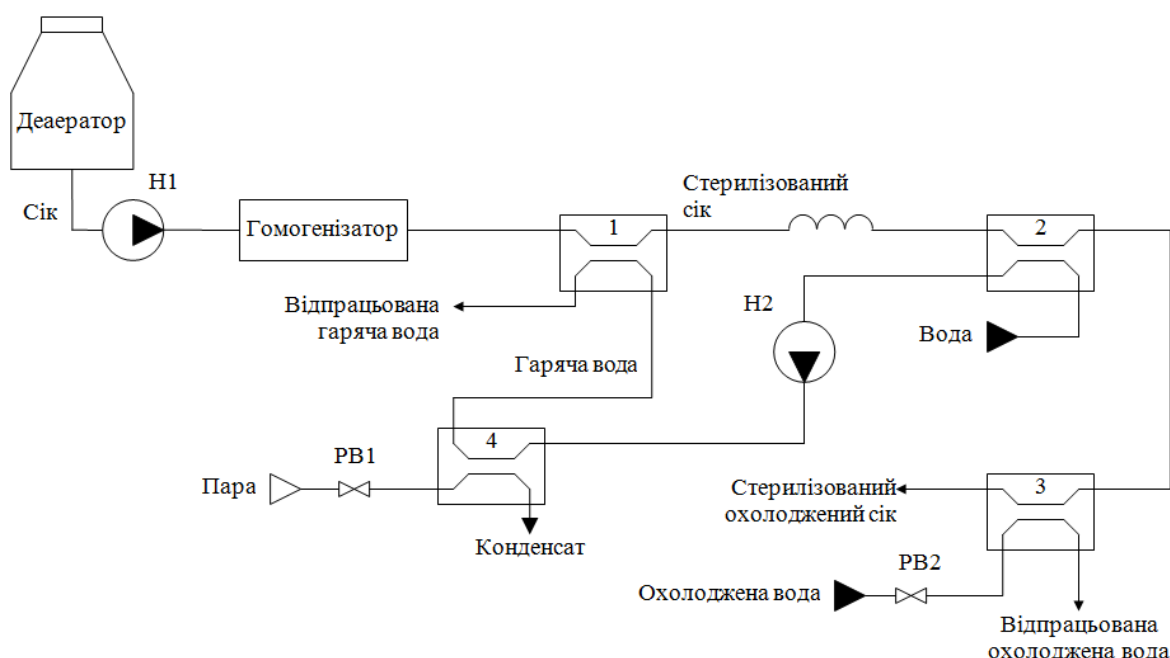


Рис. 1.1 – Технологічна схема стерилізації томатного соку

Стерилізація томатного соку, тобто знешкодження мікроорганізмів, проводиться шляхом його термічної обробки при температурі 107°C на протязі 60 секунд.

Стерилізаційна установка включає в себе накопичувальну ємність для соку, проміжну ємність для води системи обігрівання, 8 теплообмінників, деаератор, гомогенізатор, філер, циркуляційні насоси. Але на рис. 1.1 показано ділянку технологічного процесу від деаератора до розфасовки, де і

здійснюється основний процес стерилізації та охолодження соку.

Деаерований сік з деаератора надходить в гомогенізатор, де під тиском перетворюється в однорідну масу дуже мілких частинок, питома поверхня яких така, що у подальшому сік не розшаровується.

З виходу гомогенізатора сік насосом Н1 під тиском 0,4...0,5 МПа та з температурою 65⁰С надходить до теплообмінника 1, де він нагрівається до температури 107⁰С і потрапляє до трубчастого витримувача, по якому рухається і стерилізується на протязі 60 секунд. Простерилізований сік поступає в секцію рекуперації 2, де охолоджується до температури 40⁰С, а потім до секції охолодження 3, де охолоджується до температури 25⁰С. Надалі охолодження яблучний сік надходить на лінію розливання.

У якості проміжного енергоносія використовується вода. Тиск води в системі на означеній ділянці створюється циркуляційним насосом Н2. На ділянці вода проходить секцію рекуперації 2 та секцію підігрівання 4, де підігрівається парою. Надалі гаряча вода віддає частину свого тепла соку в секції стерилізації 1 та повертається в систему.

1.2 Параметризація схеми технологічного процесу й загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей

Технологічний процес стерилізації соку є тепловим процесом, пов'язаним з передачею тепла від гріючої пари через гарячу воду до соку. Важливою умовою нормального функціонування технологічного процесу є заповнення теплообмінника продуктом а системи обігрівання водою. Проведемо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на рис. 1.2.

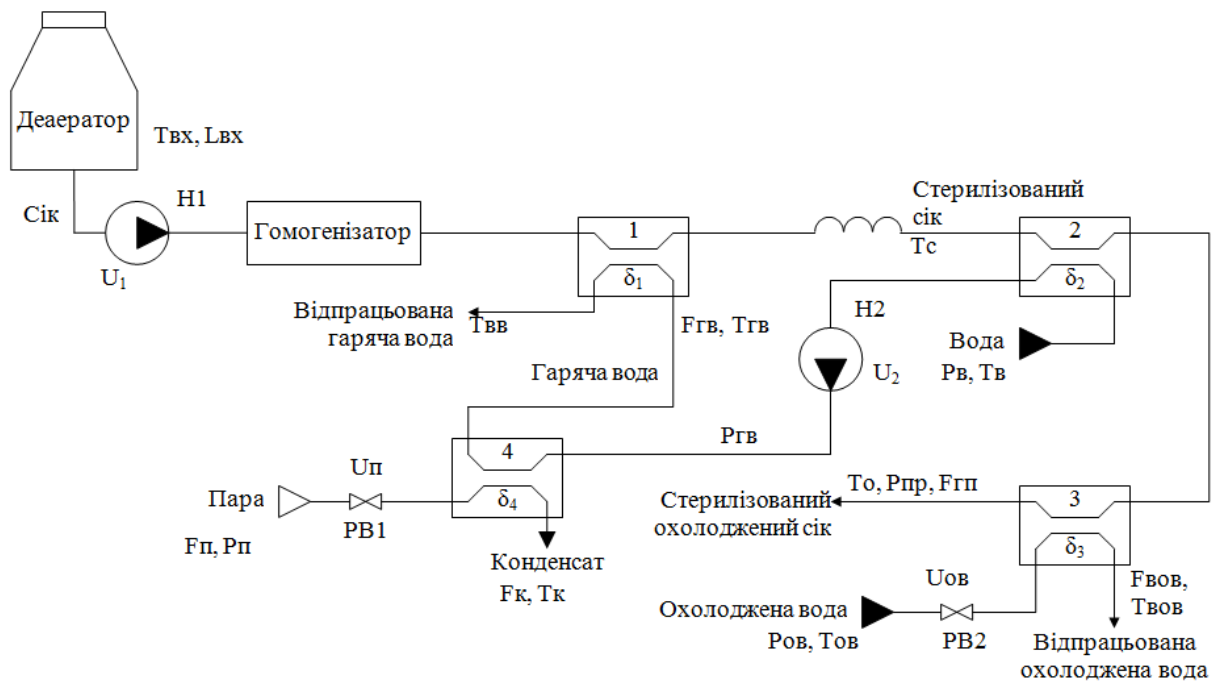


Рис. 1.42 – Параметризована технологічна схема процесу стерилізації томато-продуктів

Параметри на схемі:

$T_{вх}$ – температура соку на вході;

$L_{вх}$ – рівень соку в деаераторі;

U_1 – ввімкнення насосу $H1$;

T_c - температура стерилізації соку;

T_o – температура охолодження соку;
 $P_{пр}$ – тиск соку на виході з охолоджувача;
 $F_{гп}$ – витрати готового продукту;
 U_2 – ввімкнення насосу H_2 ;
 $U_{п}$ – положення регулюючого органу подачі пари;
 $U_{ов}$ – положення регулюючого органу подачі охолоджуючої води;
 $F_{п}$ – витрати пари;
 $P_{п}$ – тиск пари в паропроводі;
 $F_{к}$ – витрати конденсату;
 $T_{к}$ – температура конденсату;
 $P_{в}$ – тиск води на вході в систему обігрівання;
 $T_{в}$ – температура води на вході в систему обігрівання;
 $P_{гв}$ – тиск гарячої води;
 $F_{гв}$ – витрати гарячої води;
 $T_{гв}$ температура гарячої води;
 $T_{вв}$ - температура відпрацьованої води;
 $P_{ов}$ – тиск охолодженої води;
 $T_{ов}$ – температура охолодженої води;
 $F_{ов}$ – витрати відпрацьованої охолодженої води;
 $T_{ов}$ – температура відпрацьованої охолодженої води;
 $\delta_1 \delta_2 \delta_3 \delta_4$ – ступінь засміченості теплообмінників.

Основу нормативів складають три основних регламенти.

Технологічний регламент – Для технологічного процесу стерилізації томатного соку такими параметрами є температура стерилізації соку (T_c), температура охолодження соку (T_o), витрати гарячої води ($F_{гв}$), температура гарячої води ($T_{гв}$).

Експлуатаційний регламент – Для стерилізатора соку такими параметрами є тиск соку на виході з охолоджувача ($P_{пр}$), тиск гарячої води ($P_{гв}$).

Техніко-економічний і екологічний регламент - До цієї групи параметрів для процесу стерилізації томатного соку можна віднести витрати готового продукту ($F_{гп}$), витрати пари ($F_{п}$), витрати конденсату ($F_{к}$), температура конденсату ($T_{к}$), температура відпрацьованої води ($T_{вв}$), витрати відпрацьованої охолодженої води ($F_{вов}$), температура відпрацьованої охолодженої води ($T_{вов}$).

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

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі ($t \geq \Psi$)	Короткочасні ($0 < t < \Psi$)	
				величина	величина	час, сек
Температура стерилізації соку	T_c	$^{\circ}\text{C}$	107	± 2	5	60
Температура охолодження соку	T_o	$^{\circ}\text{C}$	25	$\pm 0,5$	± 2	60

Сировинні параметри - температура соку на вході ($T_{вх}$) та рівень соку в деаераторі ($L_{вх}$).

Енергетичні параметри - тиск пари в паропроводі ($P_{п}$), тиск води на вході в систему обігрівання ($P_{в}$), температуру води на вході в систему обігрівання ($T_{в}$), тиск охолодженої води ($P_{ов}$) та температуру охолодженої води ($T_{ов}$).

Механічні параметри - ввімкнення насосу Н1 (U_1), ввімкнення насосу Н2 (U_2), положення регулюючого органу подачі пари ($U_{п}$), положення регулюючого органу подачі охолоджуючої води ($U_{ов}$), ступінь засміченості теплообмінників ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$).

Параметрична схема процесу стерилізації томатного соку наведена на рис. 1.3.

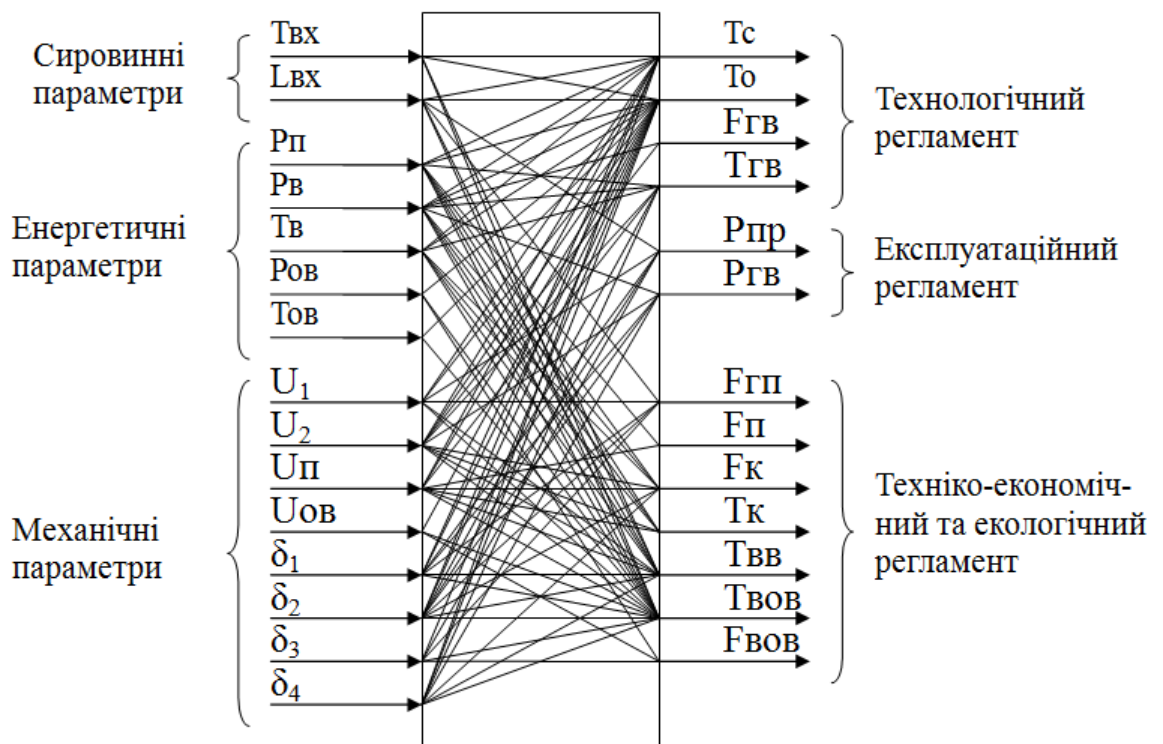


Рис. 1.3 – Параметрична схема процесу стерилізації томатного соку

1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкту керування

Для процесу стерилізації яблучного соку в якості регульованих координат доцільно обрати температуру стерилізації соку T_c та температуру його охолодження T_o . Для підвищення динамічної точності регулювання температури стерилізації в якості проміжної точки в ОК доцільно використовувати температуру гарячої води $T_{гв}$.

Для процесу стерилізації соку до управляючих дій доцільно віднести положення регульовального органу, що дроселює потік пари на теплообмінник (U_p) та положення регульовального органу, що дроселює потік охолоджуючої води ($U_{ов}$).

Для процесу стерилізації соку до контрольованих збурень доцільно віднести тиск пари в паропроводі P_p . Всі інші вхідні дії, крім управляючої дії і контрольованого збурення, віднесемо до неконтрольованих збурень. Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до управляючих дій, а стохастичну складову – до регульованої координати.

Структурна схема процесу стерилізації соку наведена на рис. 1.4.

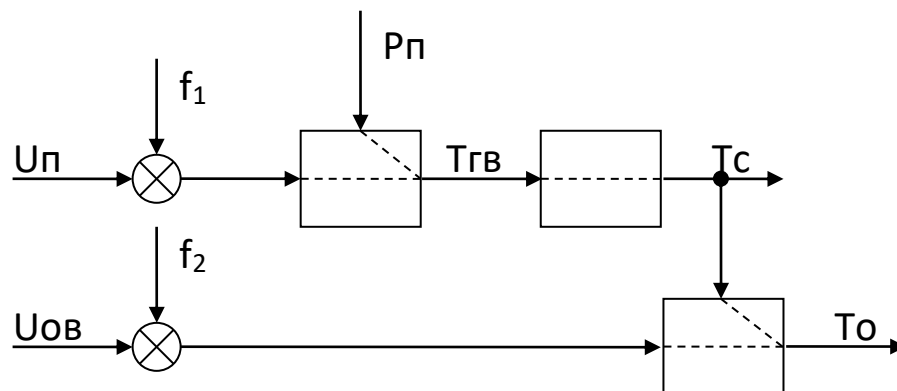


Рис. 1.4 – Структурна схема процесу стерилізації яблучного соку як об'єкту регулювання

Позначення параметрів на схемі:

T_c - температура стерилізації соку;

T_o – температура охолодження соку;

$T_{гв}$ – температура гарячої води;

U_p – положення регулюючого органу подачі пари;

$U_{ов}$ – положення регулюючого органу подачі охолоджуючої води;

P_p – тиск пари в паропроводі;

f_1, f_2 – вектори неконтрольованих збурень.

1.4 Ідентифікація моделей каналів перетворення координатних дій об'єкту керування

Ідентифікацію комплексу моделей каналів керування проведемо на основі даних активного експерименту.

Результати активних експериментів наведено на рис. 1.5...1.8.

Таблиця 1.2 – Результати експериментів для визначення статичних характеристик ОК за каналами «Уп – Т_{гв}», «Уп – Т_с» і «Уп – Т_о»

Уп, %х.р.о.	Т _{гв} , °С	Т _с , °С	Т _о , °С
0	75	65	15
55	123	101	24
65	130	107	25
75	135	112	25,5
85	138	115	26
100	140	116	26,3

Таблиця 1.3 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «У_{ов} – Т_о»

У _{ов} , %х.р.о.	Т _о , °С	У _{ов} , %х.р.о.	Т _о , °С
0	85	70	23
30	40	80	22
50	27	90	21
60	25	100	20

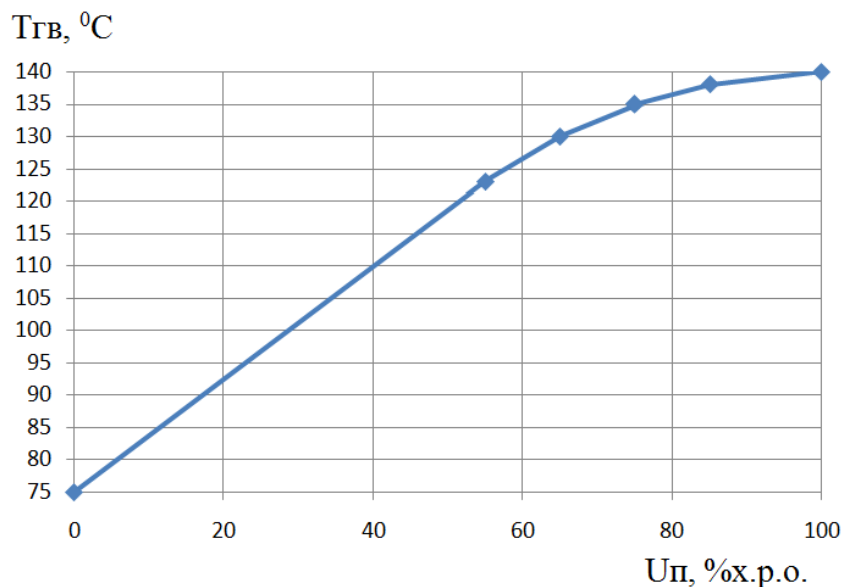


Рис. 1.5 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «Уп – Тгв»

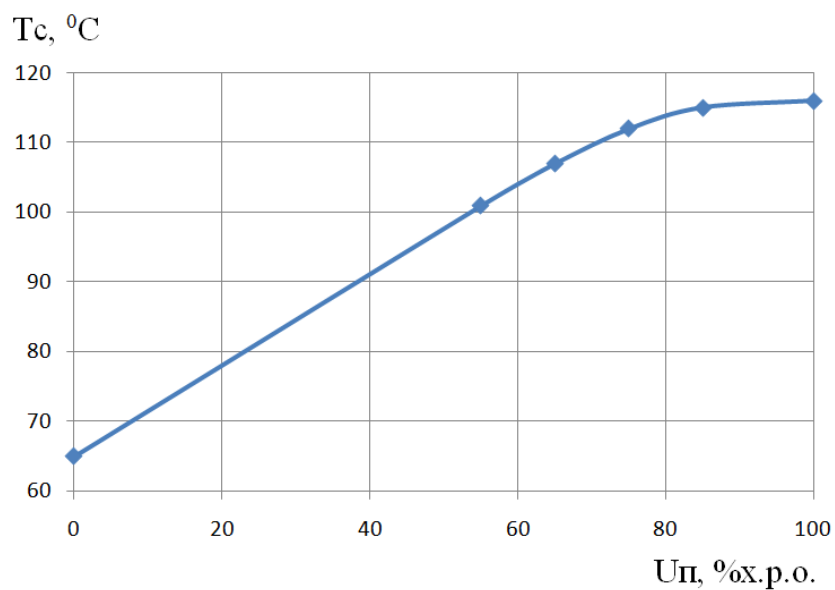


Рис. 1.6 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «Уп – Тс»

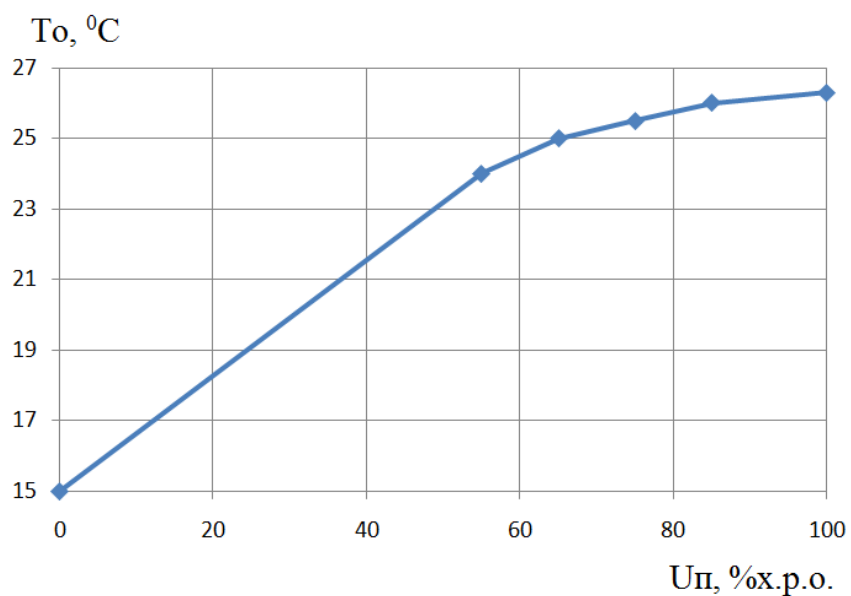


Рис. 1.7 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «Уп – То»

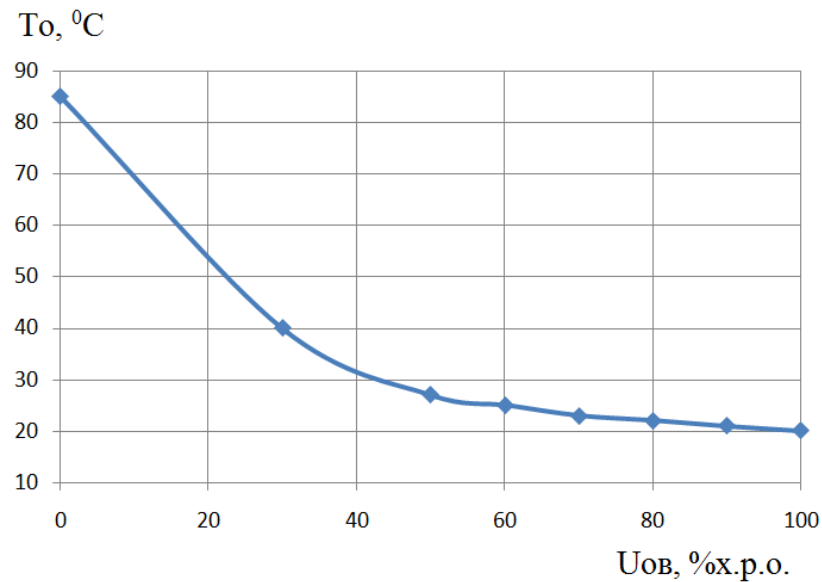


Рис. 1.8 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «Uov – To»

За результатами активних експериментів (рис. 1.5...1.8) можна зробити висновок, що за каналами керування ОК має властивість самовирівнювання, а значить його моделі можуть бути описані передаточними функціями: першого та другого порядку:

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

Канал «Un – Tгв»

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta \hat{T}_{гв}}{\Delta U_{гв}} = \frac{130 - 123}{65 - 55} = 0,7 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{x.p.o.}$$

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

Для моделі 1-го порядку

$$\square T_{гв 1,0} = 130 - 123 = 7^\circ\text{C};$$

$$T_{гв 0,33} = 0,33 \cdot 7 + 123 = 125,31^\circ\text{C};$$

$$T_{гв 0,7} = 0,7 \cdot 7 + 123 = 127,9^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.8), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 12,61c;$$

$$t_{0,7} = 18,28c.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 12,61 - 18,28) = 9,8c$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (18,28 - 9,8) / 1,2 = 7,1c$$

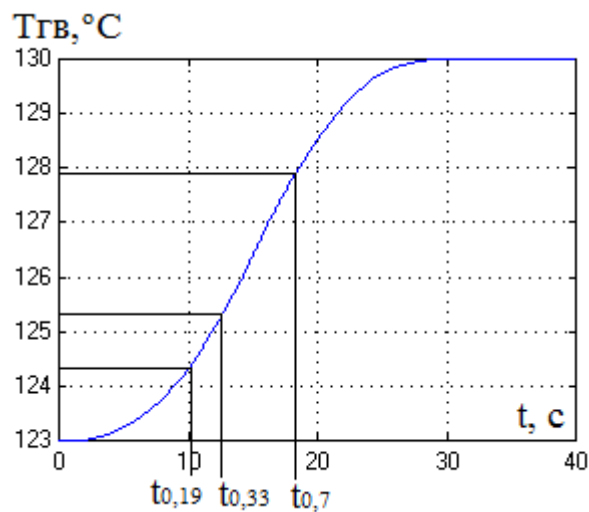


Рис. 1.8– Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом «Уп – Т_{ГВ}»

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

$$W_0(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-9,8p}}{7,1p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку

$$T_{ГВ\ 0,19} = 0,19 \cdot 7 + 123 = 124,33^{\circ}C;$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.8), знаходимо $t_{0,19}$.

$$t_{0,19} = 10,08c.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 10,08 - 18,28) = 6c$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (18,28 - 6) / 2,4 = 5,1c$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-6p}}{(5,1p + 1)^2}$$

Канал «Un – Tc»

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta \dot{Q}_c}{\Delta U \dot{i}} = \frac{107 - 101}{65 - 55} = 0,6 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{х.р.о.}$$

Для моделі 1-го порядку

$$\square T_{c1,0} = 107 - 101 = 6^\circ\text{C};$$

$$T_{c0,33} = 0,33 \cdot 6 + 101 = 102,98^\circ\text{C};$$

$$T_{c0,7} = 0,7 \cdot 6 + 101 = 105,2^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.9), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

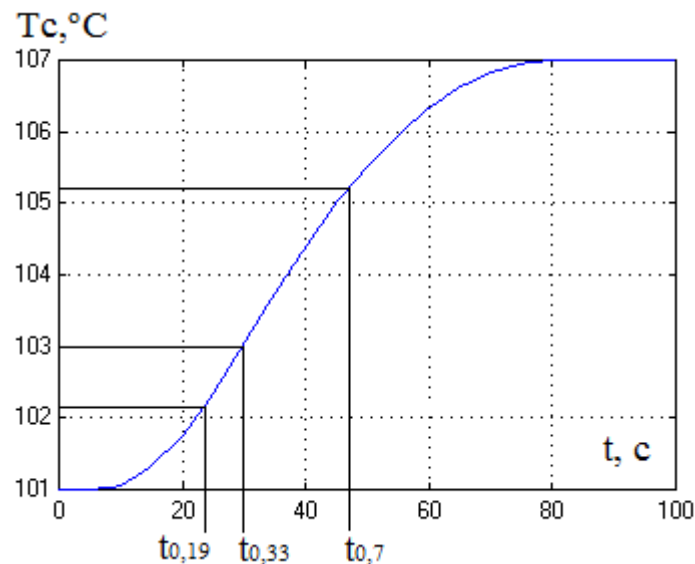


Рис. 1.9 – Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом «Уп – Tc»

$$t_{0,33} = 29,5\text{с};$$

$$t_{0,7} = 46,75\text{с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 29,5 - 46,75) = 20,9\text{с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (46,75 - 20,9) / 1,2 = 21,6\text{с}$$

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

$$W_0(p) = \frac{0,6 \cdot e^{-20,9p}}{21,6p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку

$$T_{c0,19} = 0,19 \cdot 6 + 101 = 102,14^{\circ}\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.9), знаходимо $t_{0,19}$.

$$t_{0,19} = 23,25\text{c}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 23,25 - 46,75) = 11,5\text{c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (46,75 - 11,5) / 2,4 = 14,7\text{c}$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{0,6 \cdot e^{-11,5p}}{(14,7p + 1)^2}$$

Канал «Un – To»

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta \dot{Q}_o}{\Delta U_i} = \frac{25 - 24}{65 - 55} = 0,1 \text{ } ^{\circ}\text{C} / \% \text{х.р.о.}$$

Для моделі 1-го порядку

$$\square T_{o1,0} = 25 - 24 = 1^{\circ}\text{C};$$

$$T_{o0,33} = 0,33 \cdot 1 + 24 = 24,33^{\circ}\text{C};$$

$$T_{o0,7} = 0,7 \cdot 1 + 24 = 24,7^{\circ}\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.10), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

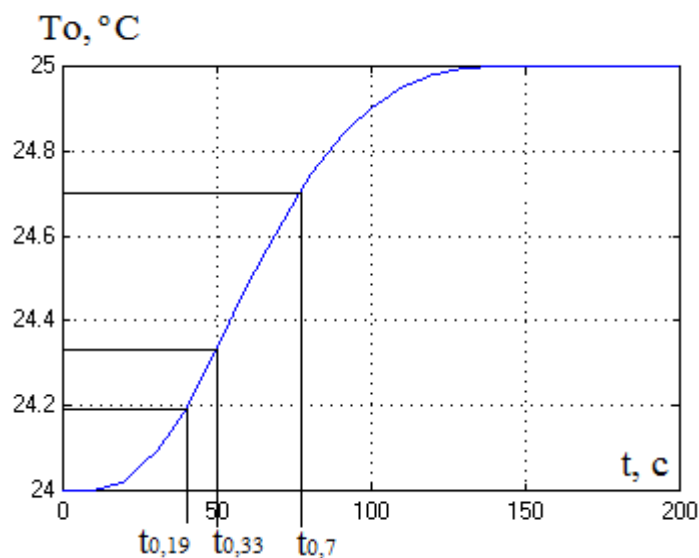


Рис. 1.10 – Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом «Уп – То»

$$t_{0,33} = 49,31\text{с};$$

$$t_{0,7} = 76,4\text{с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 49,31 - 76,4) = 35,8\text{с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (76,4 - 35,8) / 1,2 = 33,8\text{с}$$

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

$$W_0(p) = \frac{0,1 \cdot e^{-35,8p}}{33,8p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку

$$T_{0,19} = 0,19 \cdot 1 + 24 = 24,19^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.10), знаходимо $t_{0,19}$.

$$t_{0,19} = 39,52\text{с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 39,52 - 76,4) = 21,1\text{с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (76,4 - 21,1) / 2,4 = 23\text{с}$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{0,1 \cdot e^{-21,1p}}{(23p+1)^2}$$

Канал «Uов – To»

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta \dot{O}_o}{\Delta U_{\hat{a}}} = \frac{23-24}{70-65} = -0,2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{ } \% \text{х.р.о.}$$

Для моделі 1-го порядку

$$\square T_{o,1,0} = 23 - 24 = -1^\circ\text{C};$$

$$T_{o,0,33} = 0,33 \cdot -1 + 24 = 23,67^\circ\text{C};$$

$$T_{o,0,7} = 0,7 \cdot -1 + 24 = 23,3^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.11), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

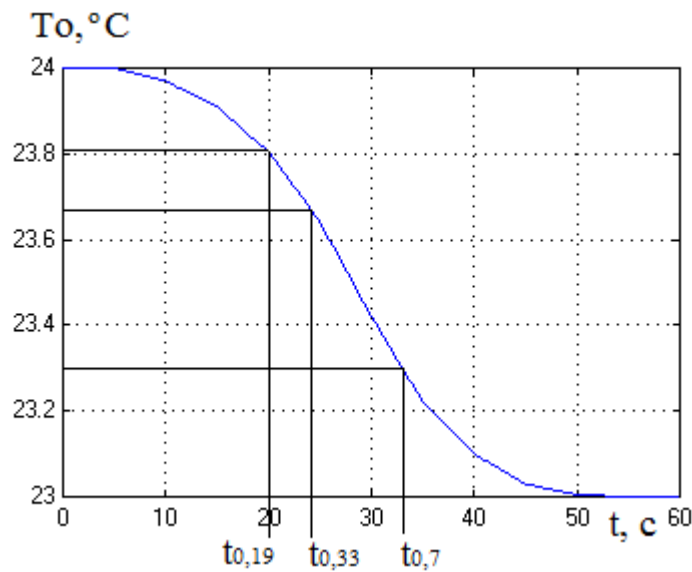


Рис. 1.11– Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом «Uов – To»

$$t_{0,33} = 24,09\text{c};$$

$$t_{0,7} = 33\text{c}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 24,09 - 33) = 19,6\text{c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (33 - 19,6) / 1,2 = 11,2\text{c}$$

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

$$W_0(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-19,6p}}{11,2p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку

$$T_{0,19} = 0,19 \cdot -1 + 24 = 23,81^{\circ}\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.11), знаходимо $t_{0,19}$.

$$t_{0,19} = 19,76\text{c}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 19,76 - 33) = 13,1\text{c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (33 - 13,1) / 2,4 = 8,3\text{c}$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-13,1p}}{(8,3p + 1)^2}$$

Канал «Т_{гв} – Т_с»

Визначаємо коефіцієнт передачі:

$$k = \frac{k_{U_n - T_c}}{k_{U_n - T_{гв}}} = \frac{0,6}{0,7} = 0,857$$

Результати ідентифікації каналу ОК за моделлю 1-го порядку наведено на рис. 1.12, результати ідентифікації каналу ОК за моделлю 2-го порядку наведено на рис. 2.13.

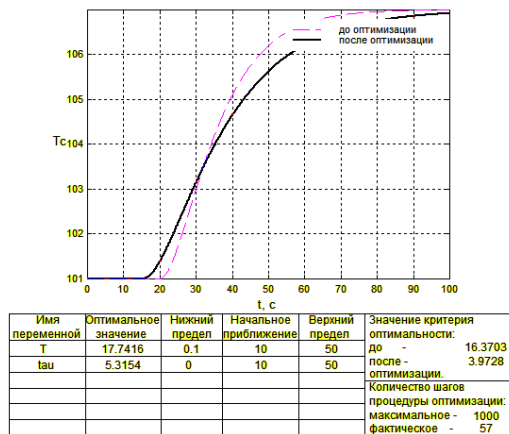


Рис. 1.12– Результати ідентифікації моделі каналу «Тгв – Тс» за моделлю 1-го порядку

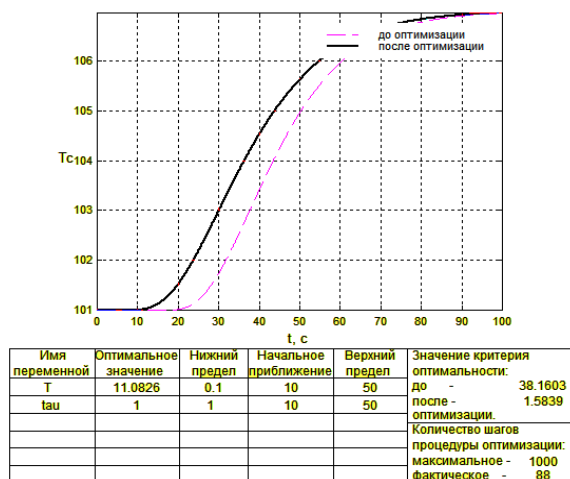


Рис. 1.13– Результати ідентифікації моделі каналу «Тгв – Тс» за моделлю 2-го порядку

Передаточні функції моделей каналу «Тгв – Тс» ОК

Модель 1-го порядку

$$W_0(p) = \frac{\frac{6}{7} \cdot e^{-5,3p}}{17,7\delta + 1}$$

Модель 2-го порядку

$$W_0(p) = \frac{\frac{6}{7} \cdot e^{-1\delta}}{(11,1\delta + 1)^2}$$

Канал «Тс – То»

Визначаємо коефіцієнт передачі:

$$k = \frac{k_{U_n - T_o}}{k_{U_n - T_{26}} \cdot k_{T_{26} - T_c}} = \frac{0,1}{0,7 \cdot \frac{6}{7}} = 0,1666$$

Результати ідентифікації каналу ОК за моделлю 1-го порядку наведено на рис. 1.14, результати ідентифікації каналу ОК за моделлю 2-го порядку наведено на рис. 1.15.

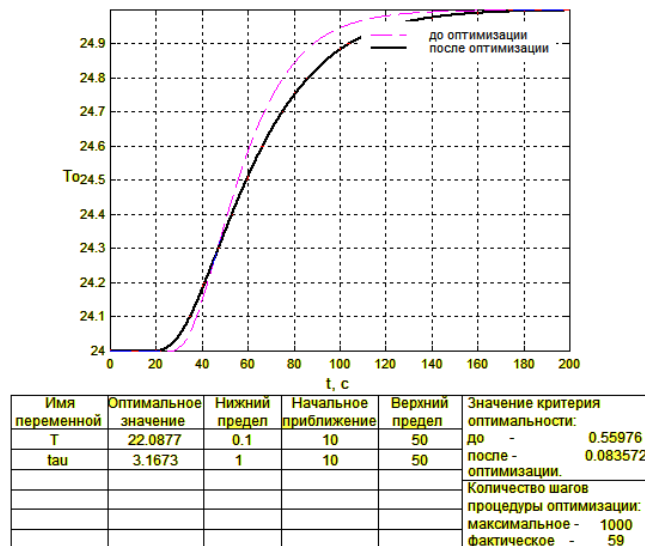


Рис. 1.14 – Результати ідентифікації моделі каналу «Тгв – То» за моделлю 1-го порядку

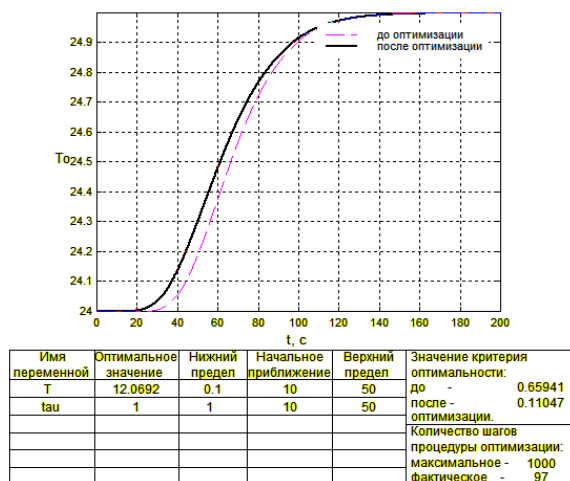


Рис. 1.15 – Результати ідентифікації моделі каналу «Тгв – То» за моделлю 2-го порядку

Передаточні функції моделей каналу «Тс – То» ОК

Модель 1-го порядку

$$W_0(p) = \frac{\frac{1}{6} \cdot e^{-3,2p}}{22,1\delta + 1}$$

Модель 2-го порядку

$$W_0(p) = \frac{\frac{1}{6} \cdot e^{-1\delta}}{(12,1\delta + 1)^2}$$

Генерацію результатів пасивного експерименту буде забезпечувати додаток rgen середовища Матлаб. Результати генерації випадкових процесів, що відповідають сигналу контрольованого збурення та регульованої координати для досліджуваного ОК наведено на рис. 1.16.

Для ідентифікації моделей каналу контрольованих збурень ОК в часовій області будемо використовувати програму IdSoft середовища Матлаб.

Першим етапом ідентифікації є оцінювання математичних очікувань, дисперсій, середньоквадратичних періодів і кількості СКП, що містять реалізації вхідної і вихідної змінних (рис. 1.17), а також оцінки автокореляційної функції (АКФ) вхідного сигналу та взаємної кореляційної функції (ВКФ) вхідного і вихідного сигналів (рис. 1.18).

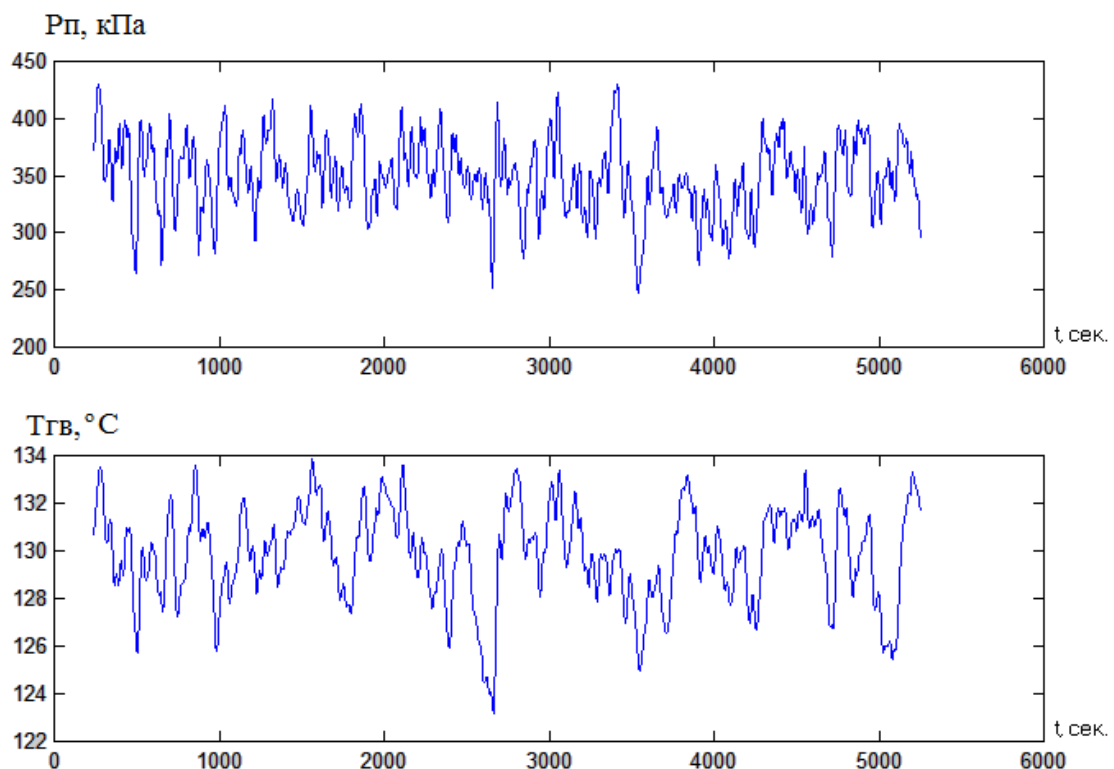


Рис. 1.16 – Результати генерації випадкових процесів, що відповідають сигналам контрольованого збурення та регульованої координати

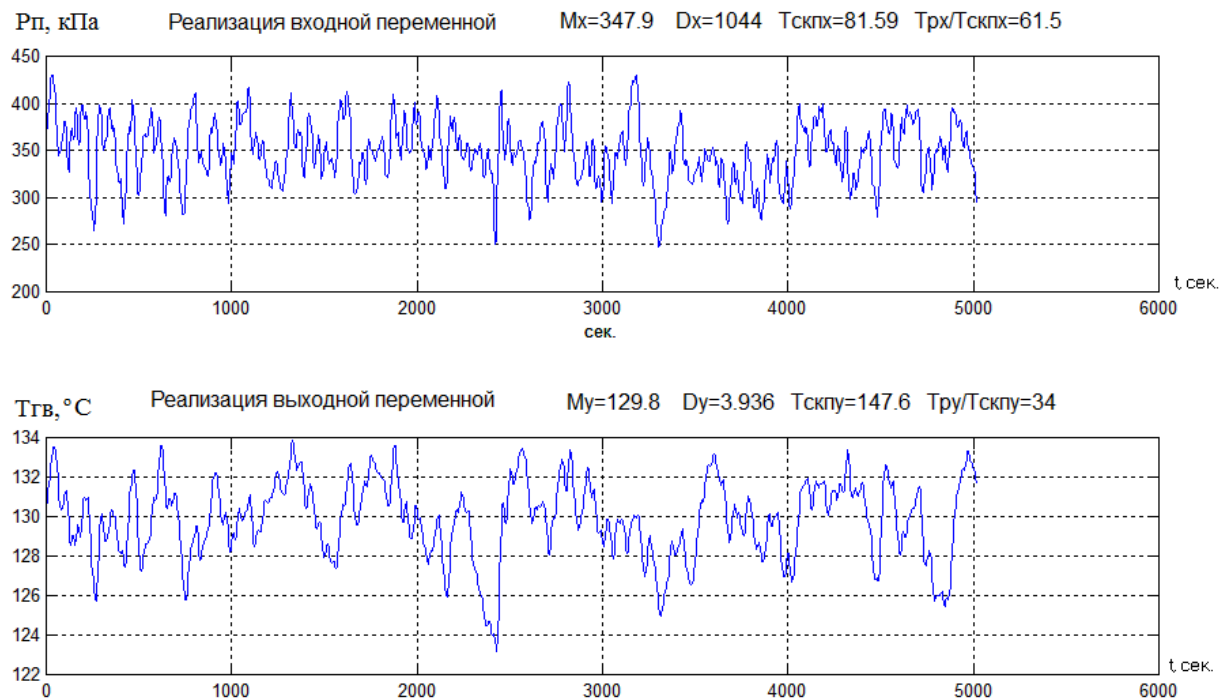


Рис. 1.17 – Результати оцінювання математичних очікувань, дисперсій, середньоквадратичних періодів і кількості СКП, що містять реалізації вхідної і вихідний змінних

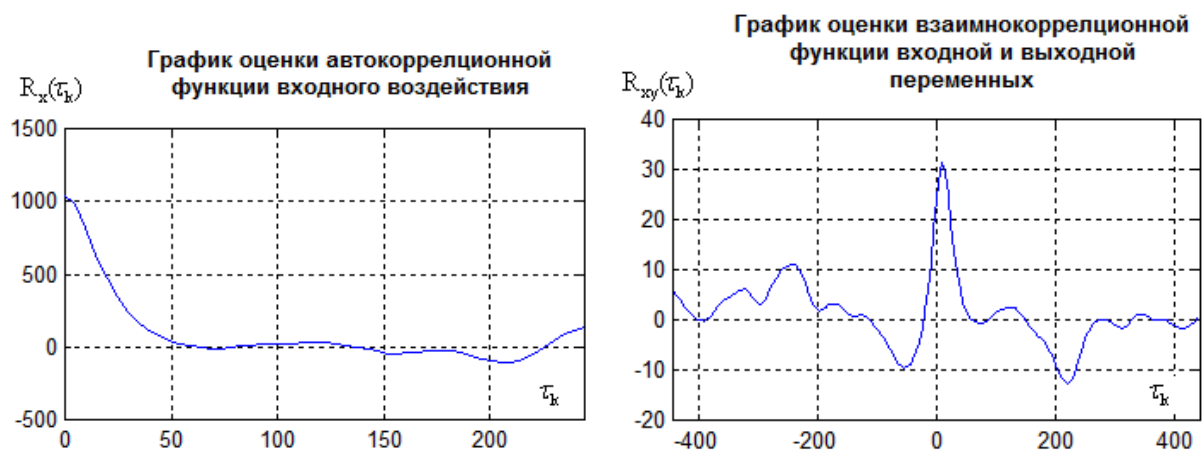


Рис. 1.18 – Результати оцінювання АКФ вхідного сигналу та ВКФ вхідного і вихідного сигналів

Для ідентифікації АКФ запропоновано два варіанти моделі (рис. 1.19).

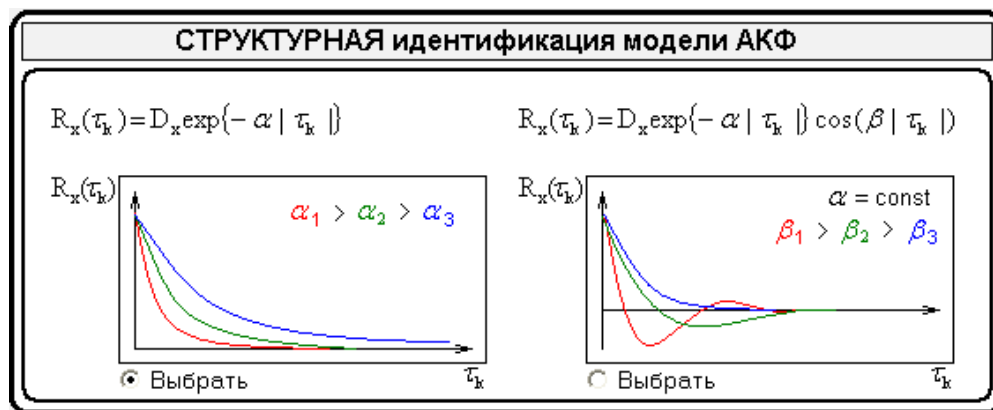


Рис. 1.19 – Структурна ідентифікація моделі АКФ

Результаты параметричной ідентифікації моделі АКФ наведено на рис. 1.20 і 1.21.

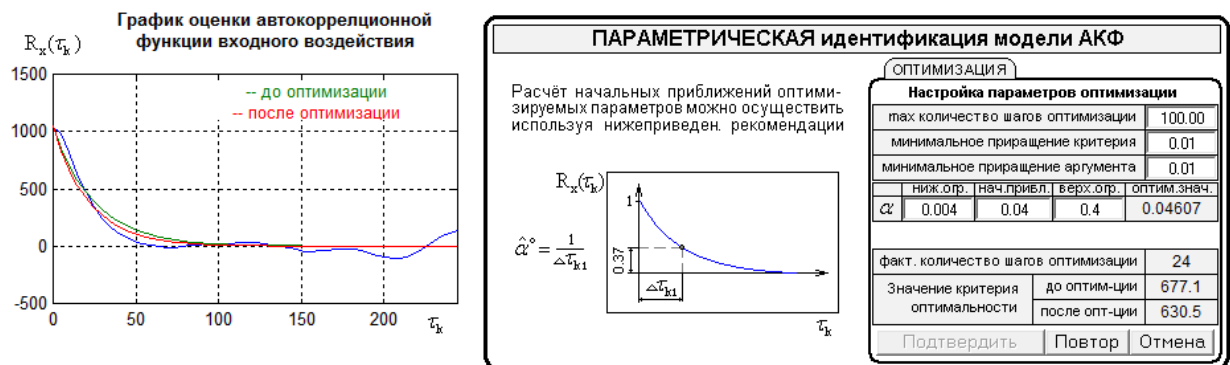


Рис. 1.20 – Результати параметричної ідентифікації моделі АКФ за моделлю №1

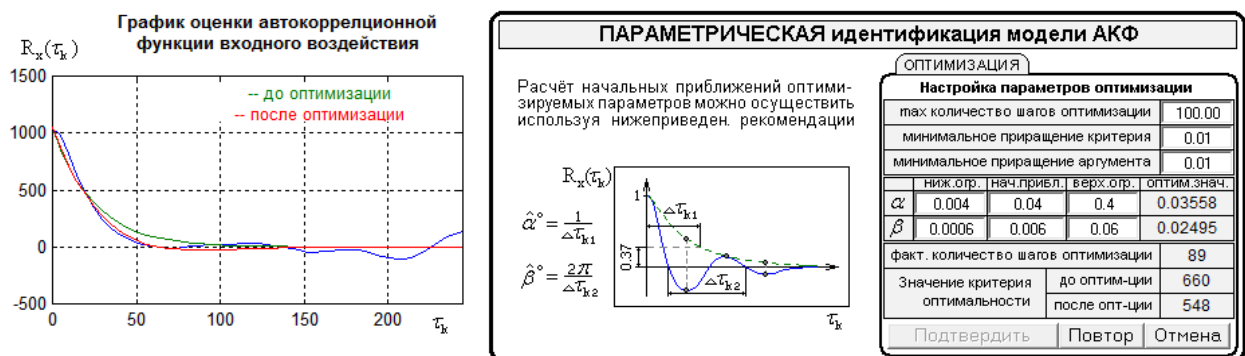


Рис. 1.21 – Результати параметричної ідентифікації моделі АКФ за моделлю №2

Як видно з результатів параметричної ідентифікації моделі АКФ,

точнішою є модель №2, тому що для неї значення критерію оптимальності після оптимізації є меншим, тобто меншим є відхилення моделі АКФ від її оцінки саме для моделі №2. Тому подальшу ідентифікацію будемо проводити саме на базі цієї моделі.

Як видно з рис. 1.22, цей канал має властивість самовирівнювання, а, отже, може бути описаний передаточними функціями:

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

Результати параметричної ідентифікації моделей каналу контрольованого збурення ОК наведені на рис. 1.23 і 1.24.

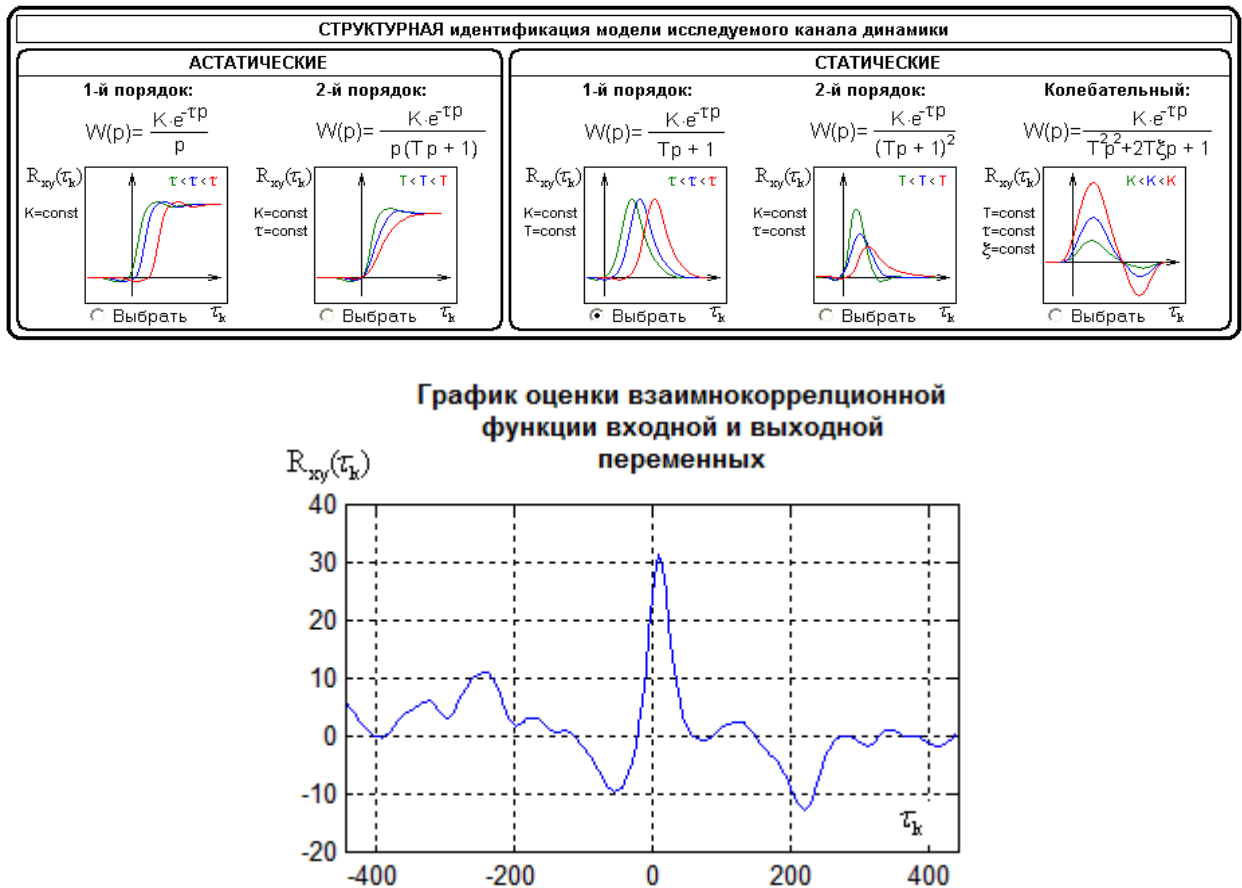


Рис. 1.22 – Структурна ідентифікація моделі каналу контрольованого збурення ОК в часовій області

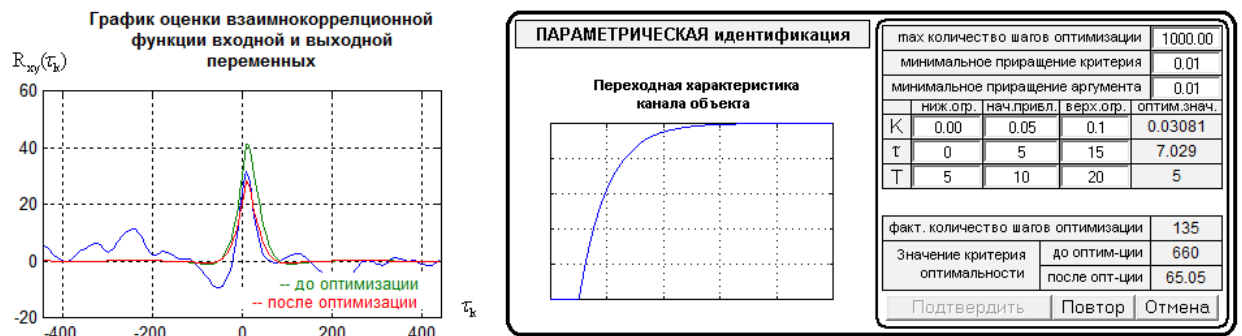


Рис. 1.23 – Результаты параметричної ідентифікації моделі 1-го порядку каналу контрольованого збурення ОК

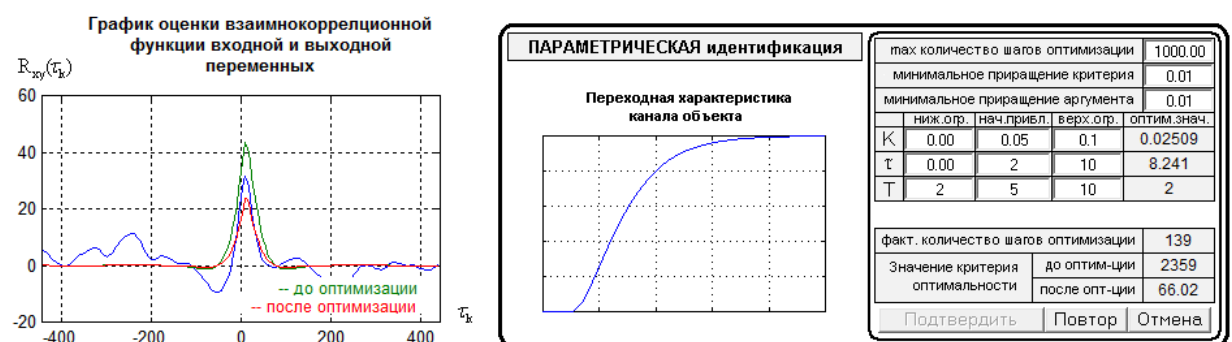


Рис. 1.24 – Результаты параметричної ідентифікації моделі 2-го порядку каналу контрольованого збурення ОК

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

$$W_0(p) = \frac{0,03 \cdot e^{-7p}}{5p + 1}$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК буде мати вид:

$$W_0(p) = \frac{0,025 \cdot e^{-8,2p}}{(2p + 1)^2}$$

Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК зведено в таблицях 1.4 і 1.5 та на рис. 1.25 – 1.28.

Таблиця 1.4 – Результати експериментів для визначення статичних характеристик ОК за каналами «Уп – Т_{ГВ}», «Уп – Т_с» і «Уп – Т_о»

Уп, %х.р.о.	Т _{ГВ} , °С	Т _с , °С	Т _о , °С
0	75	65	15
55	123	101	24
65	130	107	25
75	135	112	25,5
85	138	115	26
100	140	116	26,3

Таблиця 1.5 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «U_{ов} – Т_о»

U _{ов} , %х.р.о.	Т _о , °С	U _{ов} , %х.р.о.	Т _о , °С
0	85	70	23
30	40	80	22
50	27	90	21
60	25	100	20

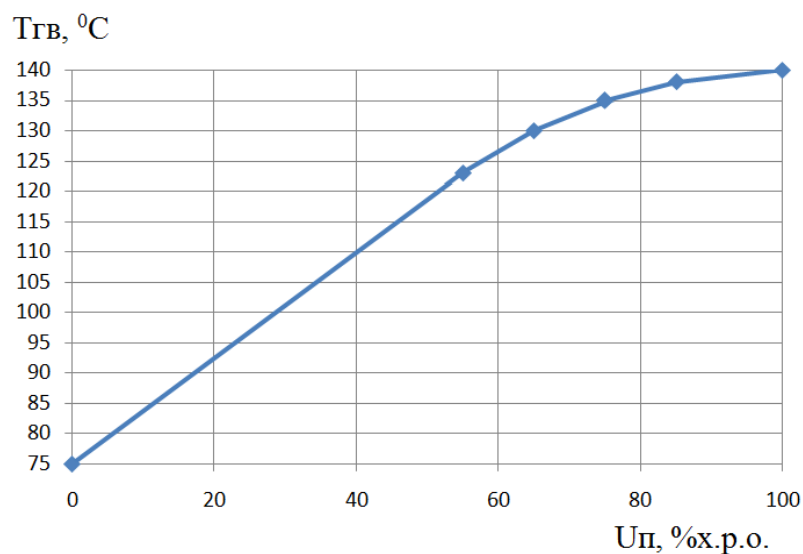


Рис. 1.25 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «Уп – Т_{ГВ}»

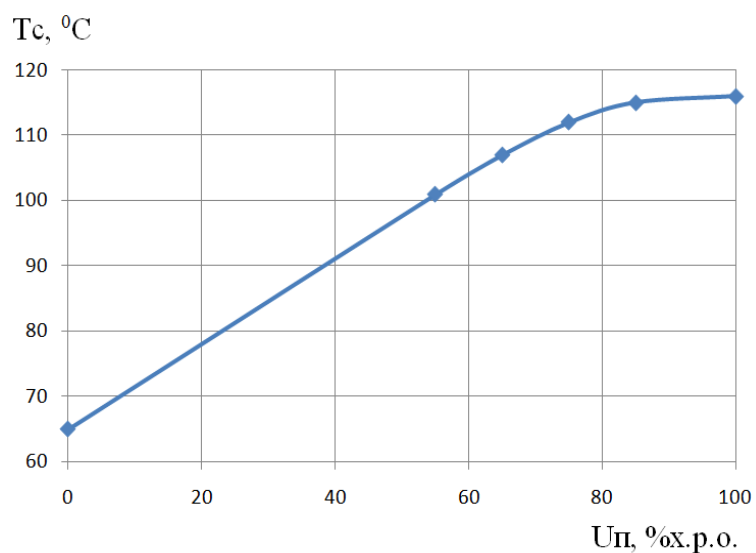


Рис. 1.26 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «Уп – Тс»

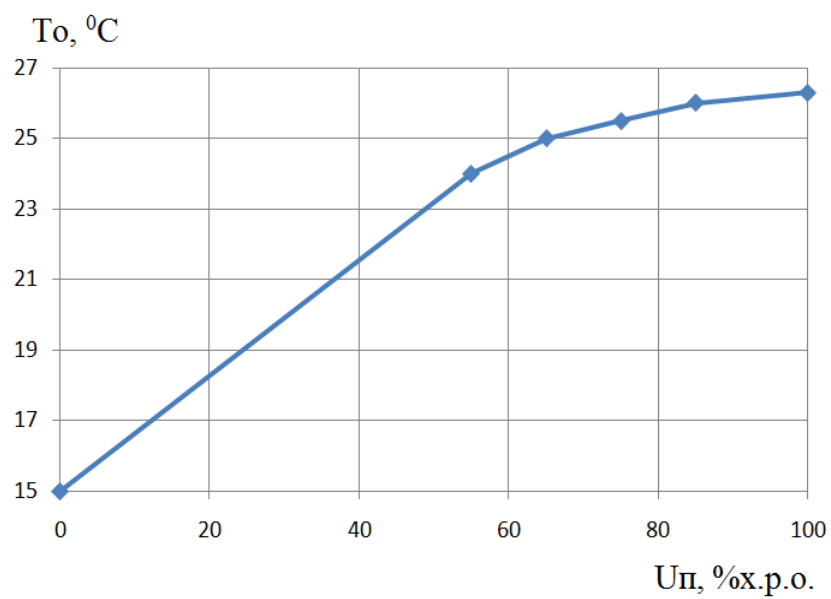


Рис. 1.27 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «Уп – Тo»

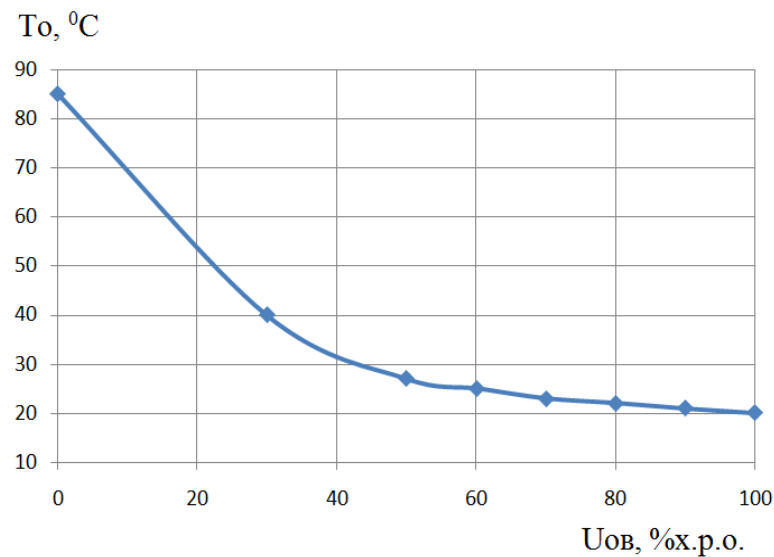


Рис. 1.28 – Результати експерименту для визначення статичної характеристики ОК за каналом «Uов – To»

Результати ідентифікації наведено на рис. 1.29.

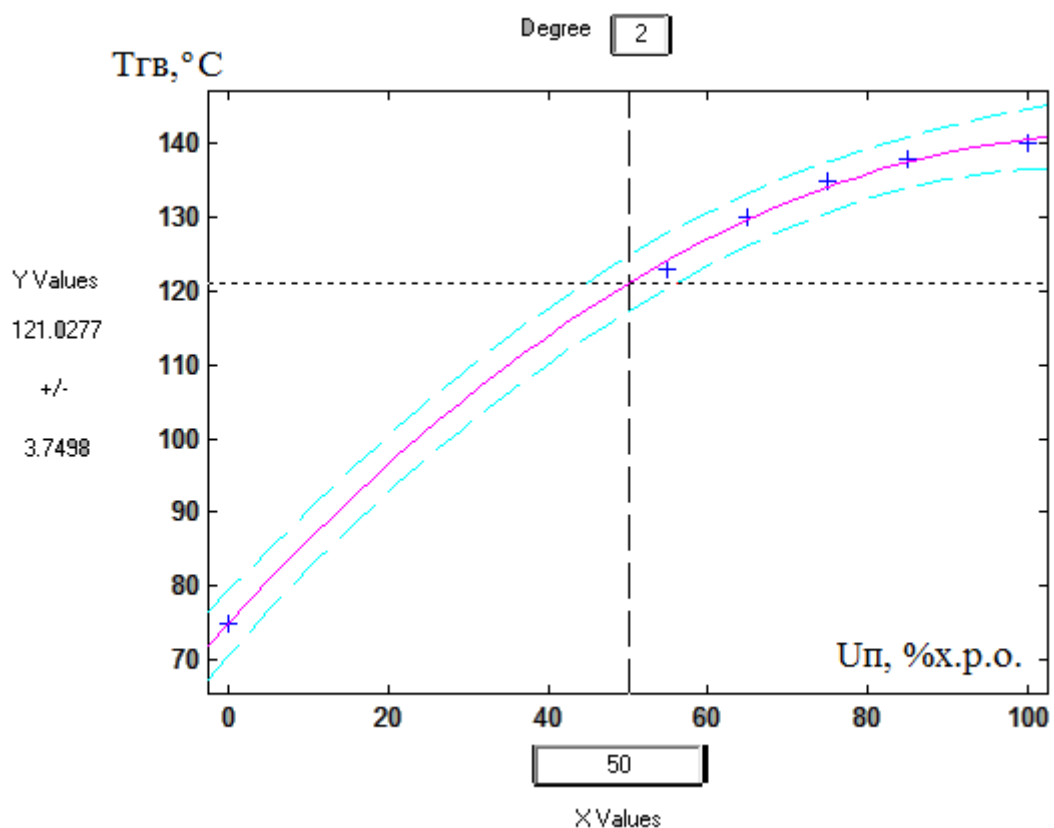


Рис. 1.29 – Результати параметричної ідентифікації моделі статички ОК за Tгв

Для отримання параметрів моделі скористаємося командою `beta`. В результаті виконання команди отримуємо параметри моделі статички ОК:

$a_1 = -0,0053$; $a_2 = 1,1892$; $a_0 + 10,47 = 74,863$; $a_0 = 74,863 - 10,47 = 64,393$ °C.

$$T_{ГВ} = -0,0053 \cdot U_{П}^2 + 1,1892 \cdot U_{П} + 0,03 \cdot P_{П} + 64,393.$$

Для визначення параметрів b_1 , b_2 і b_0 скористаємося процедурою `polytool`. Вихідними даними для ідентифікації будуть дані з таблиці 1.6. При цьому в головному вікні середовища Матлаб вводимо:

`tgV=[75,123,130,135,138,140]`

`tc=[65,101,107,112,115,116]`

Командою `polytool(tgv,tc)` запускаємо процедуру ідентифікації. Результати ідентифікації наведено на рис. 1.30.

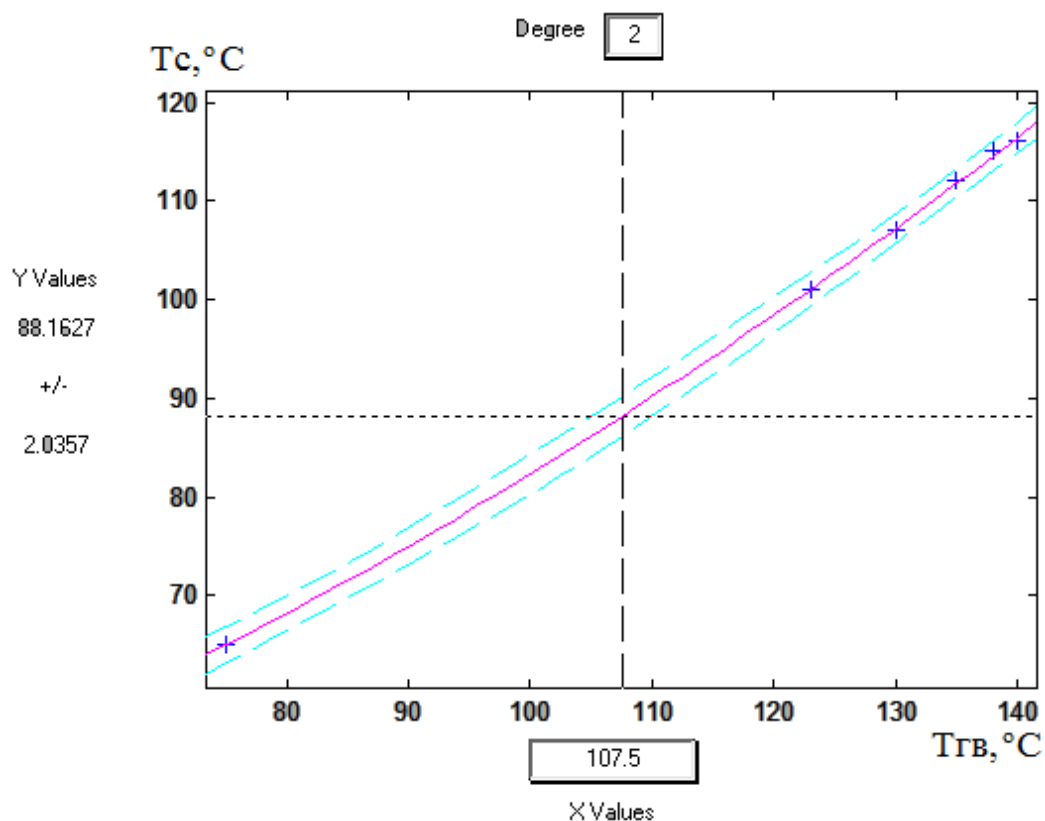


Рис. 1.30 – Результати параметричної ідентифікації моделі статичної частоти ОК за T_c

Для отримання параметрів моделі скористаємося командою `beta`. В результаті виконання команди отримуємо параметри моделі статичної частоти ОК:

$$b_1 = 0,0024; b_2 = 0,2702; b_0 = 31,0895$$
 °C.

$$T_c = 0,0024 \cdot T_{ГВ}^2 + 0,2702 \cdot T_{ГВ} + 31,0895$$

Параметри статичної характеристики за T_o будемо шукати у два етапи.
Статична характеристика у загальному вигляді матиме вид:

$$T_o = c_1 \cdot U_{ОВ}^3 + c_2 \cdot U_{ОВ}^2 + c_3 \cdot U_{ОВ} + c_4 \cdot T_c^2 + c_5 \cdot T_c + c_0.$$

Для знаходження c_1 , c_2 та c_3 скористаємося залежністю:

$$T_o = c_1 \cdot U_{ОВ}^3 + c_2 \cdot U_{ОВ}^2 + c_3 \cdot U_{ОВ} + c_0$$

Визначення параметрів здійснимо процедурою `polytool`. Вихідними даними для ідентифікації будуть дані з таблиці 1.4. При цьому в головному вікні середовища Матлаб вводимо:

`uov=[0,30,50,60,70,80,90,100]`

`to=[85,40,27,25,23,22,21,20]`

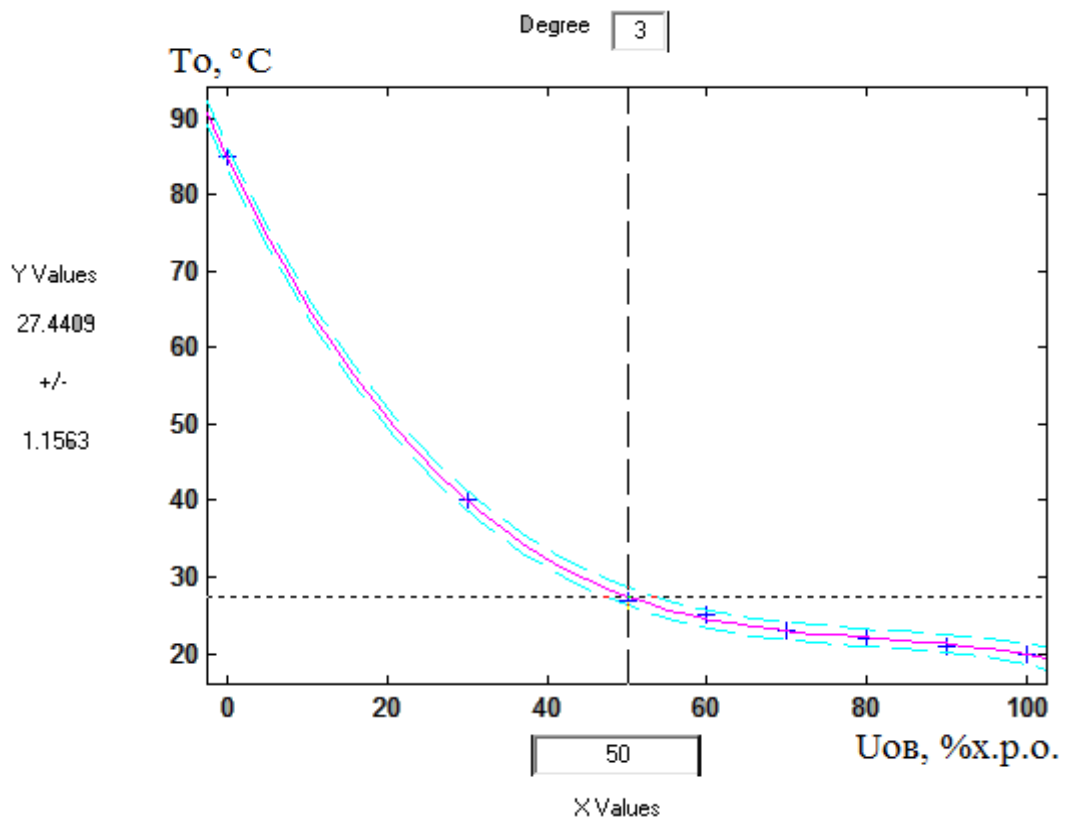


Рис. 1.31 – Результати параметричної ідентифікації моделі статички ОК за T_o

$$c_1 = -0,0001; c_2 = 0,0252; c_3 = -2,1893.$$

Для знаходження c_4 , c_5 та c_0 скористаємося процедурою `polytool`.

Вихідними даними для ідентифікації будуть дані з таблиці 1.5. При цьому в головному вікні середовища Матлаб вводимо:

$tc=[65,101,107,112,115,116]$

$to=[15,24,25,25.5,26,26.3]$

$c_4 = -0,002 \quad c_5 = 0,58$

$To = c_1 \cdot U_{OB}^3 + c_2 \cdot U_{OB}^2 + c_3 \cdot U_{OB} + c_4 \cdot T_{ГВ}^2 + c_5 \cdot T_{ГВ} + c_0;$

$c_1 \cdot U_{OB}^3 + c_2 \cdot U_{OB}^2 + c_3 \cdot U_{OB} + c_0 = -14,4298;$

$c_0 = -14,4298 - c_1 \cdot U_{OB}^3 - c_2 \cdot U_{OB}^2 - c_3 \cdot U_{OB} =$

$= -14,4298 + 0,0001 \cdot 60^3 - 0,0261 \cdot 60^2 + 2,1893 \cdot 60 =$

$= -14,4298 + 21,6 - 93,96 + 131,358 = 48,7^\circ\text{C}$

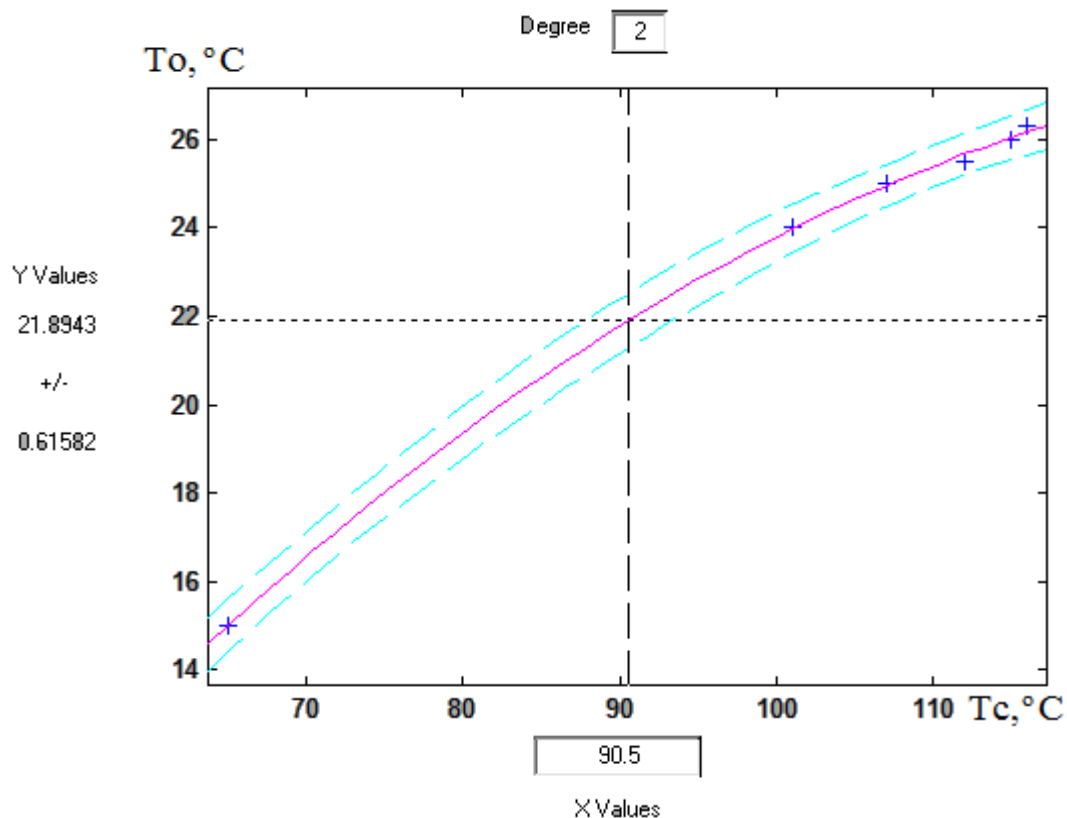


Рис. 1.32 – Результати параметричної ідентифікації моделі статички ОК за To

Отже:

$To = -0,0001 \cdot U_{OB}^3 + 0,0252 \cdot U_{OB}^2 - 2,2 \cdot U_{OB} - 0,002 \cdot Tc^2 +$
 $+ 0,58 \cdot T_{ГВ} + 48,7;$

Для лінійної моделі статички параметри c_1 та c_2 ми визначили раніше в процесі ідентифікації моделей динаміки каналів « $U_{ов} - T_{о}$ » та « $T_{гв} - T_{о}$ »: $c_1 = -0,2^{\circ}\text{C} / \% \text{x.p.o.}$; $c_2 = 1/7$. Для знаходження c_0 скористаємося залежністю:

$$c_0 = T_o - c_1 \cdot U_{ов} - c_2 \cdot T_{гв} = 25 + 0,2 \cdot 60 - 1/7 \cdot 130 = 25 + 12 - 18,57 = 18,43^{\circ}\text{C}.$$

$$T_o = -0,2 \cdot U_{ов} + 1/7 \cdot T_{гв} + 18,43.$$

1.5 Ідентифікація моделей збурень об'єкту керування

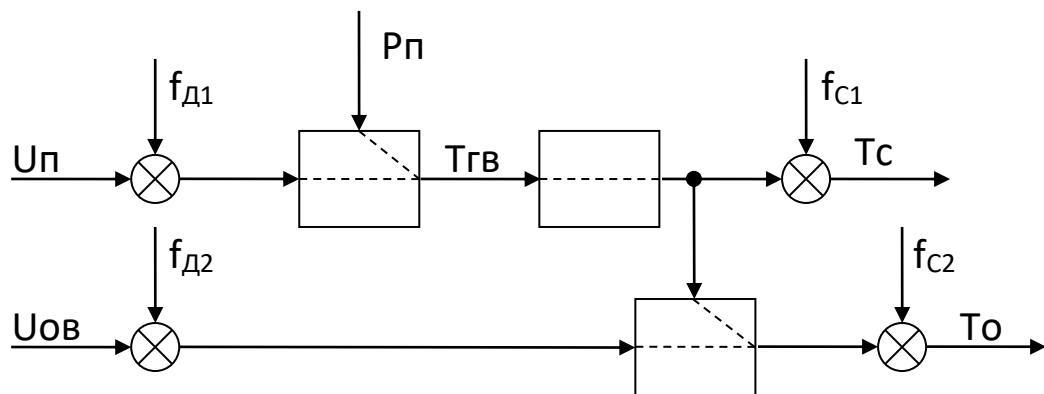


Рис. 1.33 – Структурна схема додавання координатних збурень

Ідентифікацію моделей детермінованих і випадкових складових координатних збурень будемо проводити статистичними методами за результатами пасивних експериментів.

Генерацію результатів пасивного експерименту буде забезпечувати програма rgen у середовищі Матлаб. Результати генерації випадкового процесу, що відповідає сигналу неконтрольованих збурень f_{c1} досліджуваного ОК наведені на рис. 1.34.

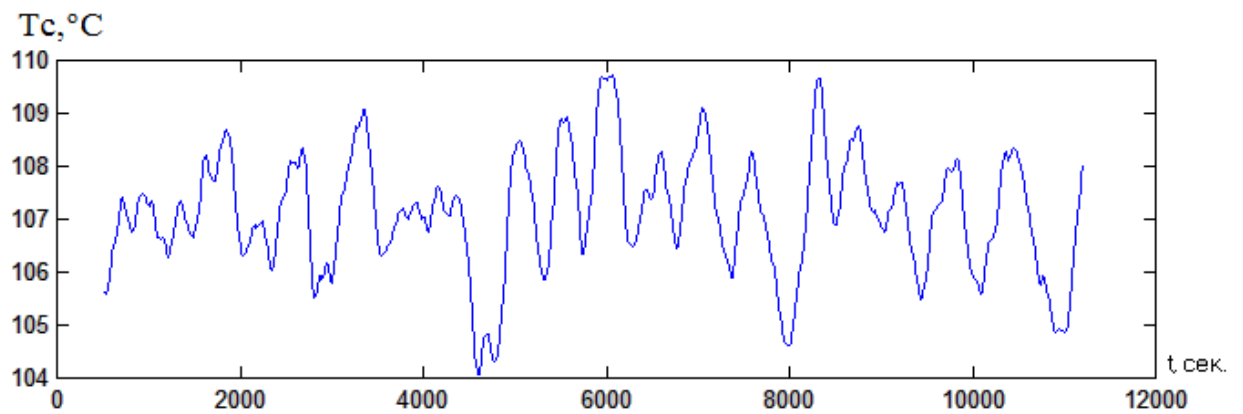


Рис. 1.34 – Результати генерації випадкового процесу, що відповідає сигналу неконтрольованих збурень f_{C1} для досліджуваного ОК

Результати генерації випадкового процесу, що відповідає сигналу неконтрольованих збурень f_{C2} досліджуваного ОК наведені на рис. 1.35.

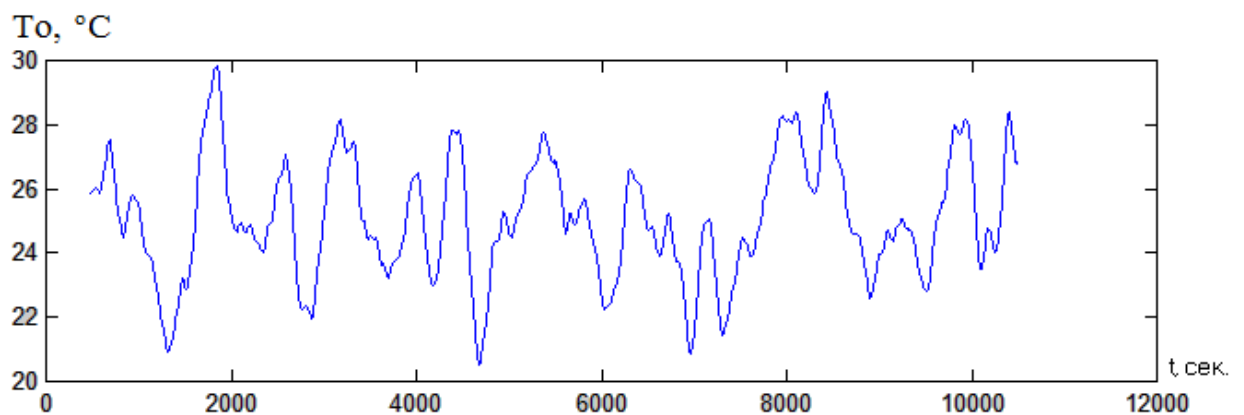
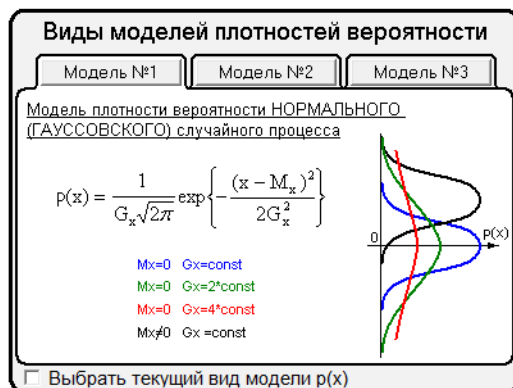
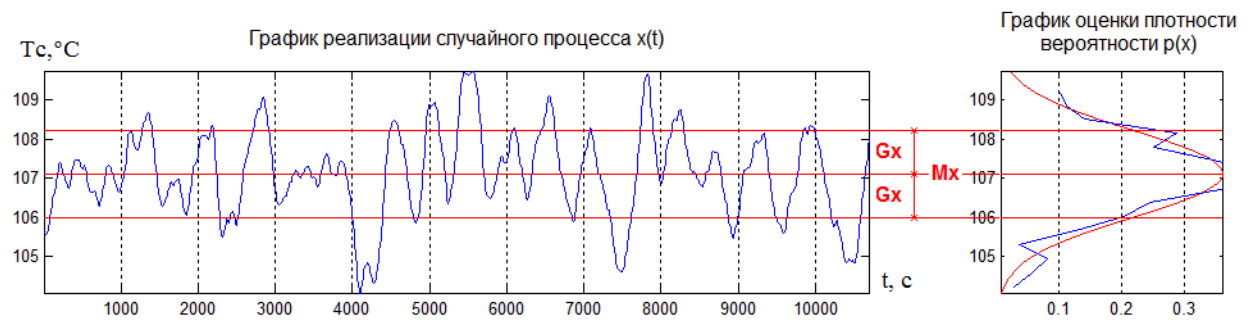


Рис. 1.35 – Результати генерації випадкового процесу, що відповідає сигналу неконтрольованих збурень f_{C2} для досліджуваного ОК

Результати оцінювання імовірнісних характеристик випадкових процесів, що відповідають неконтрольованим збуренням, наведені на рис. 1.36, 1.37 а відповідному контрольованому збуренню – на рис. 1.38.



Характеристики сгенерированной реализации случайного процесса $x(t)$:	
Исходные	
Интервал времени генерации СП	$T_p = 10700.8$ сек.
Шаг квантования СП по времени генерации	$\Delta t = 10.4$ сек.
Количество точек сгенерированной реализации СП	$N = 1024$
Полученные в результате оценивания	
Оценка математического ожидания	$M_x = 107.1$
Оценка дисперсии	$D_x = 1.227$
Оценка среднеквадратического отклонения	$G_x = 1.108$
Оценка среднеквадратического периода	$T_{\text{скл}} = 497.7$ сек.
Количество среднеквадратических периодов в сгенерированной реализации СП (минимум 25...50)	$N_{\text{Тскл}} = 21.5$

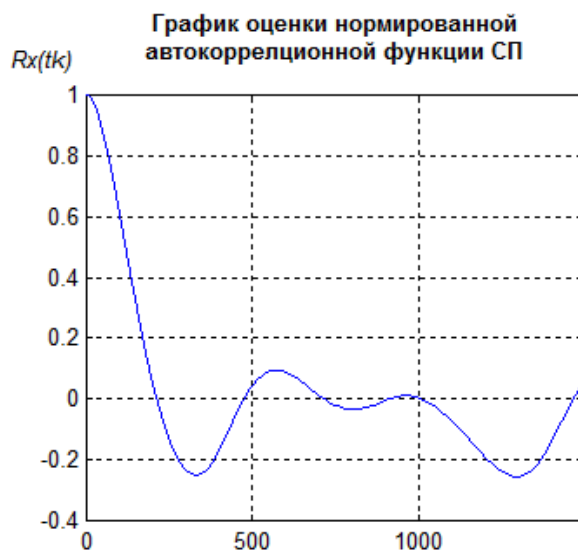
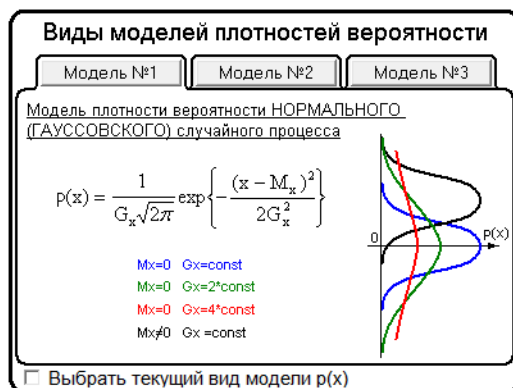


Рис. 1.36 – Результати оцінювання імовірнісних характеристик випадкового процесу, що відповідає неконтрольованим збуренням f_{c1}



Характеристики сгенерированной реализации случайного процесса $x(t)$:	
Исходные	
Интервал времени генерации СП	$T_p = 10035.2$ сек.
Шаг квантования СП по времени генерации	$\Delta t = 9.8$ сек.
Количество точек сгенерированной реализации СП	$N = 1024$
Полученные в результате оценивания	
Оценка математического ожидания	$M_x = 25.09$
Оценка дисперсии	$D_x = 3.468$
Оценка среднеквадратического отклонения	$G_x = 1.862$
Оценка среднеквадратического периода	$T_{\text{скп}} = 669$ сек.
Количество среднеквадратических периодов в сгенерированной реализации СП (минимум 25...50)	$N_{\text{Тскп}} = 15$

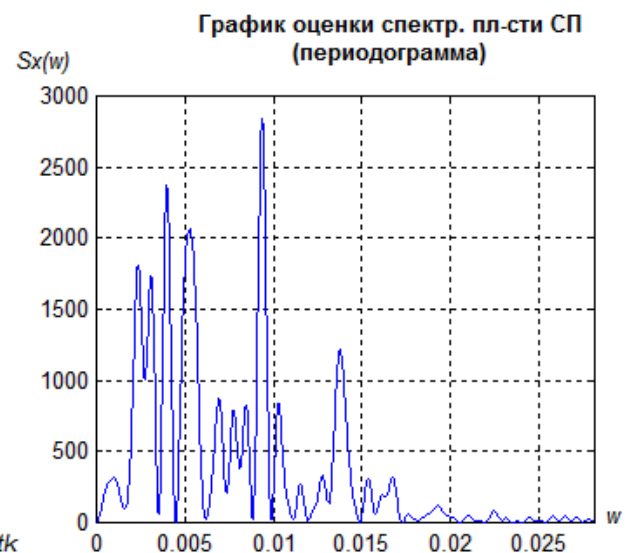
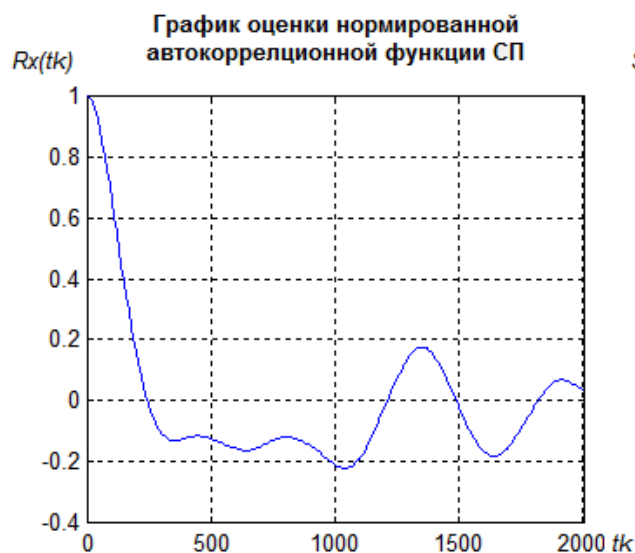


Рис. 1.37 – Результаты оцінювання імовірнісних характеристик випадкового процесу, що відповідає неконтрольованим збуренням f_{C2}

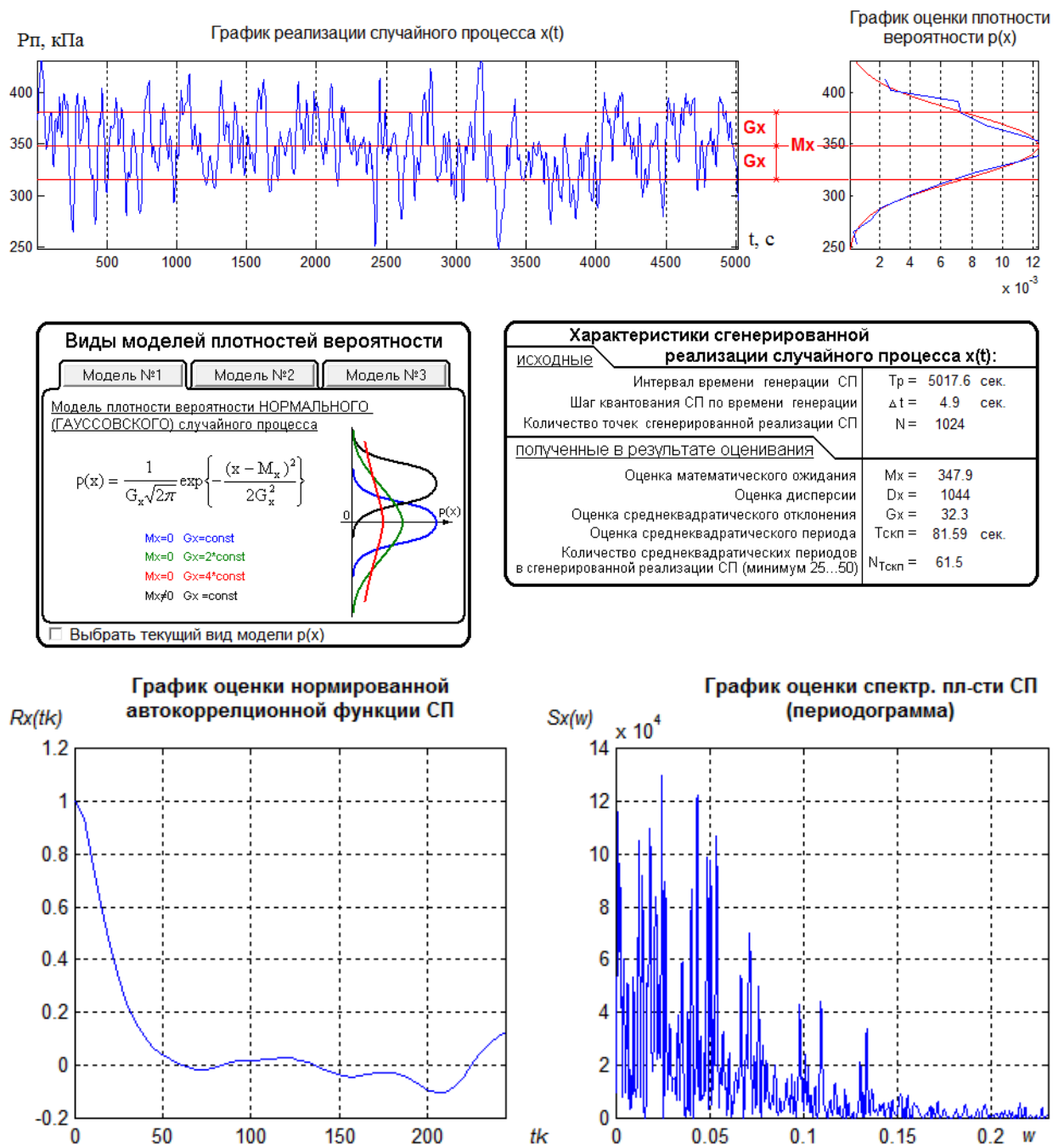


Рис. 1.38 – Результаты оцінювання імовірнісних характеристик випадкового процесу, що відповідає контрольованому збуренню

Результати параметричної ідентифікації моделі неконтрольованих збурень f_{C1} наведені на рис. 1.39, неконтрольованих збурень f_{C2} – на рис. 1.40, а контрольованого збурення R_p – на рис. 1.41.

Таблица результатов идентификации							
Номер модели		α	β	A	C	γ	Значение критерия оптимизации
✓	5	0.00415	0.00775	-	-	-	3.4126
✓	6	0.0048	0.01	-	-	-	2.6543

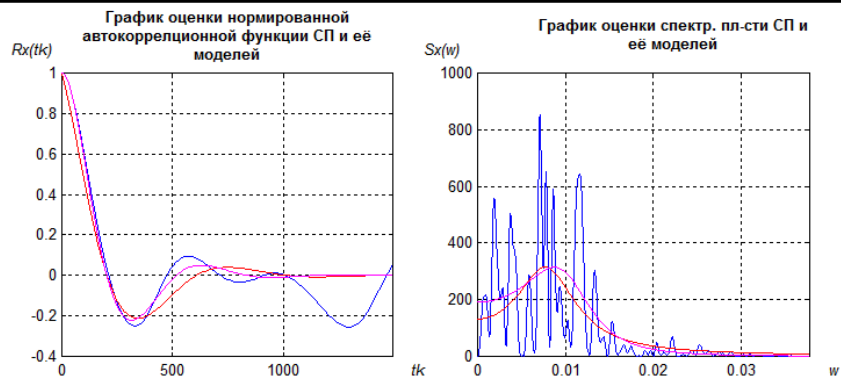


Рис. 1.39 – Результати ідентифікації моделі неконтрольованих збурень f_{C1}

Таблица результатов идентификации							
Номер модели		α	β	A	C	γ	Значение критерия оптимизации
✓	2	0.003325	-	-	-	-	4.074
✓	5	0.0035572	0.0052313	-	-	-	5.1853
✓	6	0.0057112	0.0085552	-	-	-	5.6332

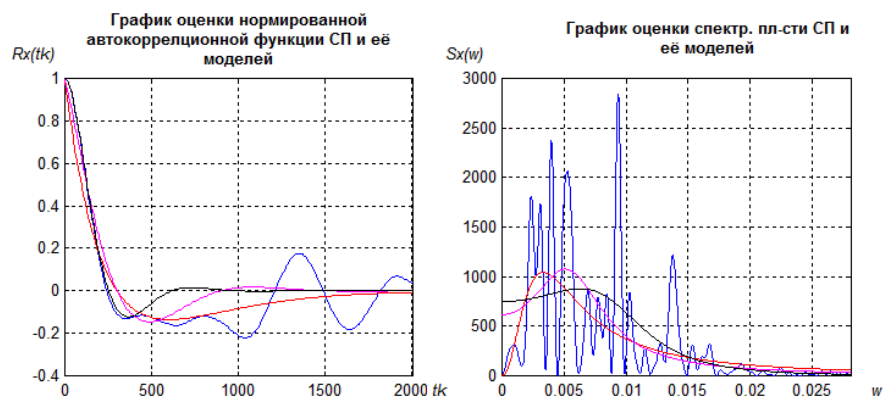


Рис. 1.40 – Підсумкові результати ідентифікації моделі неконтрольованих збурень f_{C2}

Таблица результатов идентификации							
Номер модели	α	β	A	C	γ	Значение критерия оптимизации	
✓ 2	0.019	-	-	-	-	0.86649	
✓ 5	0.035735	0.024359	-	-	-	0.27724	
✓ 6	0.076115	0.038944	-	-	-	0.20542	

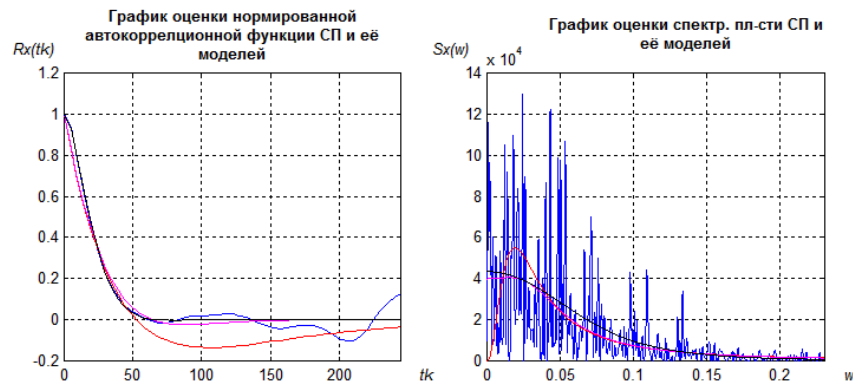


Рис. 1.41 – Підсумкові результати ідентифікації моделі контрольованого збурення

Як видно з результатів ідентифікації моделей неконтрольованих збурень (рис. 1.39, 1.40) та контрольованого збурення (рис. 1.41), кращою для неконтрольованих збурень f_{C1} є модель №2, а для неконтрольованих збурень f_{C2} та контрольованого збурення – модель №6, тому що для цих моделей меншими є середньоквадратичні відхилення моделей від оцінок кореляційних функцій.

1.6 Реалізація моделі технологічного процесу як ОК

Моделі ОК, що підлягають відтворенню у середовищі імітаційного моделювання, зведемо до таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Моделі каналів ОК

Канал ОК	Модель 1-го порядку	Модель 2-го порядку
«УП – ТГВ»	$W_0(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-9,8p}}{7,1p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-6p}}{(5,1p + 1)^2}$
«УП – Тс»	$W_0(p) = \frac{0,6 \cdot e^{-20,9p}}{21,6p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,6 \cdot e^{-11,5p}}{(14,7p + 1)^2}$
«УП – То»	$W_0(p) = \frac{0,1 \cdot e^{-35,8p}}{33,8p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,1 \cdot e^{-21,1p}}{(23p + 1)^2}$
«Уов – То»	$W_0(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-19,6p}}{11,2p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-13,1p}}{(8,3p + 1)^2}$
«ТГВ – Тс»	$W_0(p) = \frac{\frac{6}{7} \cdot e^{-5,3p}}{17,7p + 1}$	$W_0(p) = \frac{\frac{6}{7} \cdot e^{-1p}}{(11p + 1)^2}$
«Тс – То»	$W_0(p) = \frac{\frac{1}{6} \cdot e^{-3,2p}}{22,1p + 1}$	$W_0(p) = \frac{\frac{1}{6} \cdot e^{-1p}}{(12,1p + 1)^2}$

Моделі статичних характеристик:

$$T_{ГВ} = -0,0053 \cdot U_{П}^2 + 1,1892 \cdot U_{П} + 0,03 \cdot P_{П} + 64,393.$$

$$T_c = 0,0024 \cdot T_{ГВ}^2 + 0,2702 \cdot T_{ГВ} + 31,0895$$

$$T_o = -0,0001 \cdot U_{ОВ}^3 + 0,0252 \cdot U_{ОВ}^2 - 2,2 \cdot U_{ОВ} - 0,002 \cdot T_c^2 + 0,58 \cdot T_{ГВ} + 48,7;$$

Розробка схем моделювання, генерація випадкових складових моделей вхідних дій, параметрична ідентифікація їх імовірнісних характеристик і підтвердження адекватності моделей.

Сигнал неконтрольованих збурень f_{C1}

Повинен відповідати таким статистичним параметрам:

$$M_f = 107,1$$

$$\sigma_f = 1,108$$

$$\alpha = 0,0048$$

$$\beta = 0,01$$

Схема моделювання буде мати вигляд, наведений на рис. 1.62.

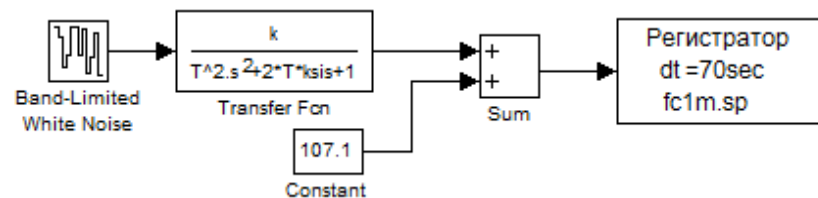
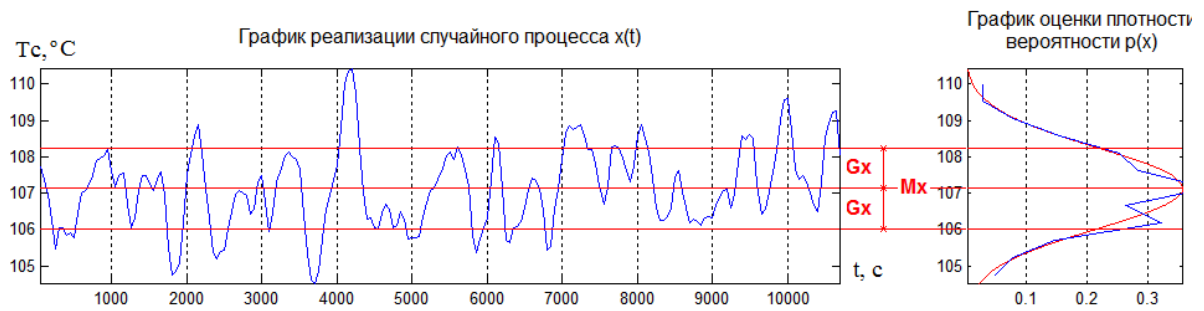


Рис. 1.62 – Схема моделювання неконтрольованих збурень f_{C1} із формуючим фільтром, що має розрахункові параметри

Похибка відтворення σ_f , α і β більша від 5%, а значить необхідно провести коректування параметрів формуючого фільтра. Після коректування були отримані наступні параметри формуючого фільтра: $k = 4,6$; $T = 79\text{с}$; $\zeta = 0,6$.



Виды моделей плотностей вероятности

Модель №1 Модель №2 Модель №3

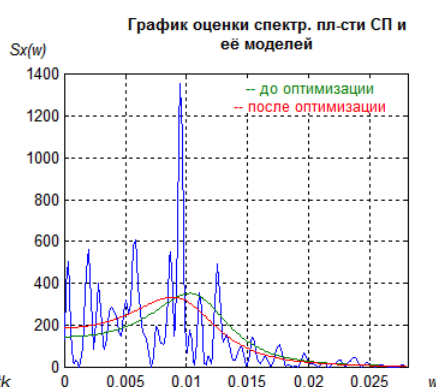
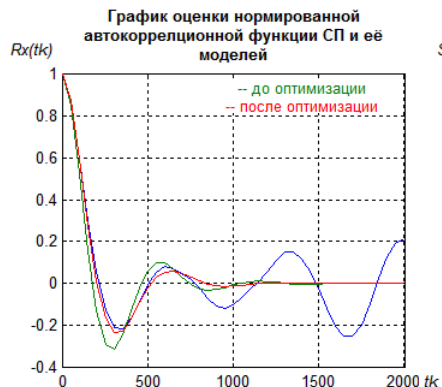
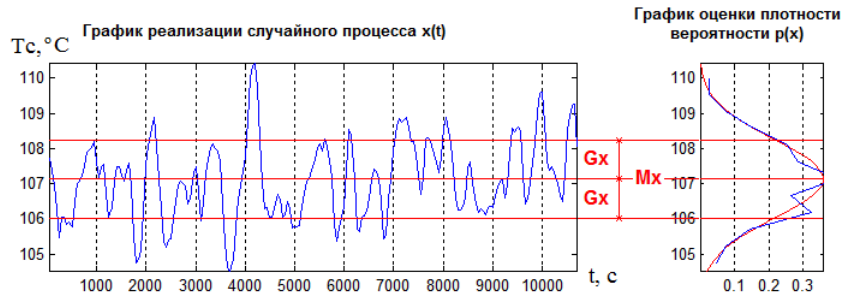
Модель плотности вероятности НОРМАЛЬНОГО (ГАУССОВСКОГО) случайного процесса

$$p(x) = \frac{1}{G_x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x - M_x)^2}{2G_x^2} \right\}$$

$M_x=0$ $G_x=\text{const}$
 $M_x=0$ $G_x=2 \cdot \text{const}$
 $M_x=0$ $G_x=4 \cdot \text{const}$
 $M_x \neq 0$ $G_x=\text{const}$

☐ Выбрать текущий вид модели p(x)

Характеристики сгенерированной реализации случайного процесса x(t):	
ИСХОДНЫЕ	
Интервал времени генерации СП	Tr = 10700 sec
Шаг квантования СП по времени генерации	Δt = 50 sec
Количество точек сгенерированной реализации СП	N = 214
ПОЛУЧЕННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОЦЕНКИ	
Оценка математического ожидания	Mx = 107.1
Оценка дисперсии	Dx = 1.247
Оценка среднеквадратического отклонения	Gx = 1.117
Оценка среднеквадратического периода	Tскп = 668.8 sec
Количество среднеквадратических периодов в сгенерированной реализации СП (минимум 25...50)	NТскп = 16



Выбранные Вами модели Rx и Sx:

$$R_x(\tau_k) = D_x \exp(-\alpha|\tau_k|) (\cos(\beta|\tau_k|) + \frac{\alpha}{\beta} \sin(\beta|\tau_k|))$$

$$S_x(\omega) = \frac{D_x 4\alpha(\alpha^2 + \beta^2)}{(\omega^2 - \beta^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}$$

Расчёт начальных приближений оптимизируемых параметров можно осуществить используя нижеприведен рекомендации

№6

ОПТИМИЗАЦИЯ

Выбор метода оптимизации

☒ по автокорреляционной функции

☐ по спектральной плотности

Настройка параметров оптимизации

max количество шагов оптимизации	100.00			
минимальное приращение критерия	0.01			
минимальное приращение аргумента	0.01			
ниж.огр.	нач.прибл.	верх.огр.	оптим.знач.	
α	0.002	0.004	0.008	0.0045
β	0.005	0.011	0.1	0.0099
факт. количество шагов оптимизации	11			
Значение критерия оптимальности	до оптим-ции	1.053		
	после опт-ции	0.947		

Сохранить Отмена Повтор

Рис. 1.65 – Результаты моделирования неконтрольованих збурень f_{C1} зі скоректованими параметрами формууючого фільтра

Сигнал контролируемого збурення Рп

Повинен відповідати таким статистичним параметрам:

$$M_f = 347,9$$

$$\sigma_f = 32,3$$

$$\alpha = 0,076115$$

$$\beta = 0,038944$$

Схема моделювання буде мати вигляд, наведений на рис. 1.66.

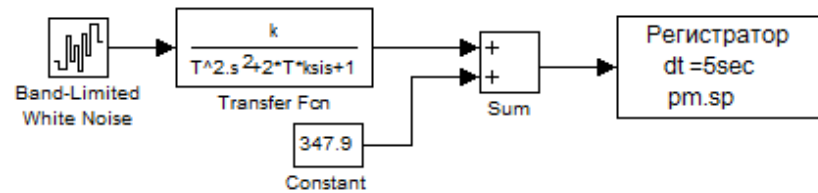
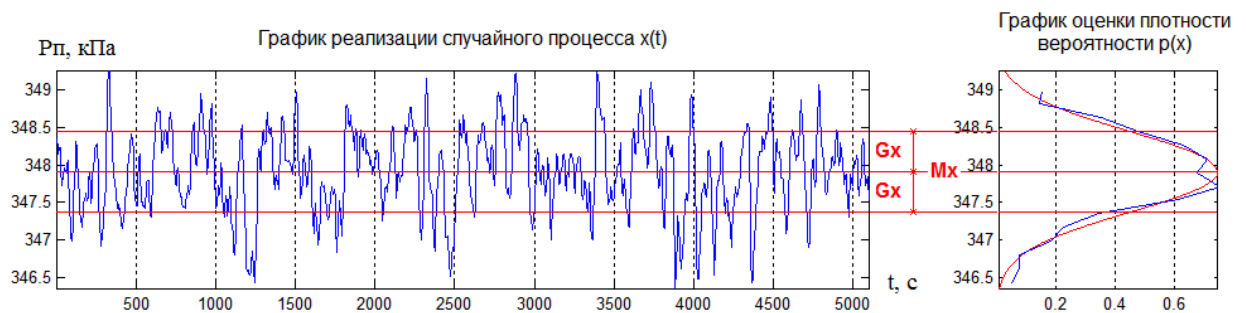


Рис. 1.66 – Схема моделювання контролюваного збурення Рп із формуючим фільтром, що має розрахункові параметри



Виды моделей плотностей вероятности

Модель №1 Модель №2 Модель №3

Модель плотности вероятности НОРМАЛЬНОГО (ГАУССОВСКОГО) случайного процесса

$$p(x) = \frac{1}{G_x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x - M_x)^2}{2G_x^2} \right\}$$

$M_x=0$ $G_x=\text{const}$
 $M_x=0$ $G_x=2*\text{const}$
 $M_x=0$ $G_x=4*\text{const}$
 $M_x \neq 0$ $G_x=\text{const}$

☐ Выбрать текущий вид модели p(x)

Характеристики сгенерированной реализации случайного процесса x(t):	
ИСХОДНЫЕ	
Интервал времени генерации СП	Tr = 5100 sec
Шаг квантования СП по времени генерации	Δt = 5 sec
Количество точек сгенерированной реализации СП	N = 1020
ПОЛУЧЕННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОЦЕНИВАНИЯ	
Оценка математического ожидания	Mx = 347.9
Оценка дисперсии	Gx = 0.2865
Оценка среднеквадратического отклонения	Gx = 0.5352
Оценка среднеквадратического периода	Tскп = 93.58 sec
Количество среднеквадратических периодов в сгенерированной реализации СП (минимум 25...50)	NТскп = 54.5

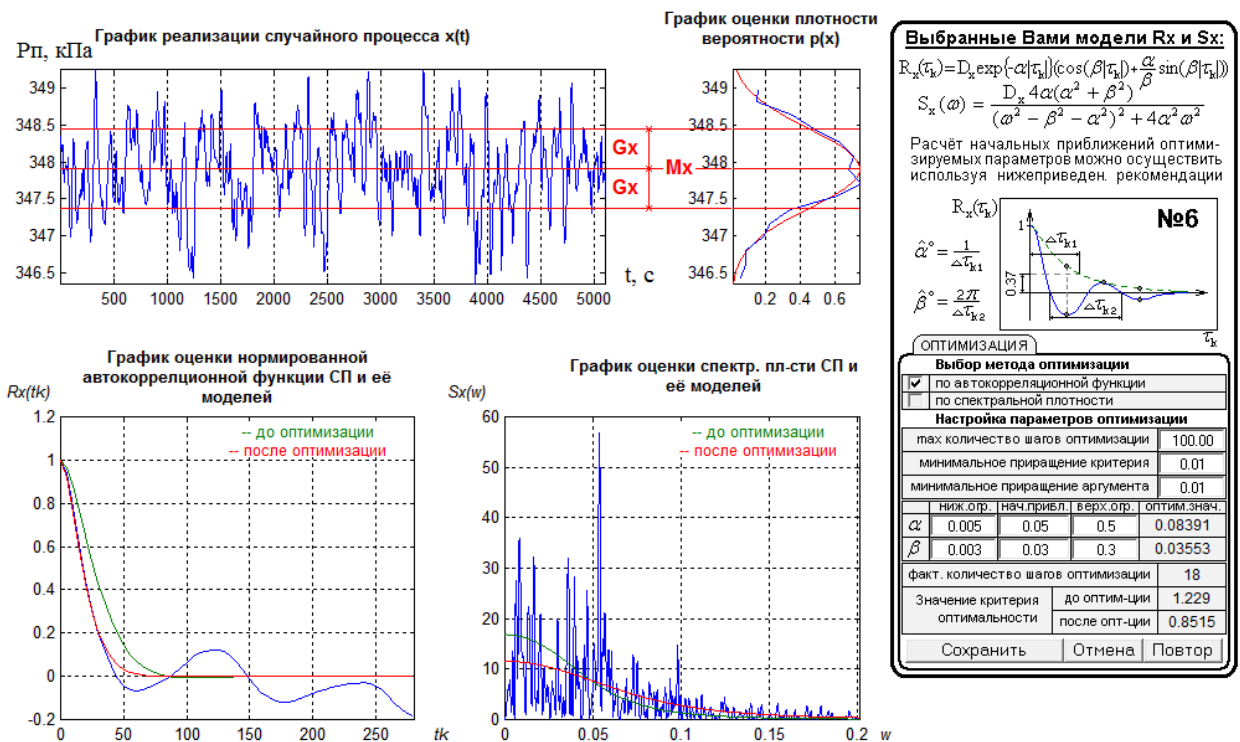


Рис. 1.67 – Результати моделювання контрольованого збурення Рп із розрахунковими параметрами формуючого фільтра

Похибка відтворення σ_f , α і β більша від 5%, а значить необхідно провести коректування параметрів формуючого фільтра. Після коректування були отримані наступні параметри формуючого фільтра: $k = 3,9$; $T = 12\text{с}$; $\xi = 1$.

Похибка відтворення параметрів випадкового процесу менша від 5%, а значить точність моделі контрольованого збурення Рп є достатньою.

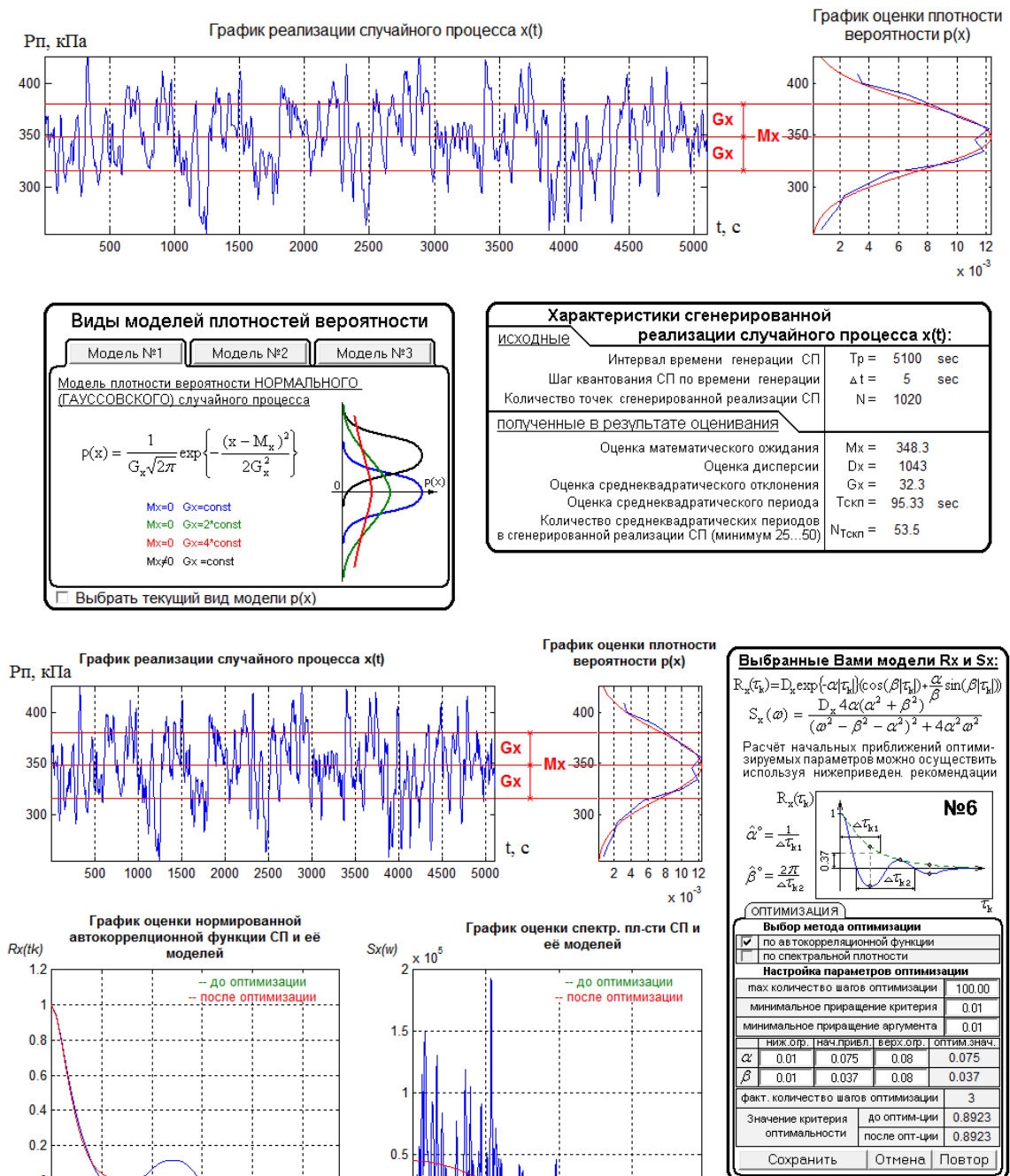


Рис. 1.69 – Результаты моделирования контролируемого збурення Рп зі скоректованими параметрами формуючого фільтра

Сигнал неконтрольованих збурень f_{C2}

Повинен відповідати таким статистичним параметрам:

$$M_f = 25,09$$

$$\sigma_f = 1,892$$

$$\alpha = 0,003325$$

Схема моделювання буде мати вигляд, наведений на рис. 1.70.

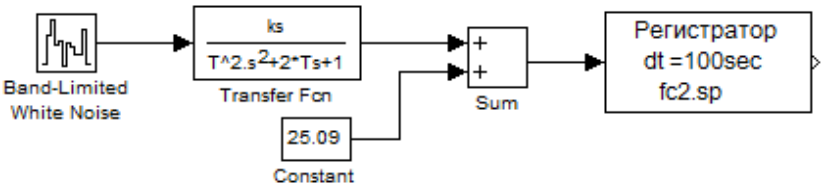
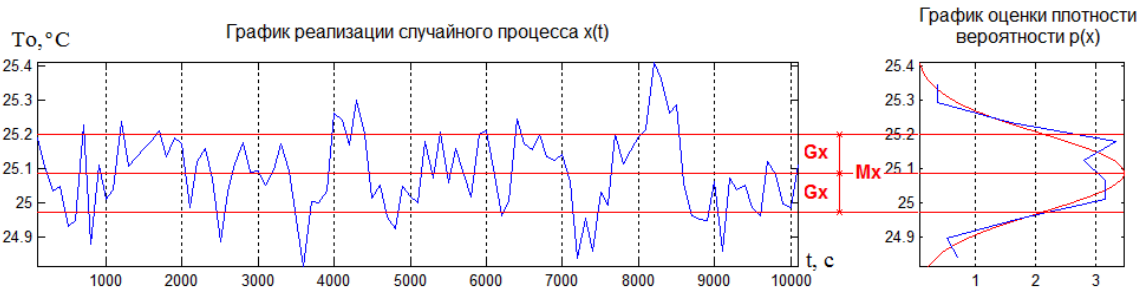


Рис. 1.70 – Схема моделювання неконтрольованих збурень f_{C2} із формуючим фільтром, що має розрахункові параметри

Похибка відтворення σ_f , і α більша від 5%, а значить необхідно провести коректування параметрів формуючого фільтра. Після коректування були отримані наступні параметри формуючого фільтра: $k = 1095$; $T = 260с$, результати моделювання наведені на рис. 1.73.



Виды моделей плотностей вероятности

Модель №1

Модель №2

Модель №3

Модель плотности вероятности НОРМАЛЬНОГО (ГАУССОВСКОГО) случайного процесса

$$p(x) = \frac{1}{G_x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x - M_x)^2}{2G_x^2} \right\}$$

$M_x=0$

$G_x=const$

$M_x=0$

$G_x=2*const$

$M_x=0$

$G_x=4*const$

$M_x \neq 0$

$G_x=const$

☐ Выбрать текущий вид модели p(x)

Характеристики сгенерированной реализации случайного процесса x(t):	
ИСХОДНЫЕ	
Интервал времени генерации СП	Tr = 10100 sec
Шаг квантования СП по времени генерации	Δt = 100 sec
Количество точек сгенерированной реализации СП	N = 101
ПОЛУЧЕННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОЦЕНИВАНИЯ	
Оценка математического ожидания	Mx = 25.09
Оценка дисперсии	Dx = 0.01316
Оценка среднеквадратического отклонения	Gx = 0.1147
Оценка среднеквадратического периода	Tскп = 673.3 sec
Количество среднеквадратических периодов в сгенерированной реализации СП (минимум 25...50)	NТскп = 15

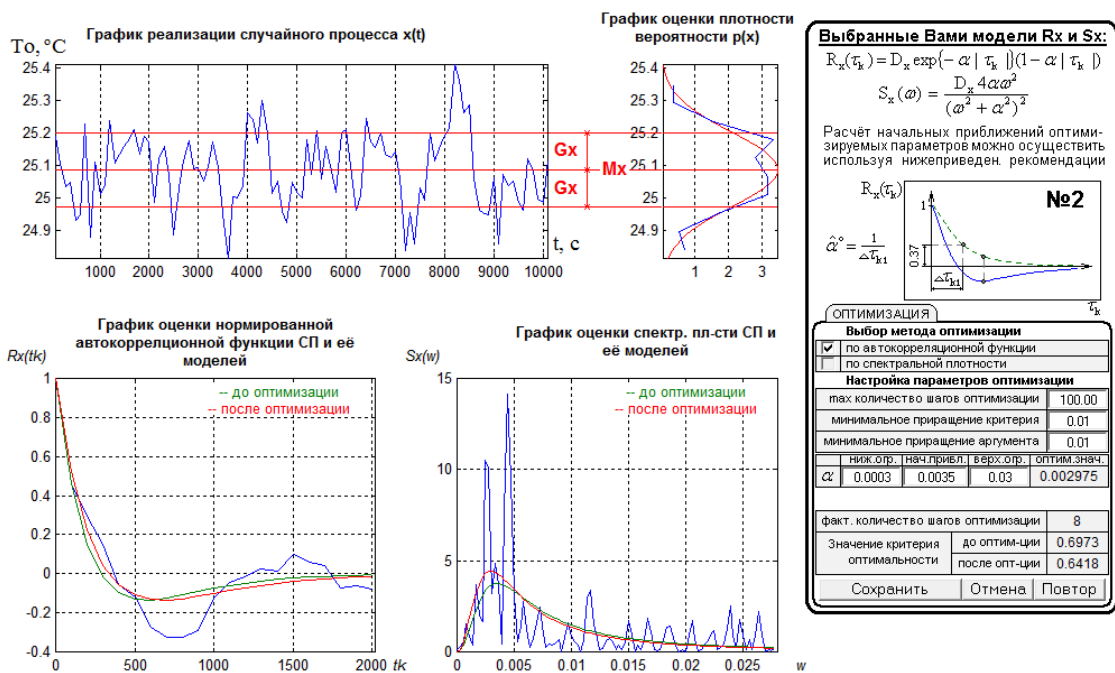
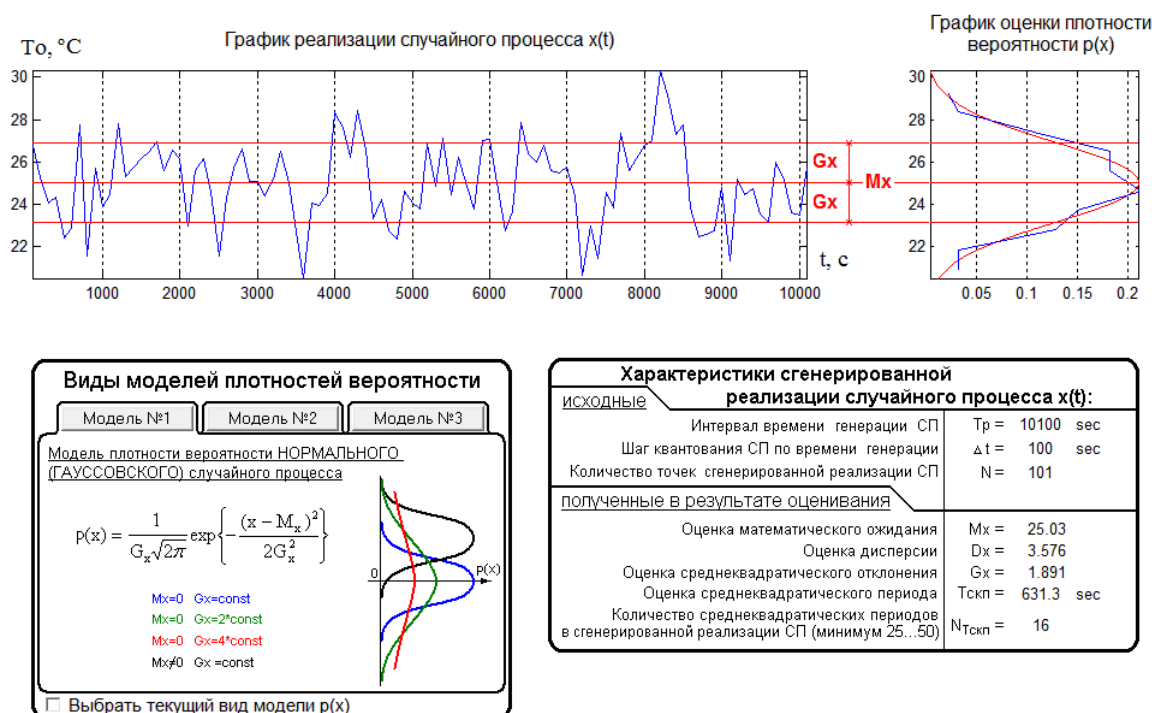


Рис. 1.71 – Результаты моделирования неконтрольованих збурень f_{C2} із розрахунковими параметрами формуючого фільтра



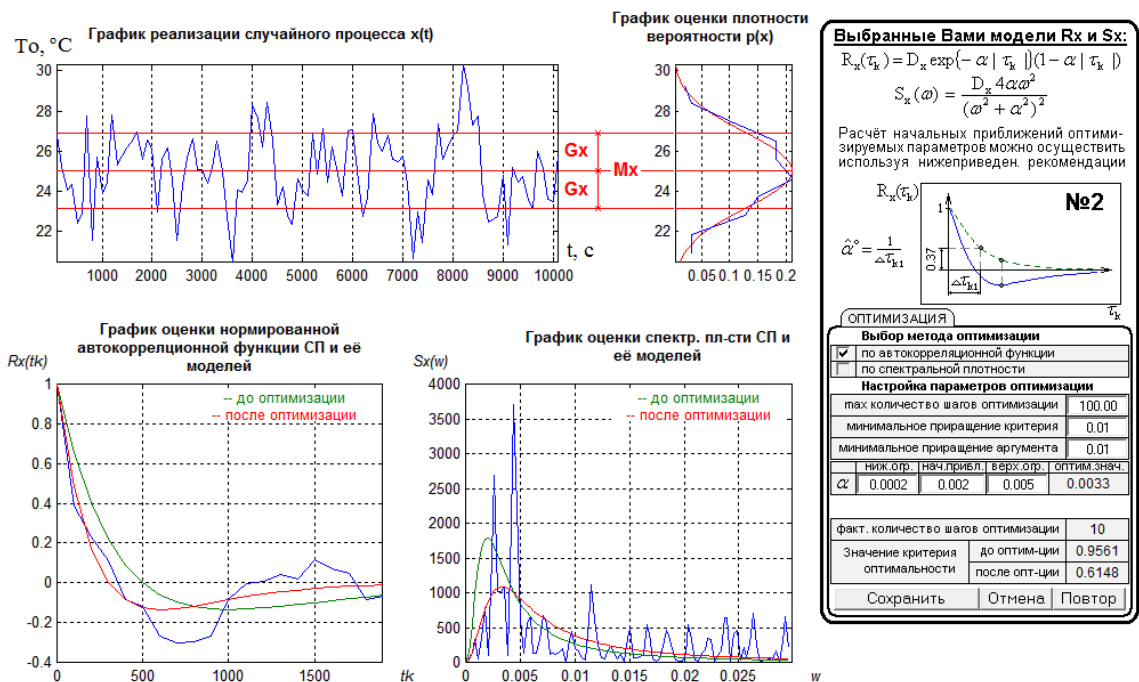


Рис. 1.73 – Результати моделювання неконтрольованих збурень f_{C2} зі скоректованими параметрами формуючого фільтра

Похибка відтворення параметрів випадкового процесу менша від 5%, а значить точність моделі неконтрольованих збурень f_{C2} є достатньою.

Для реалізації повної моделі ОК об'єднаємо моделі динаміки, статички каналів ОК і модель вхідних випадкових дій. Схема моделювання повної моделі ОК наведена на рис. 1.74.

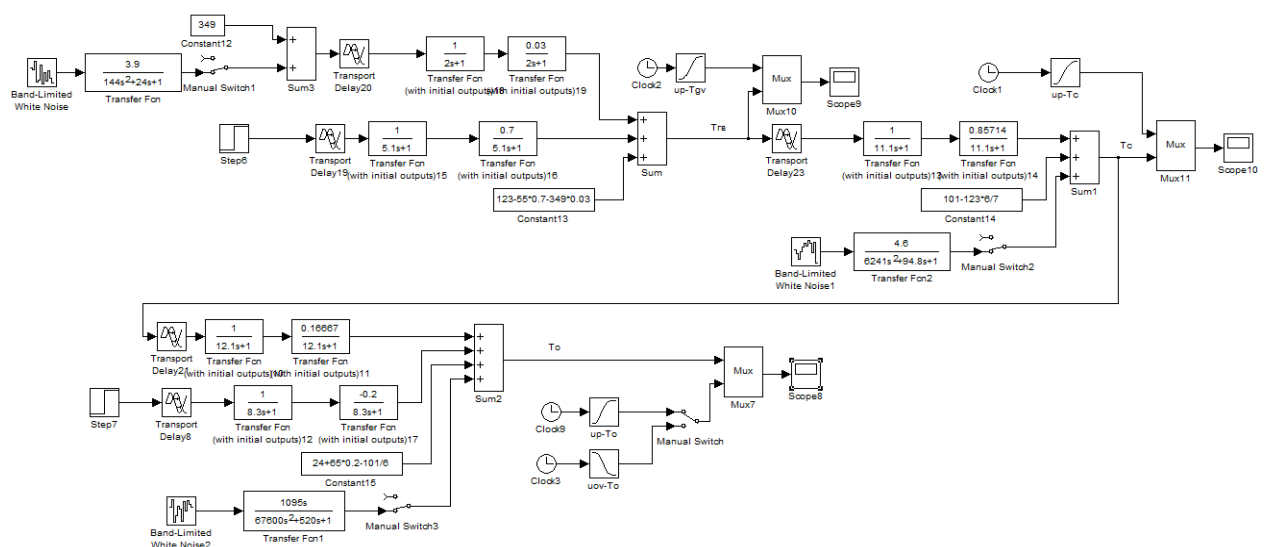


Рис. 1.74 – Схема моделювання повної моделі ОК

Проведемо експерименти з повною моделлю ОК. Результати експериментів в результаті дії збурень тільки детермінованого характеру та в умовах дії стохастичних неконтрольованих збурень – на рис. 1.75..1.76. Як показують результати експериментів, модель ОК в достатній мірі відтворює результати експериментальних досліджень.

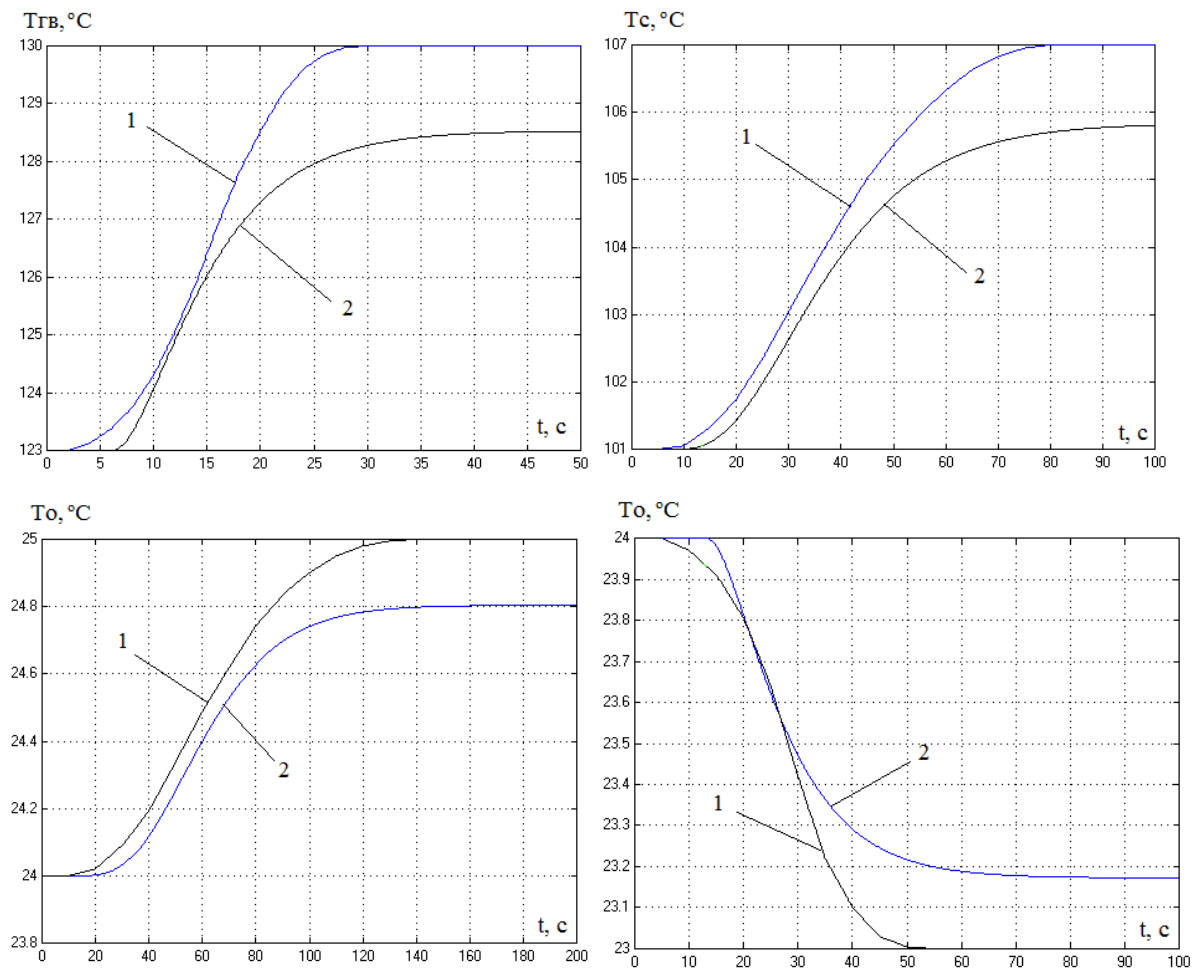


Рис. 1.75 – Результати реалізації повної моделі ОК з урахуванням нелінійної статистики в умовах дії збурень тільки детермінованого характеру : 1 – експериментальні дані; 2 – модель

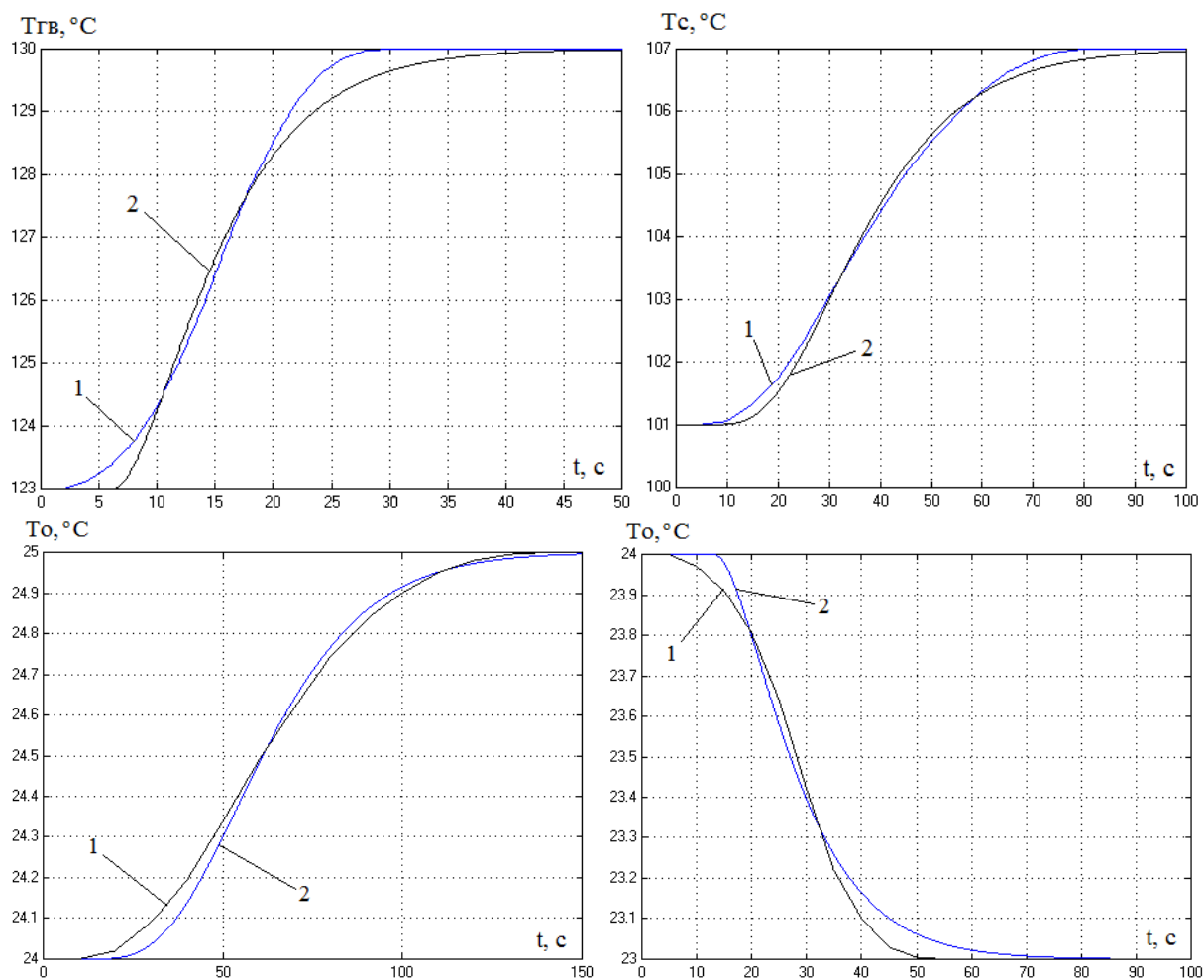


Рис. 1.76 – Результати моделювання повної моделі ОК з урахуванням лінійної статистики в умовах дії збурень тільки детермінованого характеру: 1 – експериментальні дані; 2 – модель

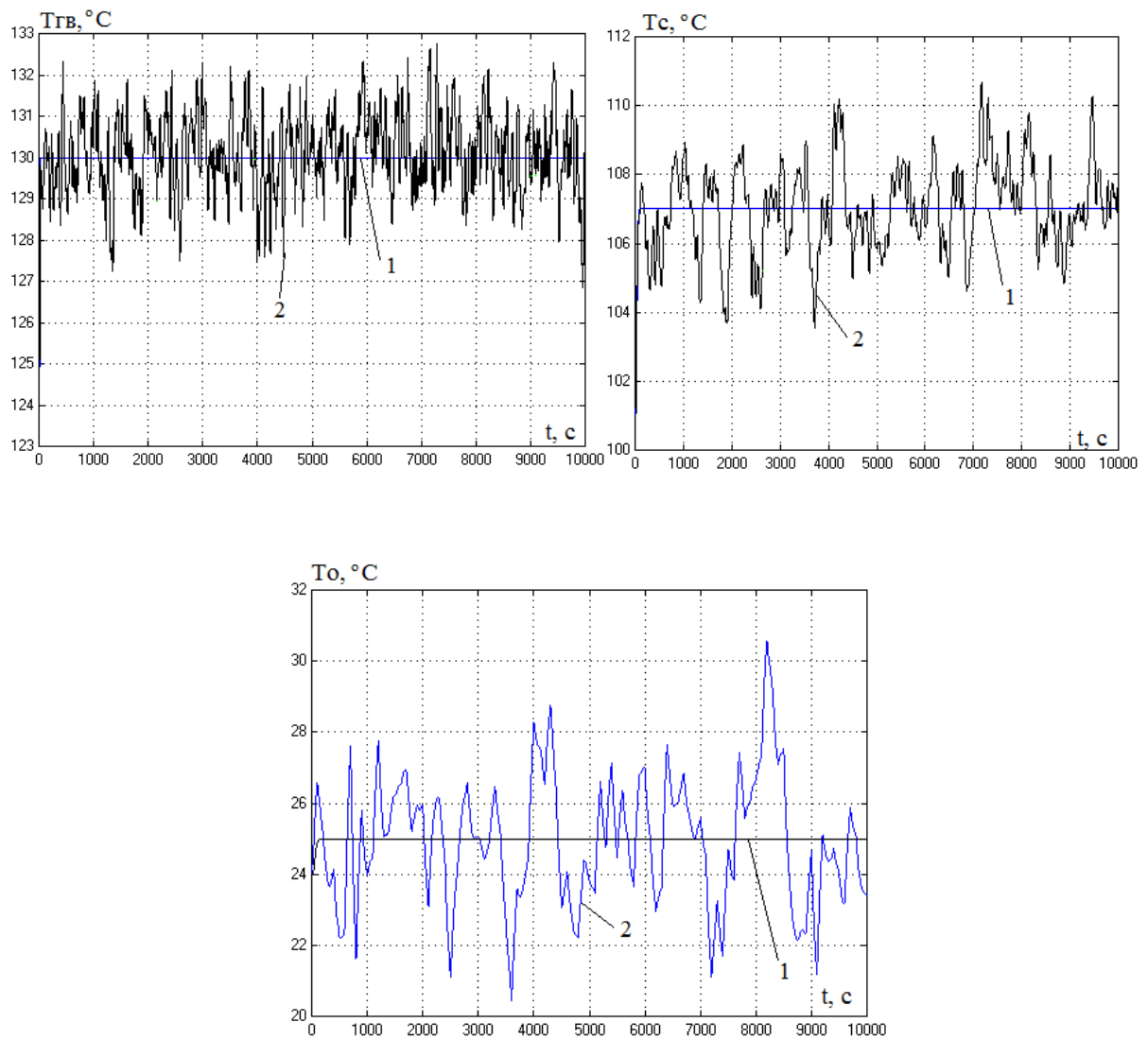


Рис. 1.77 – Результати моделювання повної моделі ОК з урахуванням лінійної статистики умовах дії стохастичних неконтрольованих збурень : 1 – експериментальні дані; 2 – модель

Як видно з рис. 1.77, модель ОК з урахуванням нелінійної статистики не достатньо точно відтворює експериментальні дані в робочому діапазоні ведення процесу. Тому реалізуємо повну модель каналів ОК з включенням до моделі лінійної статистики.

1.7. Типові структура й алгоритми САК ТП стерилізації томато-продуктів,

Загальним завданням керування є керування продуктовими та енергетичними потоками для отримання властивостей продукту необхідного виду і якості.

Із загальної мети керування можна виділити окремі задачі:

- підтримання вихідних змінних об'єкту керування (T_c , T_o) на їх заданих значеннях ($T_c^{здн}$, $T_o^{здн}$) - задача регулювання;

Для **задачі регулювання** автоматизація необхідна для автоматичного регулювання заданої змінної в околиці бажаного значення із заданою точністю без фізичної участі людини. Для якісної і економічно доцільною реалізації технологічного процесу стерилізації соку в трубчастому теплообміннику необхідно регулювати температури продукту на виході секції стерилізації T_c та секції водяного охолодження T_o стерилізатора.

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів (див. таблицю 1.1) температура стерилізації продукту повинна підтримуватися на рівні 107°C з точністю $\pm 2^{\circ}\text{C}$. За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до $\pm 5^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 60 секунд. Температура охолодження продукту повинна підтримуватися на рівні 25°C з точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до $\pm 2^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 60 секунд

Регламентні зони за цими параметрами наведені на рисунках 1.78 та 1.79.

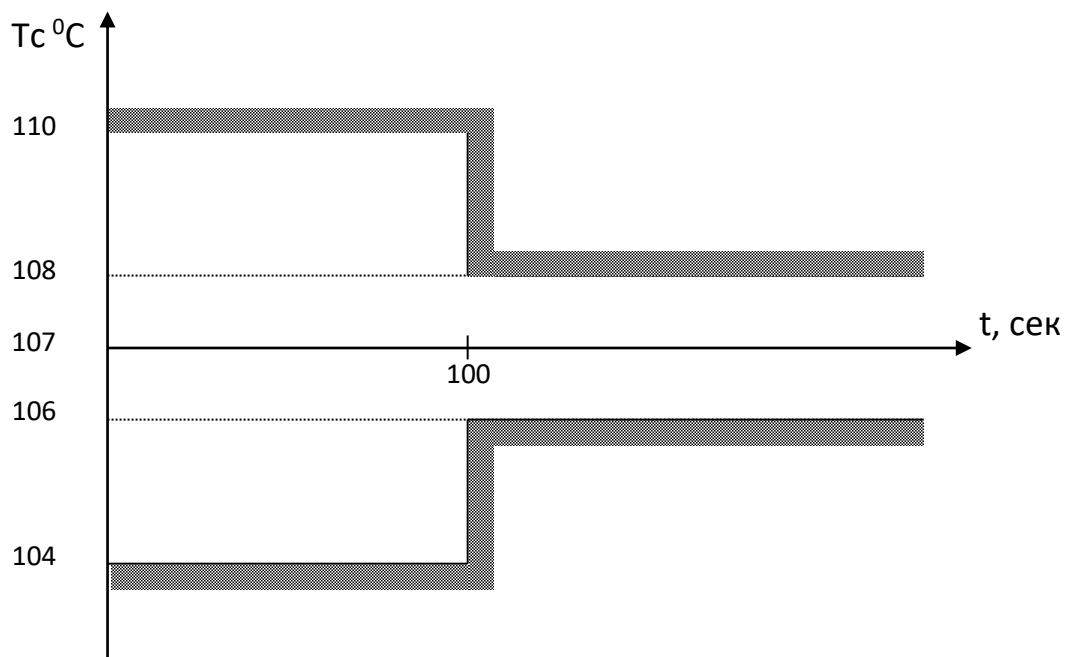


Рис. 1.78 – Регламентна зона за температурою стерилізації соку

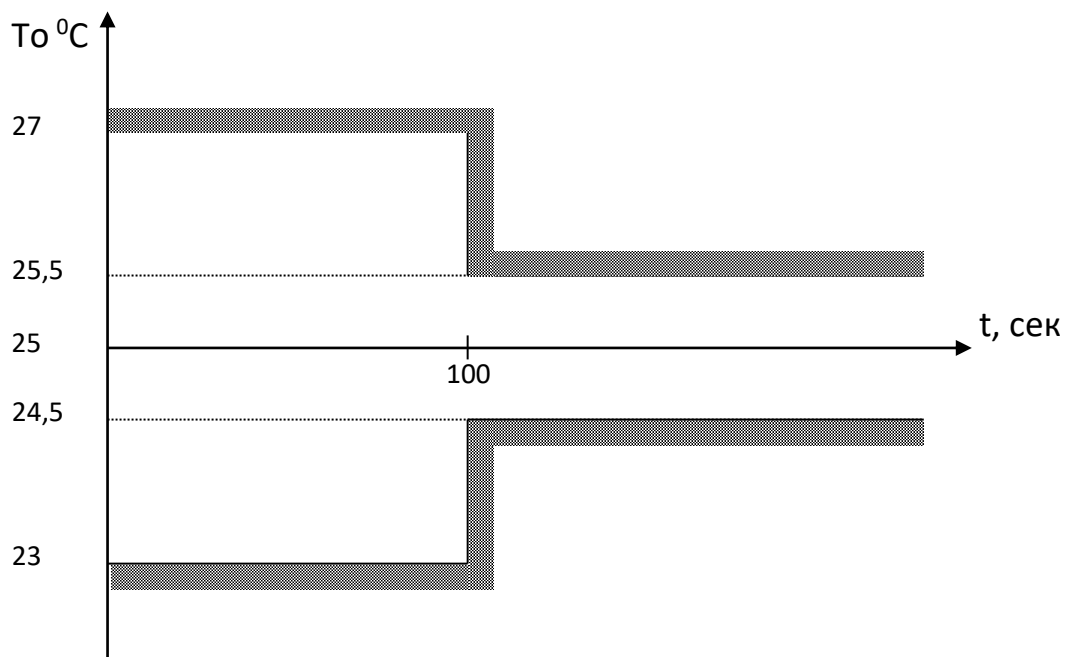


Рис. 1.79 – Регламентна зона за температурою охолодження соку

Як видно з регламентів на САР для процесу стерилізації соку особливо жорсткі вимоги пред'являються до короточасних відхилень, так як саме недотримання цих регламентів може призвести до браку готової продукції і суттєвих економічних збитків. При цьому малі відхилення регламентуються не дуже жорстко. Тому в якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний квадратичний критерій, що сильно штрафує короточасні

відхилення. Тому ефективність роботи САР температури стерилізації та охолодження соку і підвищення її динамічної точності доцільно вести за таким критерієм:

$$J = \int_0^{t_M} \left[\left(\frac{(\Delta T_c(t))}{5} \right)^2 + \left(\frac{(\Delta T_o(t))}{2} \right)^2 \right] \cdot dt$$

де t_M – час моделювання;

$\Delta T_c(t)$ – помилка регулювання температури стерилізації;

$\Delta T_o(t)$ – помилка регулювання температури охолодження.

Структурна схема САК температур стерилізації та охолодження соку найпростішої (базової) структури наведена на рис. 1.8.

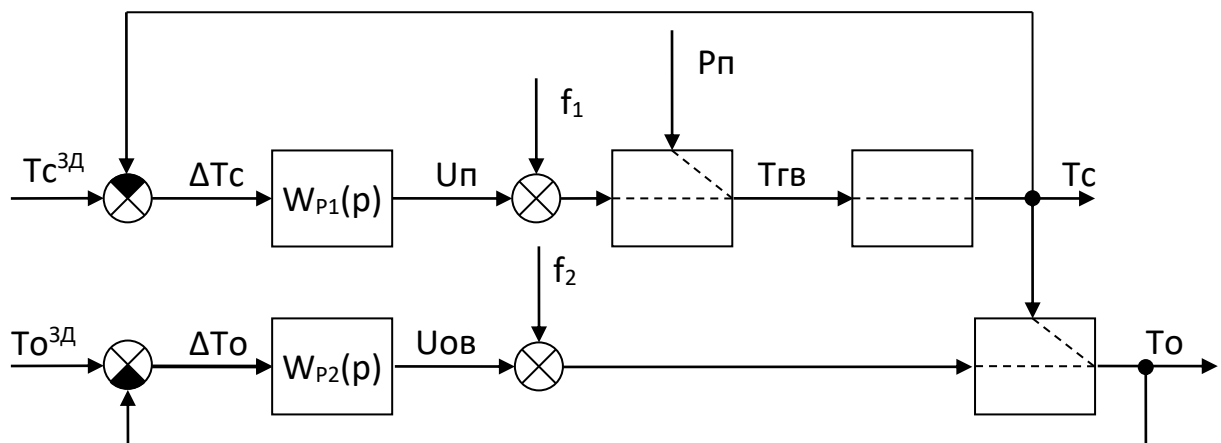


Рис. 1.8 – Структурна схема САК найпростішої структури

Позначення на схемі:

T_c – температура стерилізації соку;

T_o – температура охолодження соку;

$T_{гв}$ – температура гарячої води;

U_p – положення регулюючого органу подачі пари;

$U_{ов}$ – положення регулюючого органу подачі охолоджуючої води;

f_1, f_2 – вектори неконтрольованих збурень;

P_p – контрольоване збурення (тиск пари в паропроводі);

$W_{p1}(p)$, $W_{p2}(p)$ – передаточні функції регуляторів;

$T_{c3ДН}$ – задане значення температури стерилізації;

$T_{o3ДН}$ – задане значення температури охолодження;

ΔT_c – помилка регулювання температури стерилізації;

ΔT_o – помилка регулювання температури охолодження;

Процес стерилізації соку за всіма каналах має статичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритми регулювання.

Передаточна функція ПІ-регулятора

$$W_p(p) = K_D \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{I\zeta} p} \right);$$

Передаточна функція ПІД-регулятора

$$W_p(p) = K_D \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{I\zeta} p} + T_{\sigma i} p \right)$$

де K_p – коефіцієнт передачі регулятора; $T_{I\zeta}$ – час ізодрому; $T_{\sigma i}$ – час упередження.

Розрахунок початкових наближень параметрів регулятора $W_{p1}(p)$.

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК за каналом «Уп – Тс» матиме вигляд:

$$W_0(p) = \frac{0,6 \cdot e^{-20,9p}}{21,6p + 1}$$

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора:

$$K_p = \frac{0,8 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{0,8 \cdot 21,6}{0,6 \cdot 20,9} = 1,4 \frac{\% \ddot{o} . \ddot{o} . \hat{i} .}{\% \ddot{N}} \quad T_{I\zeta} = 2,5 \cdot \tau_o = 2,5 \cdot 20,9 = 52 \text{н}$$

Розрахунок параметрів ПІД-регулятора:

$$K_p = \frac{1 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{1 \cdot 21,6}{0,6 \cdot 20,9} = 1,7 \frac{\% \ddot{o} . \ddot{o} . \hat{t} .}{^0 \tilde{N}}$$

$$T_{I\zeta} = 2 \cdot \tau_o = 2 \cdot 20,9 = 41,8 \tilde{n}$$

$$T_{OI} = \tau_o = 20,9 \tilde{n}$$

Розрахунок початкових наближень параметрів регулятора $W_{p2}(p)$.

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК за каналом «Uов – То» матиме вигляд:

$$W_0(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-19,6p}}{11,2p + 1}$$

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора:

$$K_p = \frac{0,8 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{0,8 \cdot 11,2}{-0,2 \cdot 19,6} = -2,3 \frac{\% \ddot{o} . \ddot{o} . \hat{t} .}{^0 \tilde{N}} \quad T_{I\zeta} = 2,5 \cdot \tau_o = 2,5 \cdot 19,6 = 49 \tilde{n}$$

Розрахунок параметрів ПІД-регулятора:

$$K_p = \frac{1,0 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{1,0 \cdot 11,2}{-0,2 \cdot 19,6} = -2,9 \frac{\% \ddot{o} . \ddot{o} . \hat{t} .}{^0 \tilde{N}}$$

$$T_{I\zeta} = 2 \cdot \tau_o = 2 \cdot 19,6 = 39,2 \tilde{n}$$

$$T_{OI} = \tau_o = 19,6 \tilde{n}$$

Проведемо оптимальний параметричний синтез САР температур стерилізації та охолодження соку з ПІ-регулятором та ПІД-регулятором. Результати оптимізації налаштувань ПІ-регулятора наведені на рис. 1.81 – 1.82.

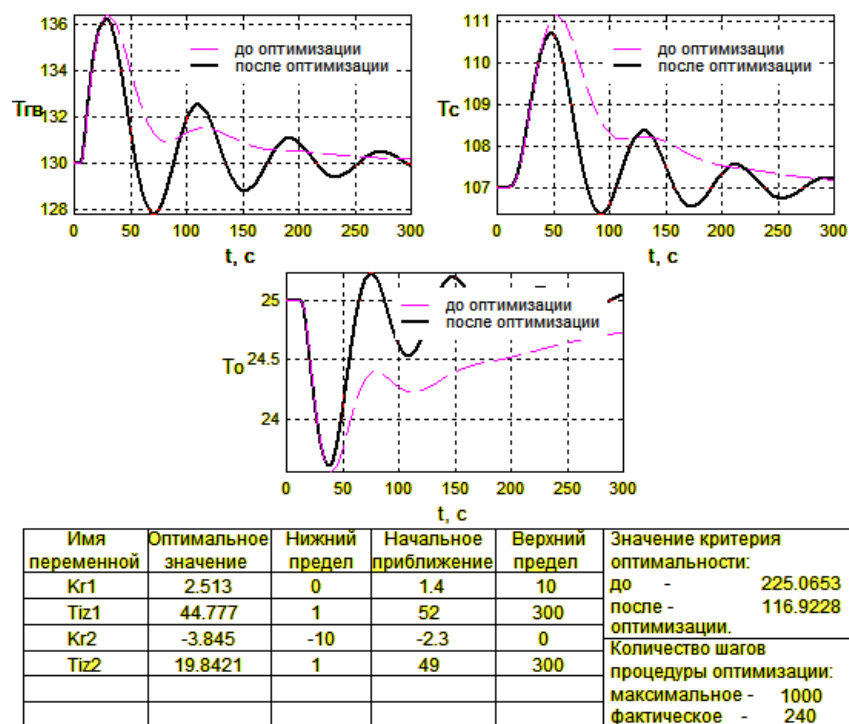


Рис. 1.81 – Результаты оптимізації налаштувань ПІ-регулятора

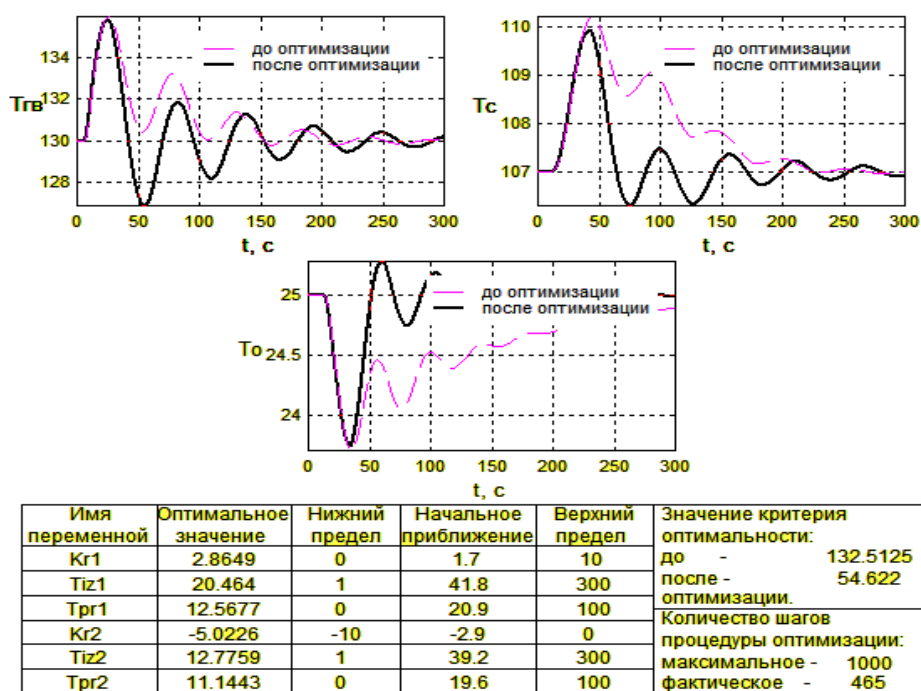


Рис. 1.82 – Результаты оптимізації налаштувань ПІД-регулятора.

Структурні схеми моделювання наведено на рис 1.83 і 1.84. Для проведення порівняльного аналізу САР з ПІ- і ПІД-регулятором будемо використовувати також структурні схеми моделювання, Результати порівняння варіантів САР наведені на рис. 1.85 і в таблиці 1.6.

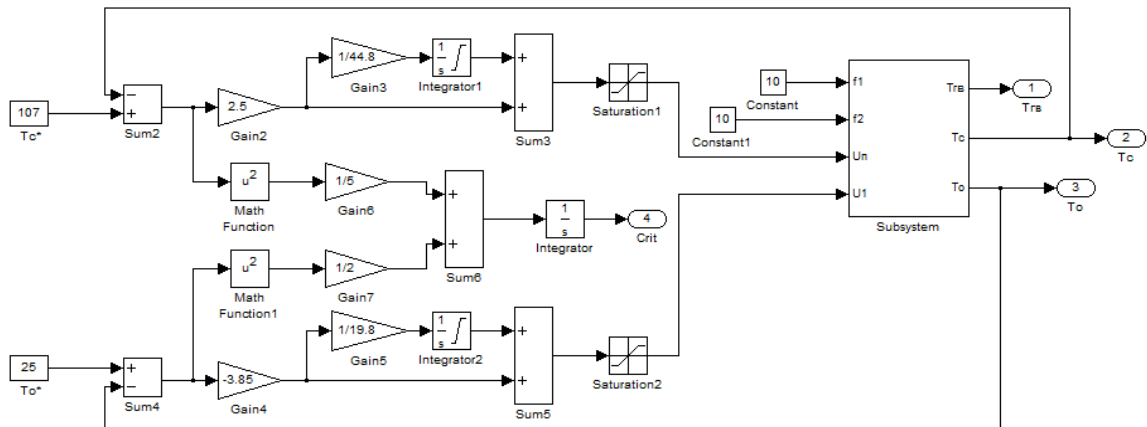


Рис. 1.83 – Структурна схема моделювання для порівняння САР з ПІ

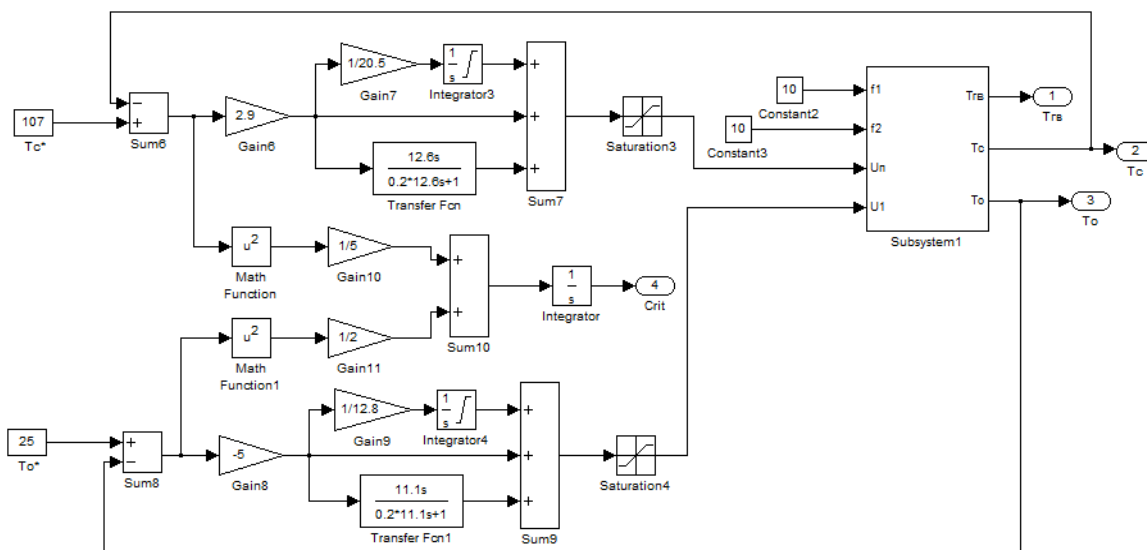


Рис. 1.84 – Структурна схема моделювання для порівняння САР з ПІД-регулятором

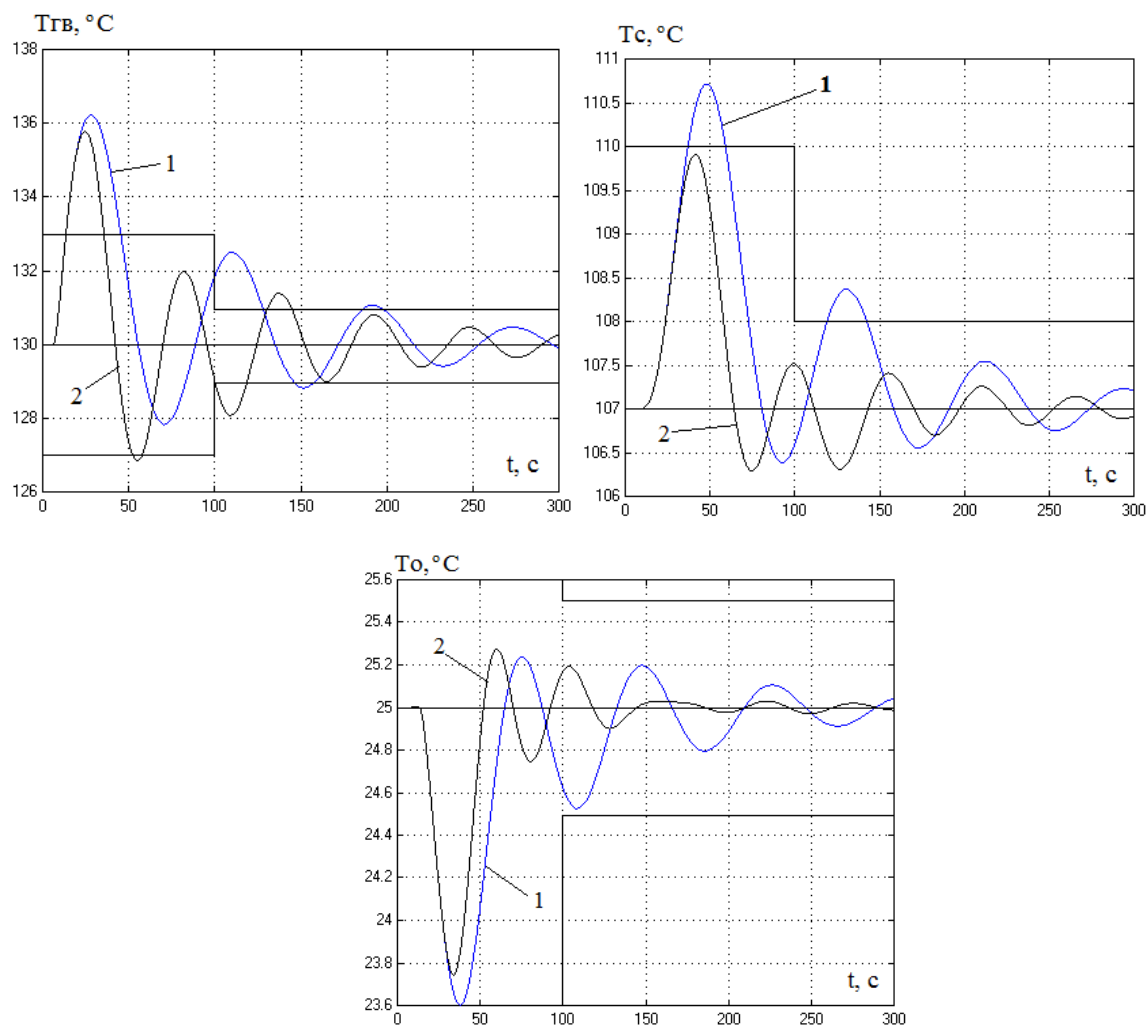


Рис 1.85 – Результати порівняння варіантів САР найпростішої структури: 1 - САР з ПІ-регулятором; САР з ПІД-регулятором

Таблиця 1.7 – Результати порівняння САР з ПІ- та ПІД-регулятором

Варіант САР	Прямі показники якості						Критерій
	$\Delta T_{ГВ}^{MAX},$ °C	$T_{пп1},$ с	$\Delta T_{с}^{MAX},$ °C	$T_{пп2},$ с	$\Delta T_{о}^{MAX},$ °C	$T_{пп3},$ с	
з ПІ-регулятором	6,25	197	3,7	142,5	1,4	56,4	117
з ПІД-регулятор.	5,8	143	2,92	58	1,3	46	54,6

Як видно з результатів роботи САР, за T_c САР з ПІ- не задовольняє гранично припустимим вимогам, за T_c САР з ПІД-регулятором, а також усі варіанти САР T_o задовольняють гранично припустимим вимогам.

В процесі роботи стерилізатора соку може змінюватися час запізнення в каналах ОК. Слід зазначити, що внаслідок нелінійності, параметри каналів

можуть варіювати в межах до $\pm 20\%$. САР з ПІ-регулятором, і з ПД-регулятором налаштовані і є грубими.

1.8 Висновки за розділом 1

У ході виконання цього розділу роботи було виявлено: що за усіма каналах об'єкт має статичні властивості і найбільш точно може бути описаний моделями другого порядку.

За температурою стерилізації САР базової структури з ПД-регулятором в перехідних режимах задовольняє гранично припустимим вимогам, а САР з ПІ-регулятором – не задовольняє. За температурою охолодження САР і з ПІ-, і з ПД-регулятором задовольняє гранично припустимим вимогам.

І САР з ПІ-регулятором, і САР з ПД-регулятором є грубими. З усього вище сказаного можна зробити висновок, що за переважною більшістю показників якості САР з ПД-регулятором є кращою, ніж САР з ПІ-регулятором. Тому в подальших дослідженнях в якості базового алгоритму регулювання будемо застосовувати ПД-регулятор.

РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК СТЕРИЛІЗАЦІЇ ТОМАТОПРОДУКТІВ

2.1 Синтез і аналіз САК підвищеної динамічної точності

Аналізуючи об'єкт регулювання ми бачимо, що він має структуру з проміжною точкою, доступною для вимірювання. Це дає нам підстави для побудови каскадної САР. Каскадні системи застосовують для автоматизації об'єктів, що мають велику інерційність за каналом регулювання, якщо можна вибрати менш інерційну по відношенню до найбільш небезпечним збурень проміжну координату і використовувати для неї ту ж керуючу дію, що і для основного виходу об'єкту.

Оскільки в ОК присутня проміжна точка, то інформацію з неї можна використати для підвищення динамічної точності САР температури стерилізації шляхом компенсації частини збурень у проміжній точці. Структурна схема САР процесу стерилізації соку каскадної структури наведена на рис. 2.1.

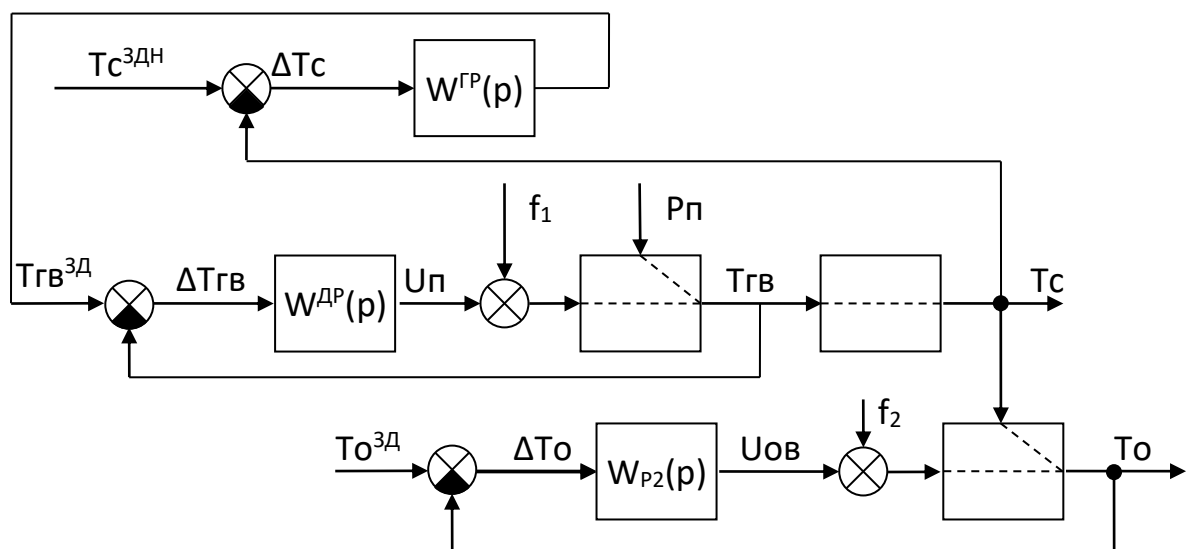


Рис. 2.1 – Структурна схема САК каскадної структури

Позначення на схемі:

T_c – температура стерилізації;

$T_{гв}$ – температура гарячої води;

T_o – температура охолодження;

P_p – тиск пари в паропроводі (контрольоване збурення);

U_p – положення регулюючого органу подачі пари;

$U_{ов}$ – положення регулюючого органу подачі охолоджуючої води;

f_1, f_2 – вектори неконтрольованих збурень;

$W^{TP}(p)$ – передаточна функція головного регулятора;

$T_c^{3ДН}$ – задане значення температури стерилізації;

ΔT_c – помилка регулювання температури стерилізації;

$W^{DP}(p)$ – передаточна функція допоміжного регулятора;

$T_{гв}^{3ДН}$ – задане значення температури гарячої води;

$\Delta T_{гв}$ – помилка регулювання температури гарячої води;

$W_{P2}(p)$ – передаточна функція регулятора температури охолодження;

$T_o^{3ДН}$ – задане значення температури охолодження;

ΔT_o – помилка регулювання температури охолодження.

Каскадний контур регулювання включають два регулятори – *головний* (зовнішній) регулятор, що служить для стабілізації основного виходу об'єкту T_c , і *допоміжний* (внутрішній) регулятор, призначений для регулювання допоміжної координати $T_{гв}$. Завданням для допоміжного регулятора служить вихідний сигнал основного регулятора.

У якості алгоритму регулювання допоміжного регулятора обираємо ПІ-закон регулювання. Початкові наближення параметрів допоміжного регулятора розраховуватимемо за методикою Копеловича на основі передаточної функції ОК за каналом « $U_p - T_{гв}$ »:

$$W_0(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-9,8p}}{7,1p + 1}$$

Параметри допоміжного регулятора:

$$K_p = \frac{0,8 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{0,8 \cdot 7,1}{0,7 \cdot 9,8} = 0,83 \frac{\% \delta \cdot \delta \cdot \hat{I}}{0 \tilde{N}} \quad T_{I\zeta} = 2,5 \cdot \tau_o = 2,5 \cdot 9,8 = 24,5 \text{ñ}.$$

Для розрахунку параметрів головного регулятора слід отримати параметри еквівалентного об'єкту керування.

$$K_{EOY} = k_{T_{ГВ}^{3\lambda}-T_{ГВ}}^c \cdot k_{T_{ГВ}-T_c}^o$$

$k_{T_{ГВ}^{3\lambda}-T_{ГВ}}^c = 1$ для астатичної САР (допоміжний регулятор містить І-складову, а значить САР у внутрішньому контурі є астатичною).

Передаточна функція ОК за каналом «ТГВ – Тс»:

$$W_0(p) = \frac{\frac{6}{7} \cdot e^{-5,3p}}{17,7p + 1}$$

а значить $k_{T_{ГВ}-T_c}^o = 6 / 7$, тоді

$$K_{EOY} = k_{T_{ГВ}^{3\lambda}-T_{ГВ}}^c \cdot k_{T_{ГВ}-T_c}^o = 1 \cdot 6 / 7 = 0,86.$$

$$T_{EOY} = 0,5 \cdot T_{УП-ТГВ} + T_{ТГВ-Тс} = 0,5 \cdot 7,1 + 17,7 = 21,25 \text{ с}$$

$$\tau_{EOY} = \tau_{УП-ТГВ} + \tau_{ТГВ-Тс} = 9,8 + 5,3 = 15,1 \text{ с}.$$

У якості головного регулятора обираємо ПІД-регулятор. Параметри головного регулятора:

$$K_P = T_{EOY} / (K_{EOY} \cdot \tau_{EOY}) = 21,25 / (0,86 \cdot 15,1) = 1,6$$

$$T_{I\zeta} = 2 \cdot \tau_{EOY} = 2 \cdot 15,1 = 30,2 \text{ с}; \quad T_{УП} = \tau_{EOY} = 15,1 \text{ с}$$

Схема моделювання каскадної САР для оптимального параметричного синтезу наведена на рис. 2.2. Результати оптимізації налаштувань регуляторів каскадної САР наведено на рис. 2.3.

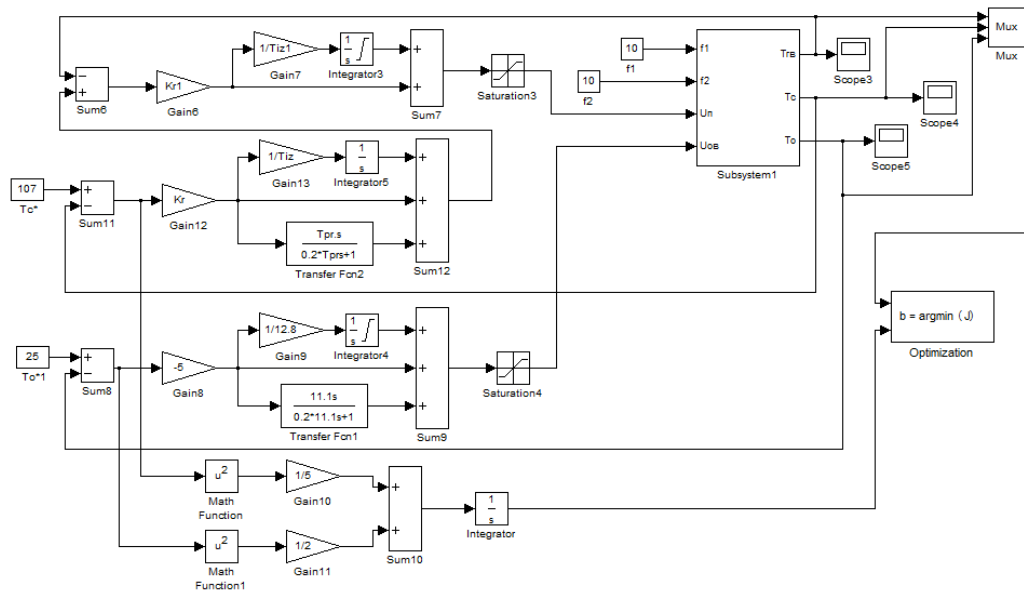


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання каскадної САК для оптимального параметричного синтезу

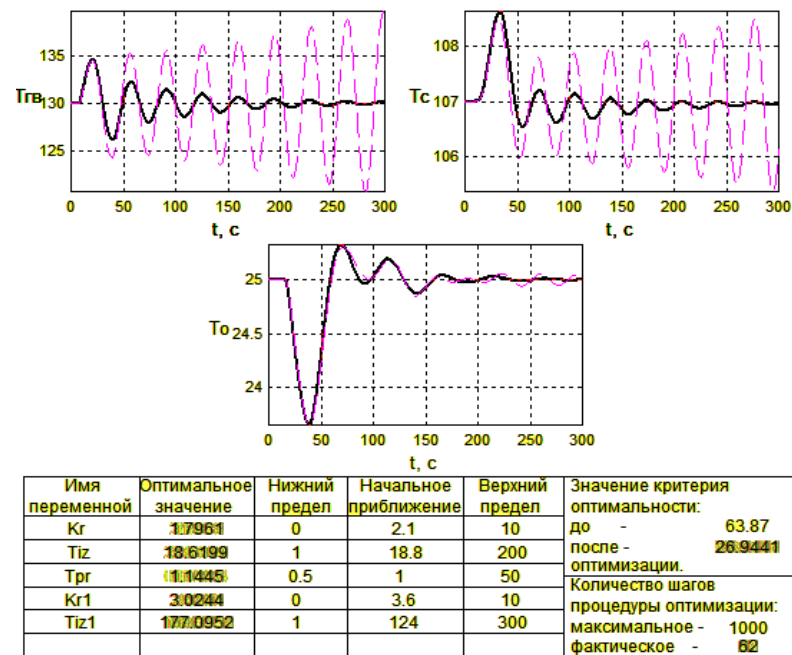


Рис. 2.3 – Результати оптимізації налаштувань регуляторів каскадної САК при «несприятливих» для керування параметрах ОК

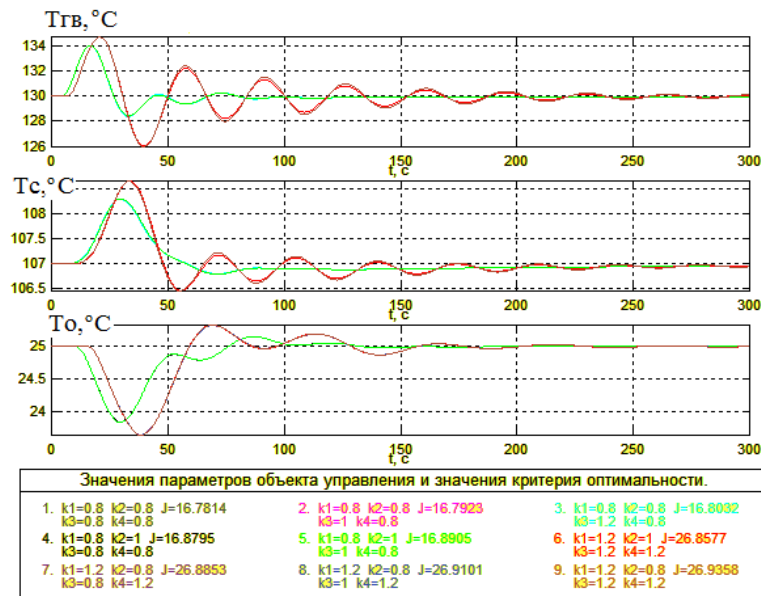


Рис. 2.4 – Результати перевірки САР каскадної структури на грубість

Як видно параметрично оптимальна каскадна САР є грубою, оскільки за всіма параметрами дає перехідні процеси, що сходяться.

Для порівняння якості роботи САР базової структури і підвищеної динамічної точності розроблено структурну схему моделювання, яка наведена на рис. 2.5...2.7. Результати порівняння наведені на рис. 2.28 і в таблиці 1.7.

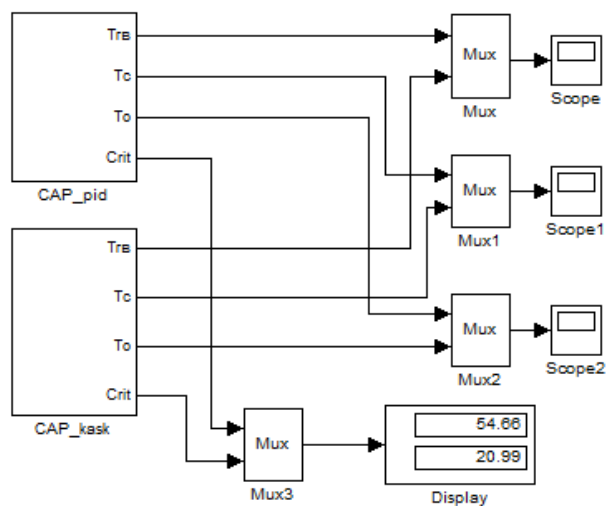


Рис. 2.5 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і підвищеної динамічної точності

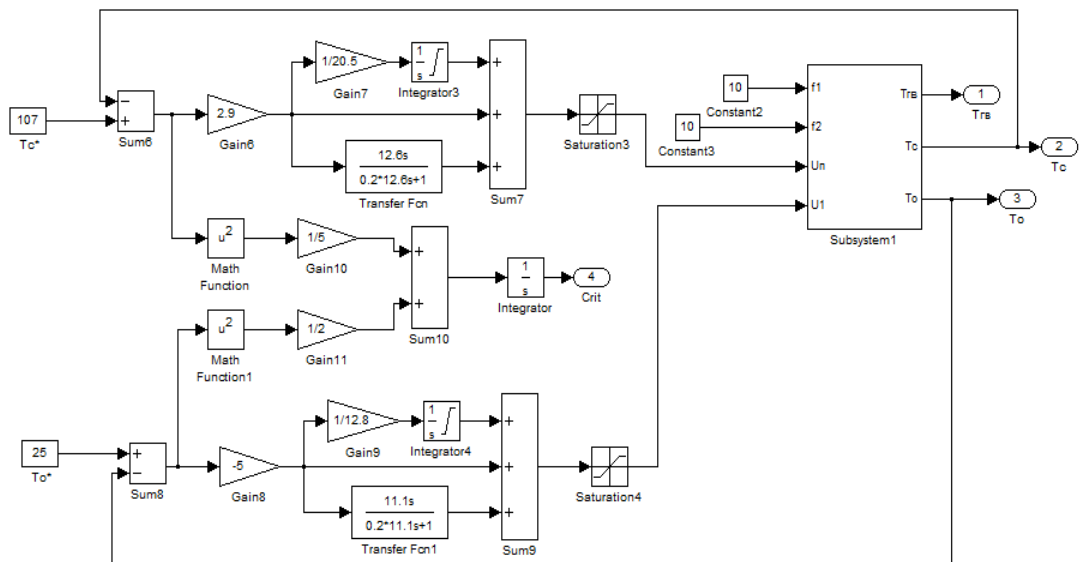


Рис. 2.6 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і підвищеної динамічної точності

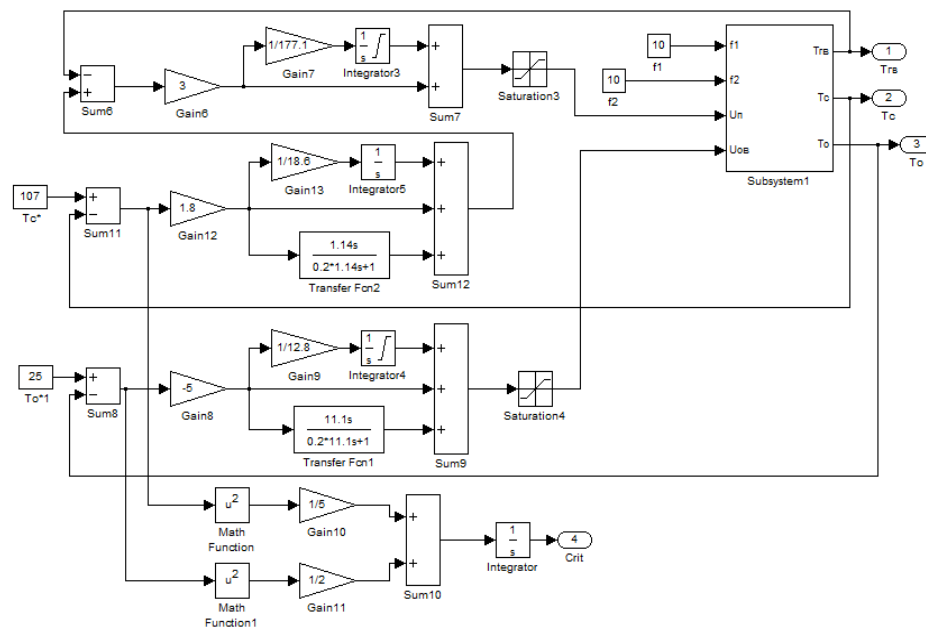


Рис. 2.7 (закінчення) – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і підвищеної динамічної точності

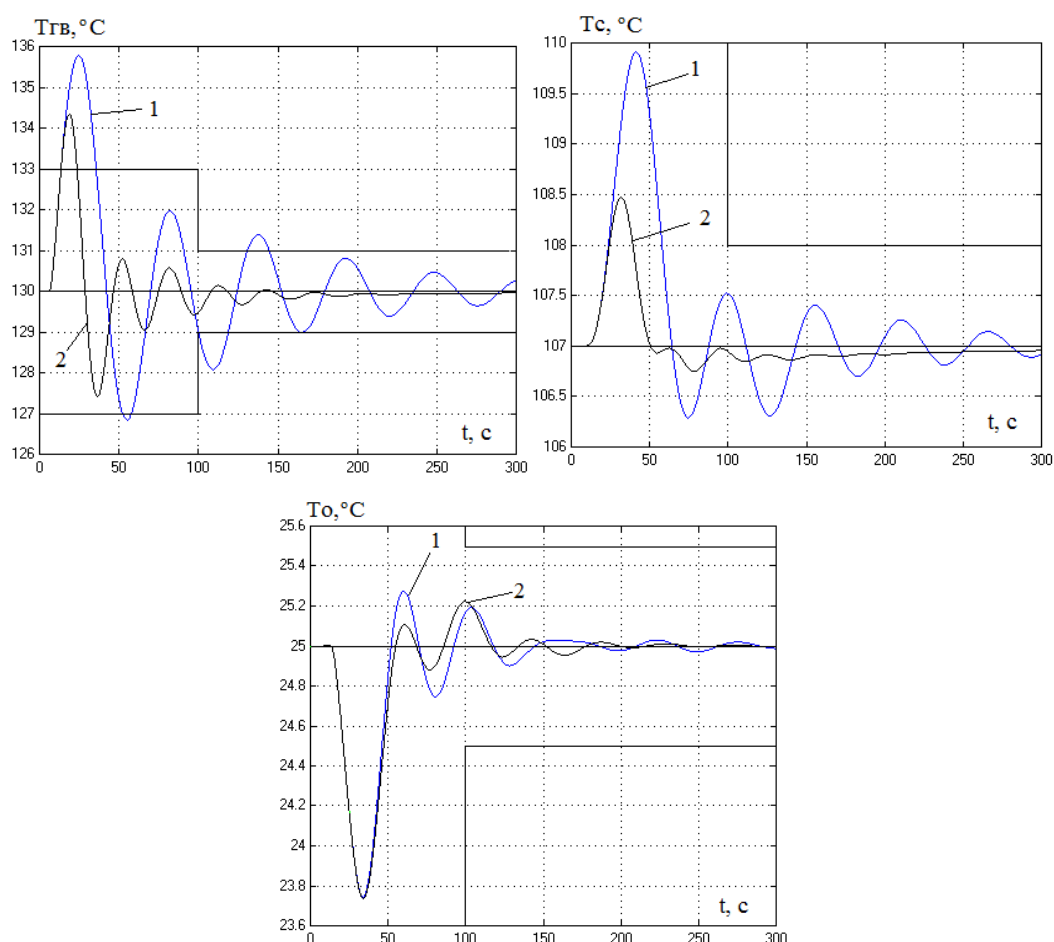


Рис. 2.8 – Результати порівняння САР базової структури з ПД-регулятором (1) і САР підвищеної динамічної точності (2)

Таблиця 1.8 – Результати порівняння САР базової структури та САР підвищеної динамічної точності

Варіант САР	Прямі показники якості						Критерій
	$\Delta T_{ГВ}^{MAX}$, °C	$T_{пп1}$ с	ΔT_c^{MAX} , °C	$T_{пп2}$ с	ΔT_o^{MAX} , °C	$T_{пп3}$ с	
Базова	5,8	143	2,92	58	1,3	46	54,66
Каскадна	4,35	43,4	1,48	39,2	1,3	47,15	20,99

Для порівняння якості роботи САР базової структури і підвищеної динамічної точності в сталих режимах розроблено структурну схему моделювання, наведену на рис. 2.9. Результати порівняння наведені на рис. 2.10 і в таблиці 1.8.

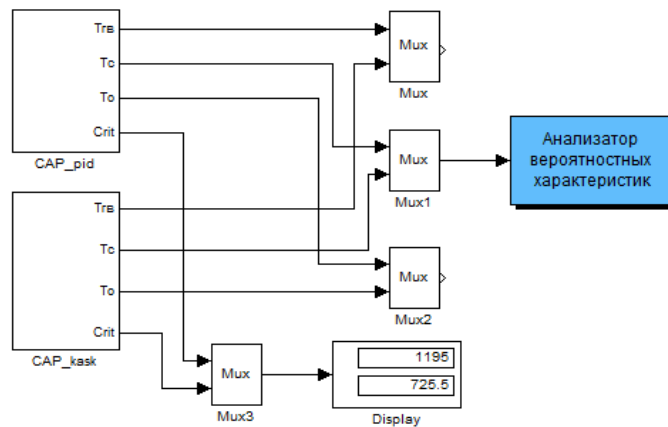
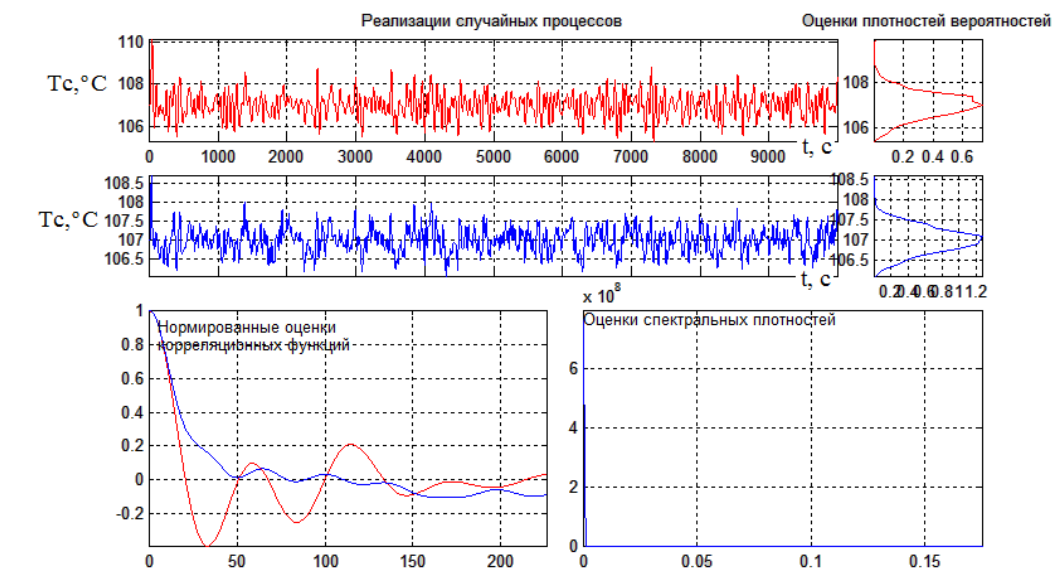


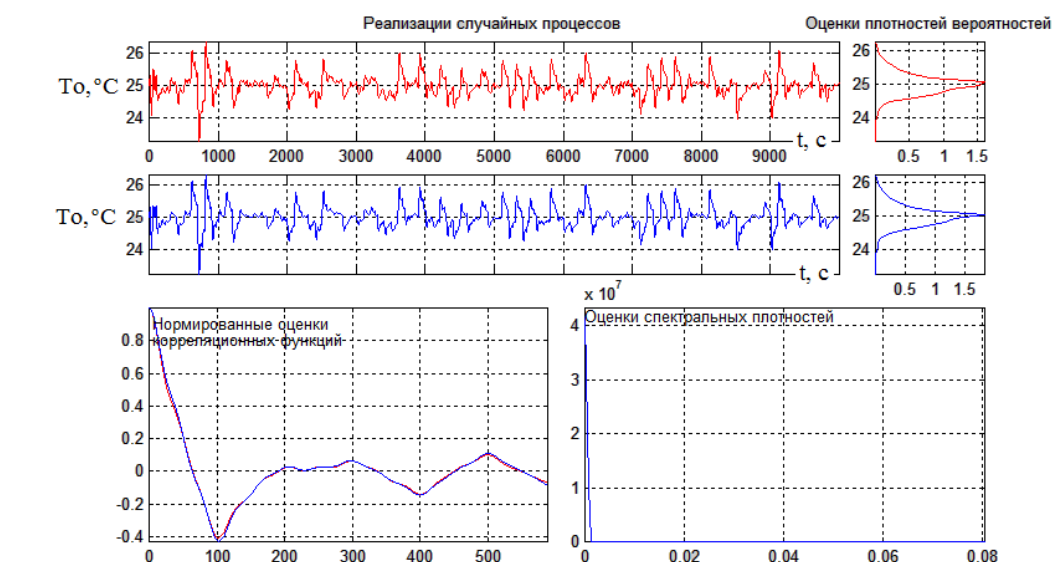
Рис. 2.9 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи CAP базової структури і підвищеної динамічної точності у сталих режимах

Таблиця 1.9 – Результати оцінки CAP базової структури і CAP підвищеної динамічної точності у сталих процесах

Показники якості	Варіант CAP	
	Базова	Каскадна
$T_{гв}, ^\circ\text{C}$		
Математичне очікування	130,1	130
Середньоквадратичне відхилення	1,8	1,6
Середньоквадратичний період	87,7	73,5
$T_c, ^\circ\text{C}$		
Математичне очікування	107	107
Середньоквадратичне відхилення	0,57	0,32
Середньоквадратичний період	75,5	71,7
$T_o, ^\circ\text{C}$		
Математичне очікування	25	25
Середньоквадратичне відхилення	0,33	0,32
Середньоквадратичний період	156,3	196,1
Інтегральний критерій	1195	725,5



Числовые оценки по всему интервалу моделирования:	Номер процесса	
	1	2
Оценка среднего значения (математического ожидания)	107.0	107.0
Оценка среднеквадратического отклонения	0.57	0.32
Оценка среднеквадратического периода / частоты	75.5 / 0.083	71.7 / 0.088



Числовые оценки по всему интервалу моделирования:	Номер процесса	
	1	2
Оценка среднего значения (математического ожидания)	25.0	25.0
Оценка среднеквадратического отклонения	0.33	0.32
Оценка среднеквадратического периода / частоты	156.3 / 0.04	196.1 / 0.032

Рис. 2.10 – Результати оцінки САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності у сталих процесах

2.2. Визначення недоліків існуючих САК і формулювання мети вдосконалення систем автоматичного керування процесом стерилізації томатопродуктів

Розглянуті у пункті 2.1 варіанти САУ процесом стерилізації томатопродуктів обмежуються функціями регулювання температури стерилізації соку та температури охолодження соку. Для регулювання температури стерилізації соку реалізовано каскадний принцип керування, де в якості проміжної точки використовується температура гарячої води. В умовах дії збурень температура стерилізації соку буде підтримуватися на заданому значенні з досить високою динамічною точністю.

Але в існуючих системах відсутні функції, що забезпечують цілеспрямоване підвищення техніко-економічних показників процесу стерилізації томатопродуктів, та в умовах дії нестационарних координатних та параметричних збурень існуючі системи не здатні ефективно забезпечити зниження питомих енерговитрат на стерилізацію томатопродуктів, зокрема за рахунок підтримки температури стерилізації поблизу нижньої межі регламенту без її порушення. Тому метою вдосконалення САУ процесом стерилізації томатопродуктів є: зниження питомих енерговитрат (витрат енергії пари) на стерилізацію, при одночасному збереженні якості продукту, за рахунок реалізації функції гарантуючого керування температури стерилізації соку.

2.3. Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САУ процесом стерилізації томатопродуктів.

Технологічним регламентом процесу стерилізації томатопродуктів встановлено верхнє та нижнє обмеження на температуру стерилізації соку. Підтримка температури стерилізації соку ближче до нижньої межі регламенту без її порушень дозволить зберегти якість продукції та сталий режим роботи установки, зменшити витрати енергії на охолодження соку та підвищити техніко-економічні показники процесу, знизивши питомі витрати енергії пари.

В умовах діючих нестаціонарних збурень випадкового характеру, що призводять до постійної зміни температури стерилізації соку, рішення поставленого завдання є не тривіальним і може бути досягнуто при реалізації системи гарантуючого керування. Реалізація системи гарантуючого керування температурою стерилізації соку вимагатиме доповнення існуючих функцій САУ новою функцією: функцією гарантуючого керування.

Етапи розробки модернізованої системи керування будуть розглянуті в наступних розділах.

2.4 Висновки за розділом 2

САР з ПД-регулятором та САР каскадної структури в перехідних режимах задовольняє гранично припустимим вимогам за T_c та T_o , тобто за основними регульованими координатами.

Підвищення динамічної точності САР призводить до зменшення інтегрального критерію на 62%, зменшення максимального динамічного відхилення за температурою гарячої води на 25%, за температурою стерилізації на 49%, часу перехідного процесу за температурою гарячої води

на 70%, за температурою стерилізації на 32%. За температурою охолодження максимальне динамічне відхилення не змінилося, а час перехідного процесу збільшився (в рамках гранично припустимих вимог) на 3%.

І САР з ПІД-регулятором, і САР підвищеної динамічної точності є грубими.

З усього вище сказаного можна зробити висновок, що за більшістю показників якості САР каскадної структури є кращою, ніж САР з ПІД-регулятором. Тому в подальших дослідженнях в якості системи регулювання доцільно застосовувати САР каскадної структури.

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

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

Ефективне застосування традиційних систем керування на основі стандартних ПІД-регуляторів обмежена у рамках складності об'єкта керування. Якщо складність об'єкта невелика але нема відповідного математичного опису каналів регулювання і при цьому є досвід керування то можливо побудувати нечітку систему. Нечітке керування виявляється особливо корисним, коли технологічні процеси надто складні для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів, або коли доступні джерела інформації інтерпретуються якісно, не точно, невизначено. Нечітка логіка, на якій засноване нечітке керування, ближче за духом до людського мислення та природних мов, ніж традиційні логічні системи. Для технічних систем з випадковим характером впливу, що збурює, складністю розробки динамічної моделі, її високим порядком, 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. Основна перевага нечіткого підходу – можливість формування числа правил керування залежно від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурювань. Також 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 («fuzzy logic»).

Таким чином, якщо статична характеристика об'єкта керування має деяку невизначену нелінійності але є досвід керування в окремому випадку це процесом стерилізації томатного соку то можливо синтезувати нечітку системи керування. 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 достатньо добре представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку. Отже, спрощується і налаштування системи автоматичного регулювання.

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

У ході розробки моделі процесу стерилізації томатного соку як об'єкту регулювання визначено нелінійний характер статичних характеристик за різними каналами регулювання. Для такого процесу доцільно виконати синтез системи керування на базі апарата нечіткої логіки.

Для представлення нелінійної моделі об'єкта керування, до відповідних моделей каналів регулювання були визначені відповідні нелінійні ланки. Нелінійність було реалізовано за допомогою включення блоку Look up Table у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта керування з додатковими блоками Look up Table, що визначають нелінійність статичних характеристик, представлена на рисунку 3.1. На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкту керування, яка є більш розширеною моделлю, завдяки включення додаткових нелінійних ланок. У блоці Look up Table у табличній формі задається нелінійний зв'язок (залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

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

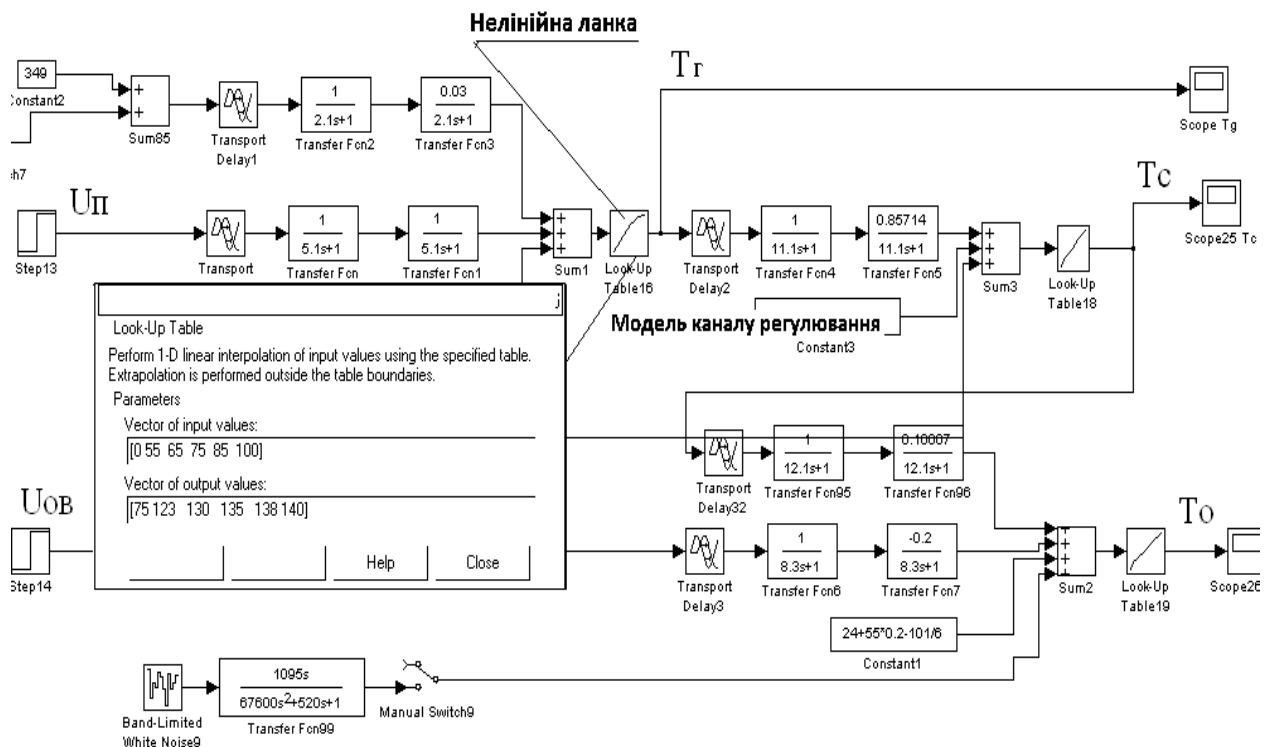


Рисунок 3.1. Структурна схема моделі об'єкта керування, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

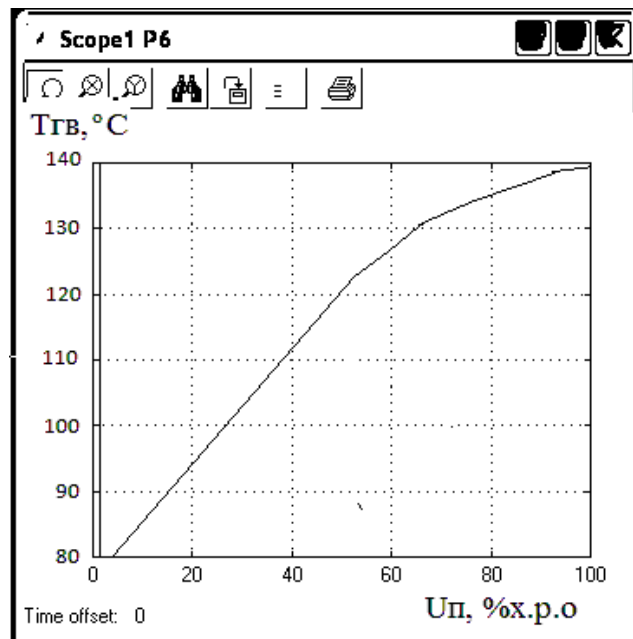


Рисунок 3.2. Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання «управляючий вплив за положенням регулюючого органу подачі пару – температура гарячої води»

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

У даній роботі був виконаний параметричний синтез САУ з традиційними – ПД регуляторами для об'єкта з нелінійними характеристиками за каналами регулювання. Слід зазначити, що нелінійність характеристик моделі є «гладкою» і несуттєвої для одержання стійких перехідних процесів при застосуванні традиційних – лінійних (П, ПІ, ПІД) регуляторів.

Параметри настроювання регуляторів були визначені на основі статичних і динамічних параметрів об'єкта 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

при мінімізації за наступним критерієм якості роботи системи:

$$J = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{5} \cdot e_1^2(t) + \frac{1}{2} \cdot e_2^2(t) \right) dt \rightarrow \min$$

$e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням температури стерилізації соку T_C ;

$e_2(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням температури охолодження соку T_O .

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

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

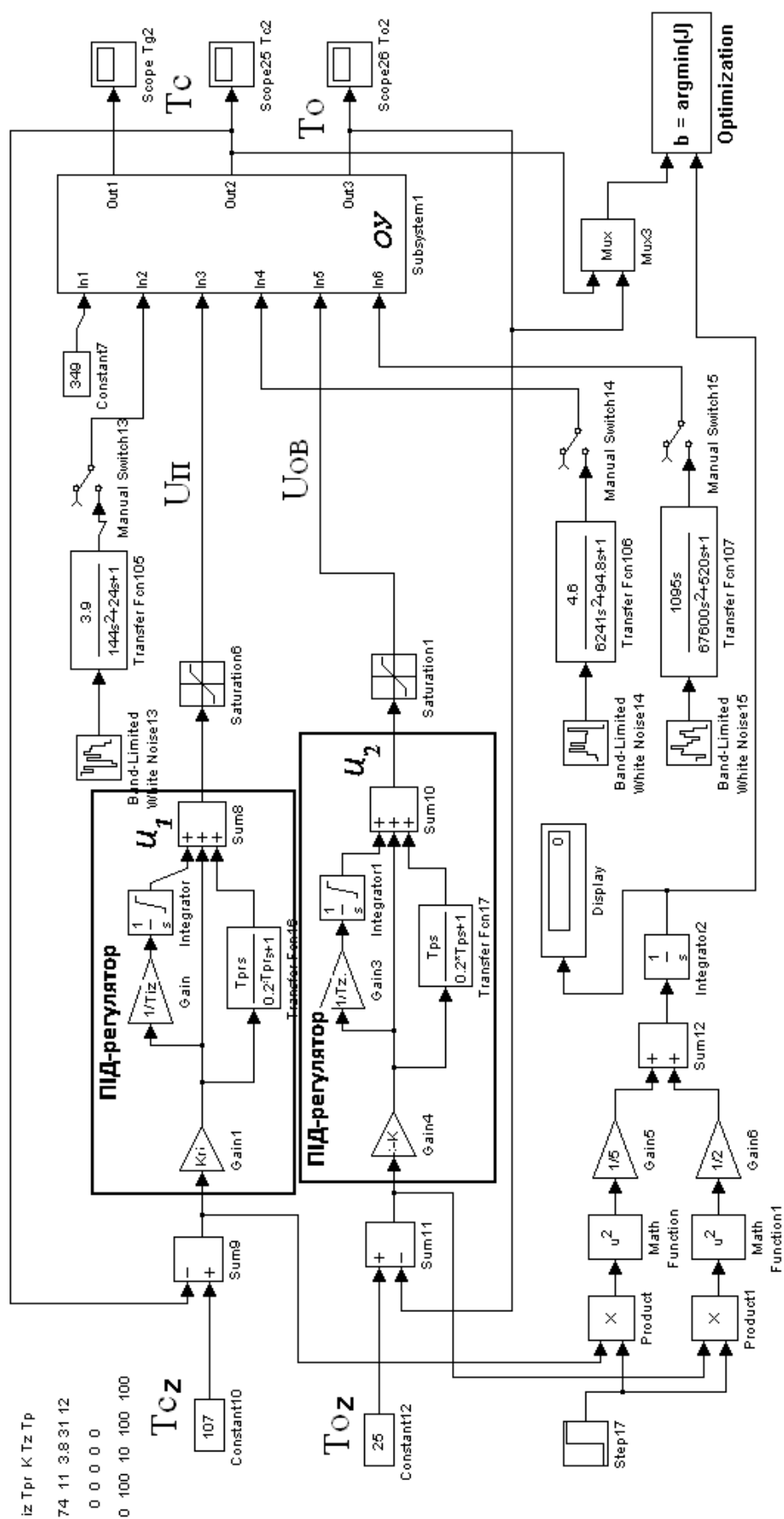


Рисунок 3.3. Структурна схема моделі САУ з традиційними ПІД-регуляторами і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів було

встановлено задане значення регульованої зміни і визначені допустимі короточасні відхилення протягом часу не більше 60 секунд. Всі ці дані відповідають перехідній характеристиці представленої після оптимізації.

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

Оптимізація

Конкретизация задачи оптимального параметричного синтеза (ОПС)

☐ ОПС в условиях параметрической неопределенности ОУ.
☒ ОПС при фиксированных параметрах ОУ.

Параметры объекта управления (ОУ)

Имя параметров: ko tau T T1
Номинальные значения: 3.4 2.5 12 10
Нижние значения диапазонов:
Верхние значения диапазонов:

Параметры, которые оптимизируются (аргументы)

Имя параметров: Kr Tiz Tz K Ti T
Начальные приближения: 3 25 10 -1.8 21 10
Нижние границы: 0 0 0 -10 0 0
Верхние ограничения: 10 100 100 0 100 100

Условия оптимизации (Симплекс метод Нелдера-Мида)

Максимальная количество шагов процедур оптимизации: 100
Минимальное приращение аргументов: 0.01
Минимально значимое приращение критерия: 0.001

Визуализация результатов

Количество графиков: 2
Имена переменных отображаемых на графиках: y, x

Старт Отмена

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

Необхідно зазначити що оптимізацію проводили поетапно з урахуванням нелінійності характеристики каналу регулювання, оптимізували параметри двох регуляторів одночасно так і роздільно за

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

Оптимізація проводилась на проміжку часу від 500 секунд коли в систему було введено східчастий вплив що збурює якій відхиляє температуру стерилізації T_C від заданого значення..

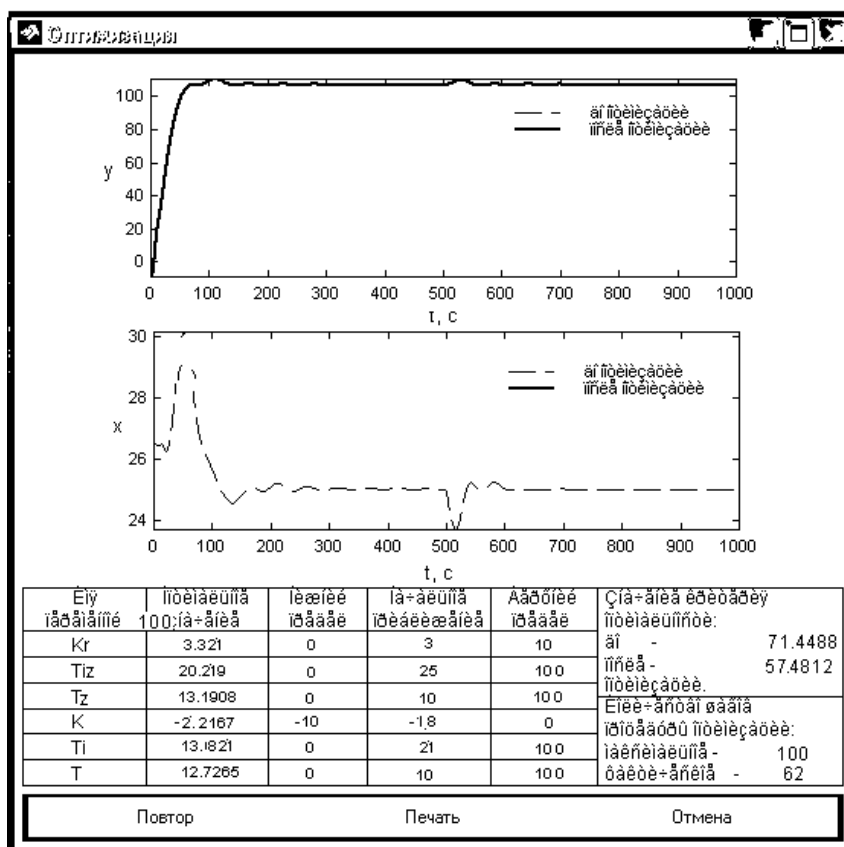


Рисунок 3.5 Вікно результату оптимізації CAP з традиційними ПД регуляторами

Також біла проведена перевірка на грубість САР з каналом регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою. САР була відповідно з оптимізованими ПД-регуляторами за відповідним критерієм якості роботи системи. Параметри перевірки системи на грубість представлені на рисунку 3.6. Значення цих параметрів однакові при різних випадках дослідження систем в рамках лінійних і нелінійних моделей.

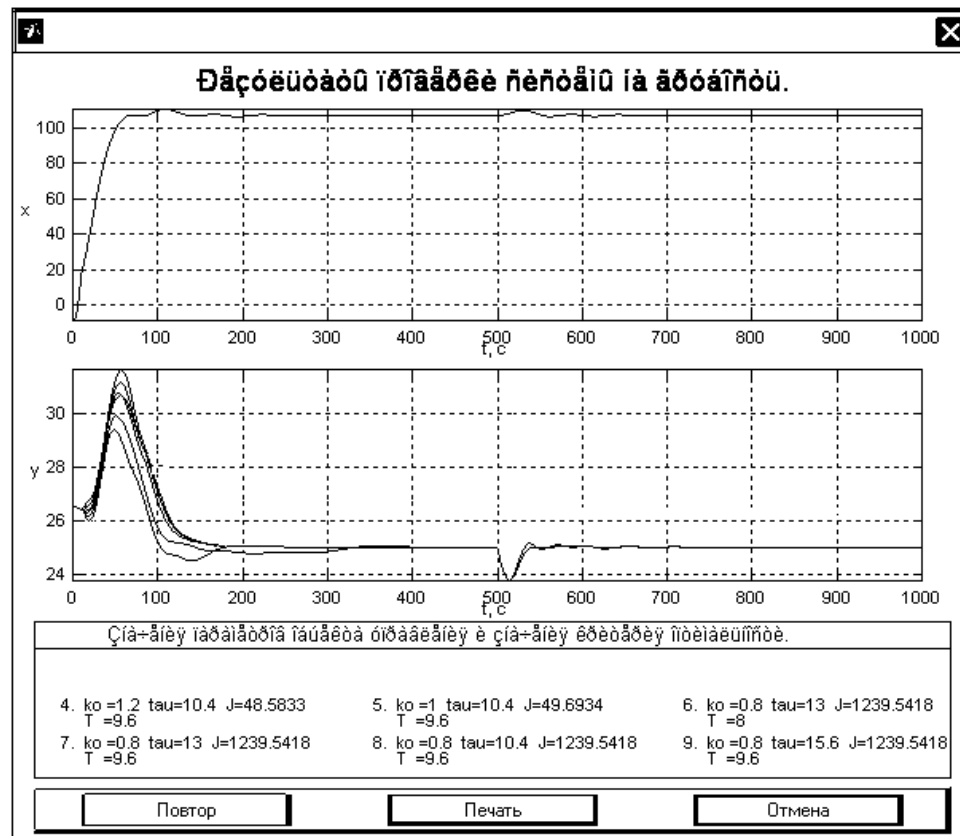


Рис. 3.6 – Результати перевірки САР на грубість

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

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

Нечітка логіка в ПД-регуляторах використовується переважно двома шляхами: для побудови самого регулятора і для організації підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора. Оба шляхи можуть використовуватися в ПД-контролері одночасно. В нашому випадку нечітка логіка використовується для побудови самого регулятора за відомими схемами. Складність опису статичних режимів роботи об'єкта приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними. Таким чином, у справжній роботі була реалізована модель САУ із Fuzzy – нечітким регулятором.

В 1974 році Мамдани [Mamdani] показав можливість застосування ідей нечіткої логіки для побудови системи керування динамічним об'єктом, а роком пізніше вийшла публікація [Mamdani], у якій був описан нечіткий ПД-регулятор і його застосування для керування парогенератором. З того часу область застосування нечітких регуляторів постійно розширюється, збільшується різноманітність їх структур і виконавчих функцій.

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

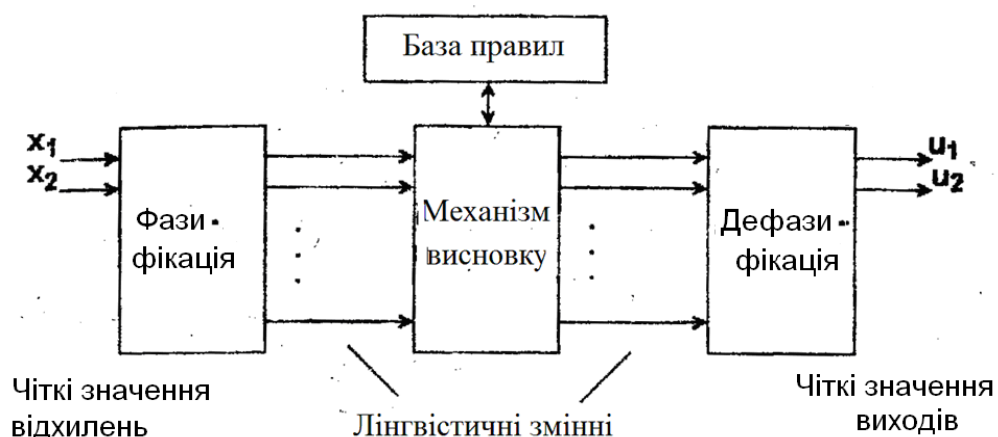


Рисунок 3.7. Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками. Всі визначені блоки (фазифікація, блок логічного розв'язку, дефазифікація), що представлені на рисунку 3.7, редагуються у відповідному редакторі FIS Editor середовища MATLAB. Для запуску вікна fis-редактора в командному вікні MATLAB Window commander було прописано команду «Fuzzy». Після чого було вибрано алгоритм Sugeno та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рисунку 3.8 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора температури T_c з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

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

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

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

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

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

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

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

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

Якщо як опція f використовується поліном $f(x) = C$, то говорять

про алгоритм Сугено 0-порядку. Тоді правила будуть мати наступний вигляд:

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

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

де C_1, C_2 - звичайні (чіткі) числа.

Далі алгоритм виконується за наступними етапами:

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

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

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

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

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

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

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

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

де n – загальна кількість активних правил нечітких продукцій

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

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

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

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

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

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

Відповідно вище представленим правилам складемо таблицю баз знань для НЛР температури стерилізації T_C .

Як видно з рисунку 3.8, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки

регулювання (input2). Для змінної input1 задаємо три трикутні функції приналежності «trimf». Це проста функція приналежності і найбільш часто застосовується. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

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

[a, c] – діапазон зміни змінної, для справжнього випадку a = - 70, c =70;

b - найбільш можливе значення змінної

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних.

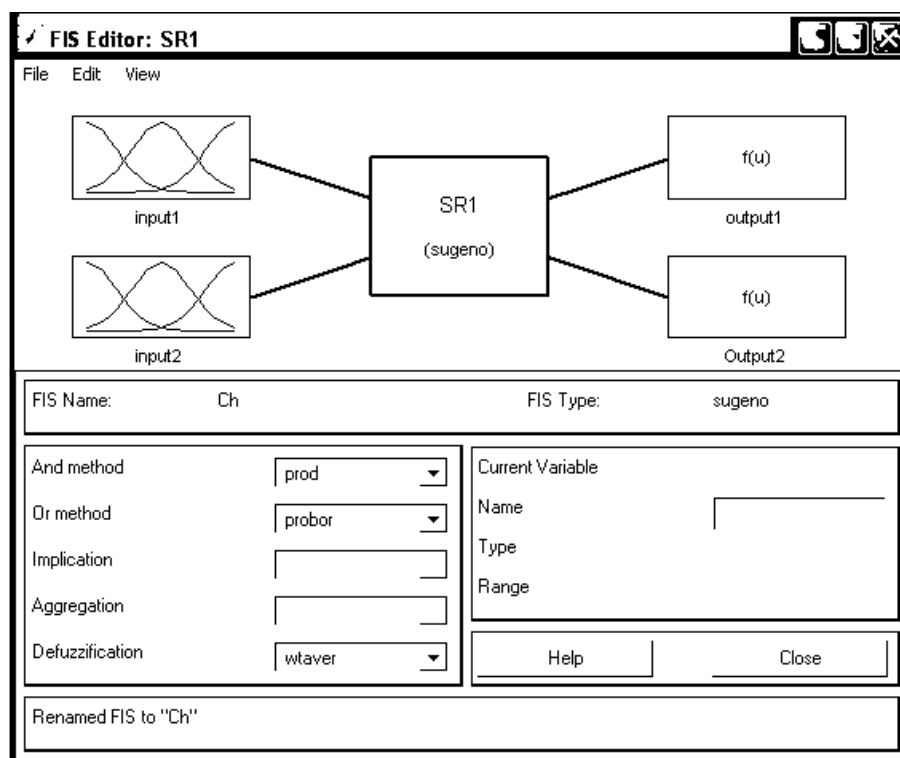


Рисунок 3.8. Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

На рисунку 3.9 зображено вікно налаштування функцій приналежності mf1, mf2, mf3 до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна»,

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

Згідно з таблицею 1 бази правил функціонування регулятора, були прописані відповідні правила у вікні редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink. Це вікно з відповідними правилами зображено на рисунку 3.11.

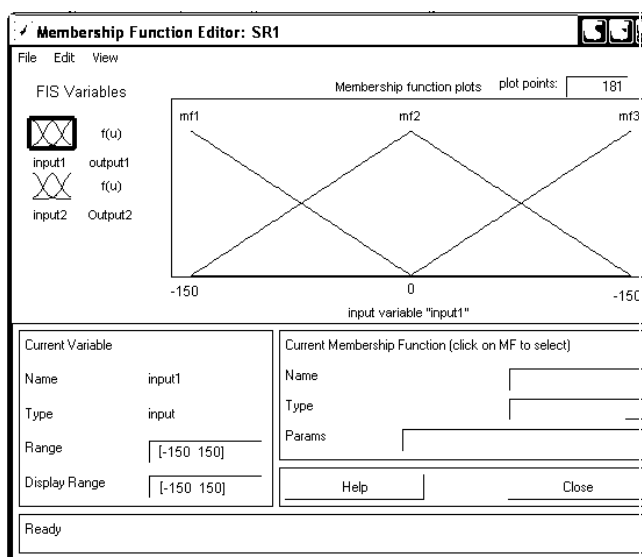


Рисунок 3.9. Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

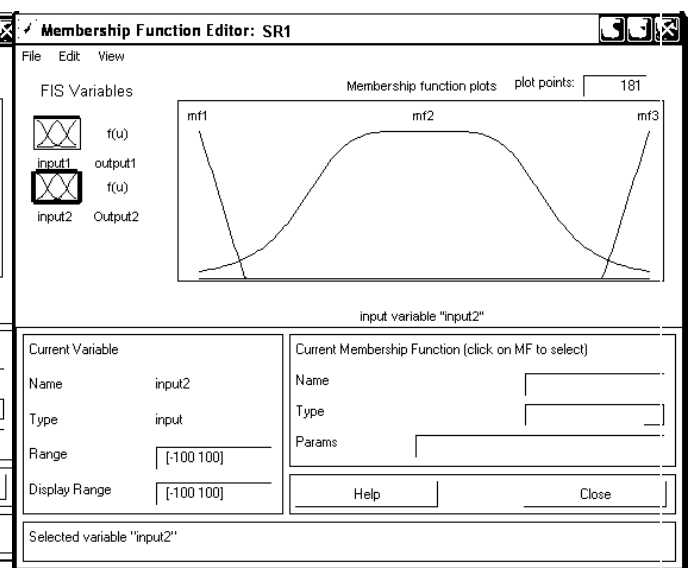


Рисунок 3.10. Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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

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

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

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

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

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора температури стерилізації T_c

e_1 Δe_1	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = -40$; $\Delta u_1 = -0,6$;	–
Z	$u_1 = -40$; $\Delta u_1 = -0,6$;	$u_1 = 0$; $\Delta u_1 = 0$;	$u_1 = 45$ $\Delta u_1 = 0,65$;
PE	–	$u_1 = 45$; $\Delta u_1 = 0,65$;	–

Для запуску синтезованого алгоритму перетягнуто на робоче поле створення моделі SIMULINK блок «Fuzzy Logic Controller» зі стандартної

бібліотеки. У відкритому вікні «Fuzzy Logic Controller» було записано в запропонованому полі ім'я fis-файлу, а в головному вікні налаштування fis-файлу було вибрано File / Save to Workspace для завантаження у робочій простір середовища MATLAB нечіткого алгоритму керування.

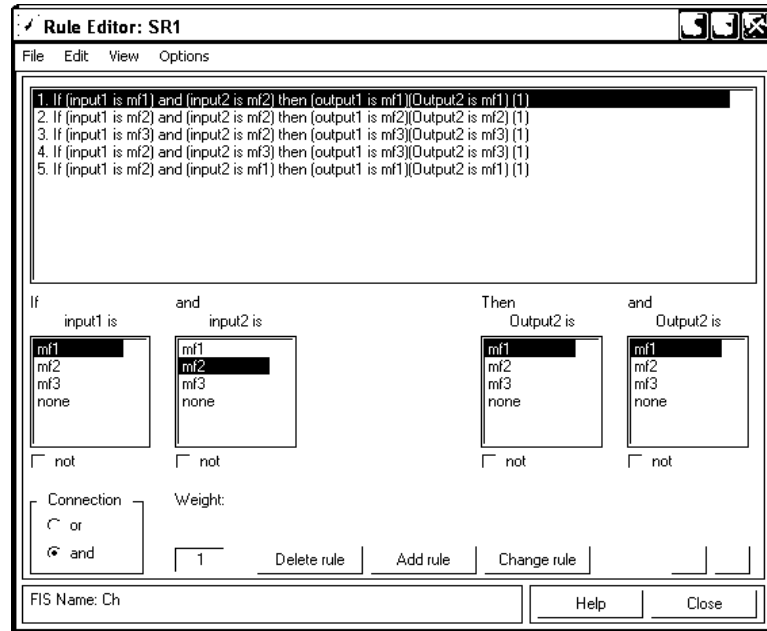


Рисунок 3.11. Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

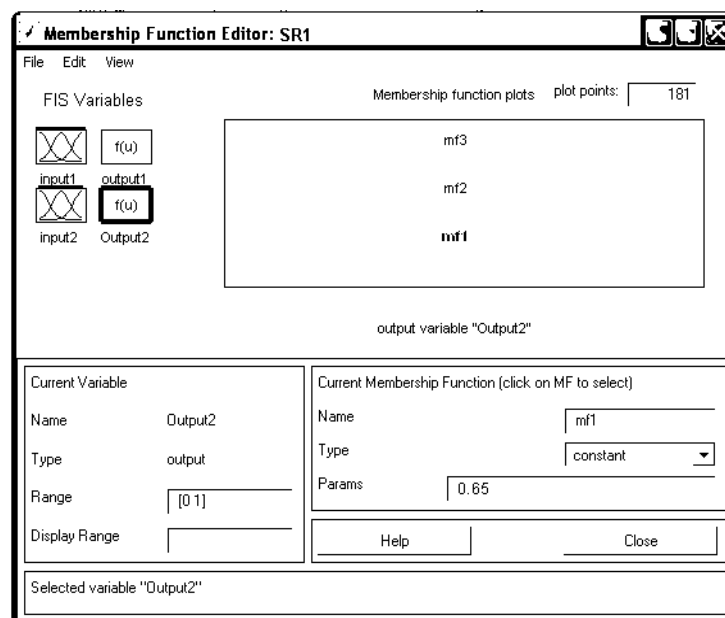


Рисунок 3.12. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з

нечітким регулятором, яка представлена на рисунку 3.14. З рисунку 3.14 видно, що управляюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

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

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

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

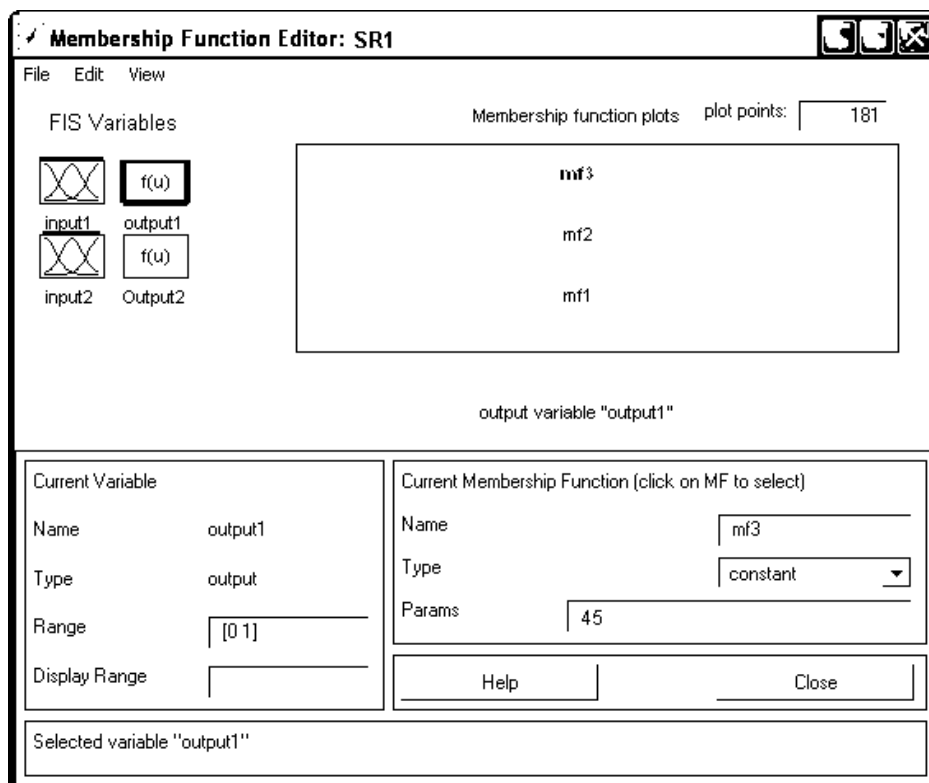


Рисунок 3.13. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

Аналогічним чином можливо синтезувати нечіткий регулятор для регулювання температури охолодження соку T_0 . Вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора температури води з відповідними вхідними та вихідними сигналами представлено на рисунку 3.15. Функції приналежності що представлені на рисунку 3.16 мають вигляд відповідно до іншого діапазону регулювання. База правил функціонування згідно з нечітким висновком Сугено 0-порядку така ж сама як у нечіткого регулятора температури стерилізації соку T_C але вихідні лінгвістичні зміни мають інші значення.

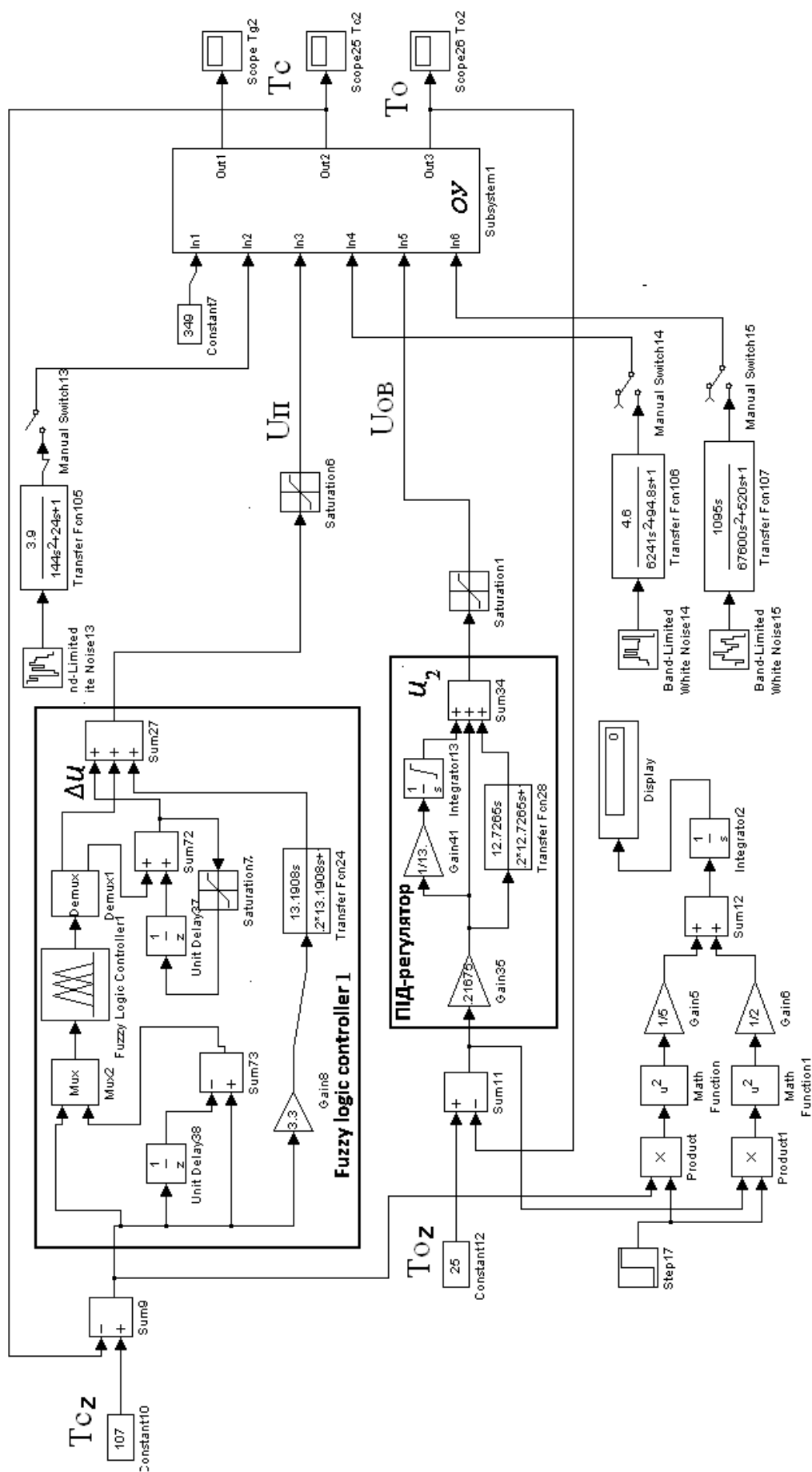


Рисунок 3.14 –Структурна схема моделі САУ з нечітким регулятором температури стерилізації T_c і ПІД регулятором температури охолодження соку, що реалізована засобами середовища MATLAB\Simulink

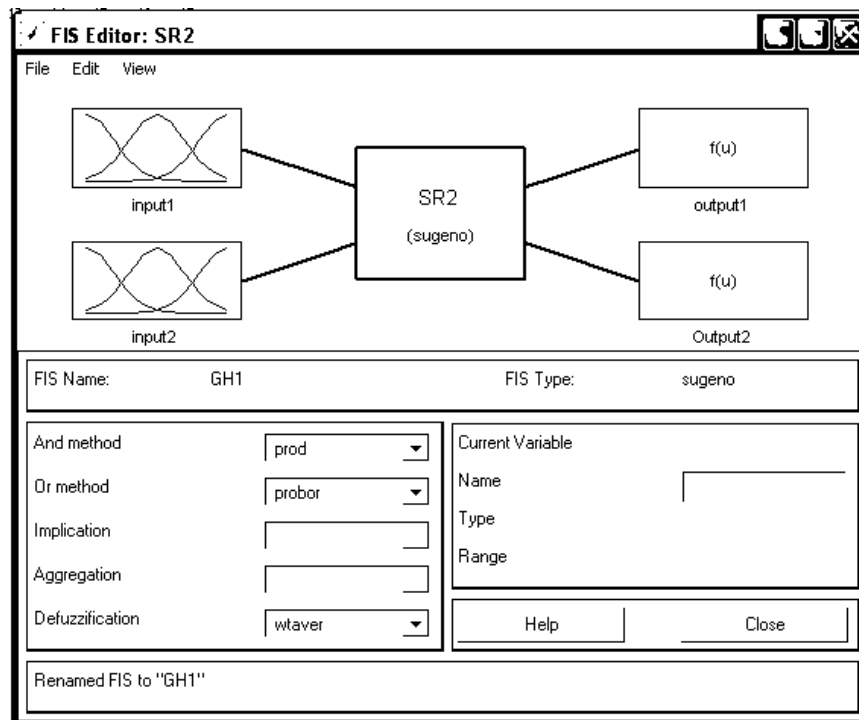


Рисунок 3.15. Вікно редактора нечіткого регулятора температури охолодження соку То з двома входами і двома виходами сигналів

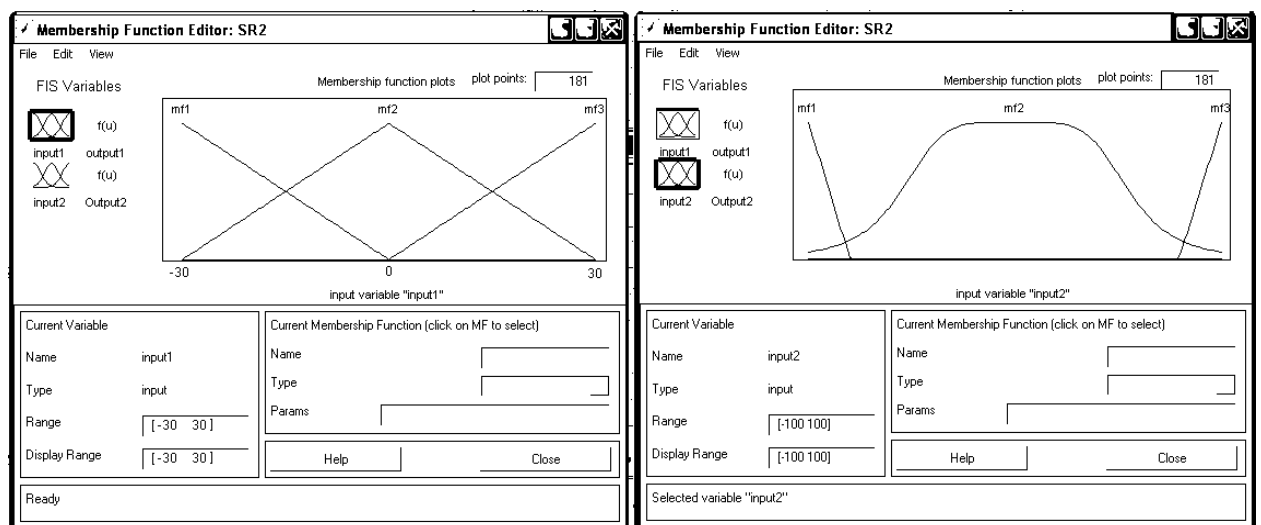


Рисунок 3.16. Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

Так на рисунку 3.18 . представлені вікна редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink на основі яких можливо сформувати таблицю бази правил нечіткого регулятора температури

охолодження соку T_o . Відповідна таблиця 3.2 представлена, на основі якої можливо записати всі правила логічного рішення згідно з алгоритмом Сугено $_0$ порядку.

Значення лінгвістичних змінних та відповідні функції приналежності багаторазово коректувалися для забезпечення відповідної якості роботи нечіткого регулятора.

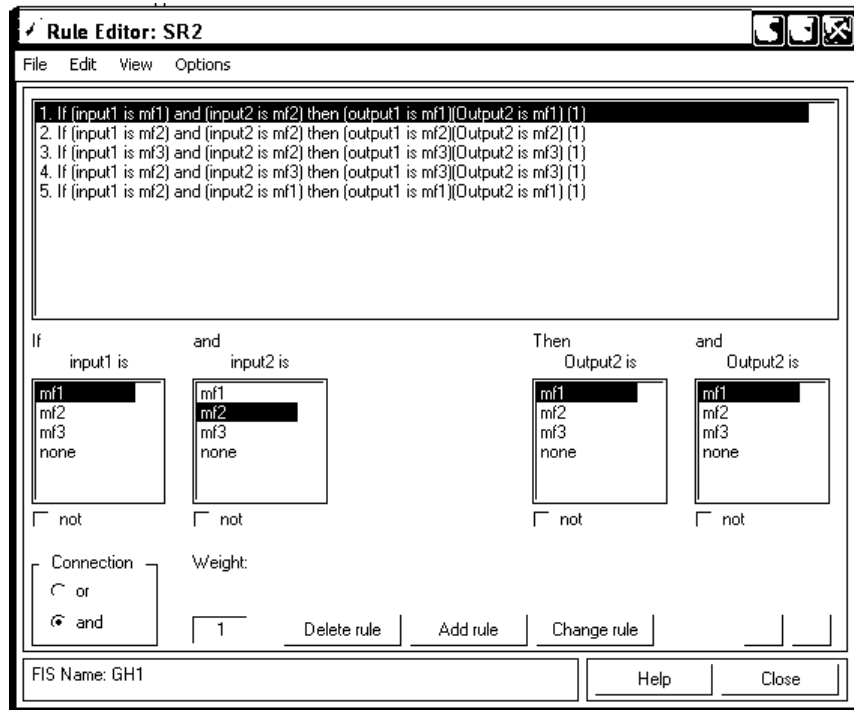


Рисунок 3.17. Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

Таблиця 3.2 – Таблиця бази знань для нечіткого регулятору температури води T_w

e_1 Δe_1	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	—	$u_1 = 55;$ $\Delta u_1 = 1.2;$	—
Z	$u_1 = 55;$ $\Delta u_1 = 1.2;$	$u_1 = 0;$ $\Delta u_1 = 0;$	$u_1 = -55;$ $\Delta u_1 = -1.2;$
PE	—	$u_1 = -55;$ $\Delta u_1 = -1.2;$	—

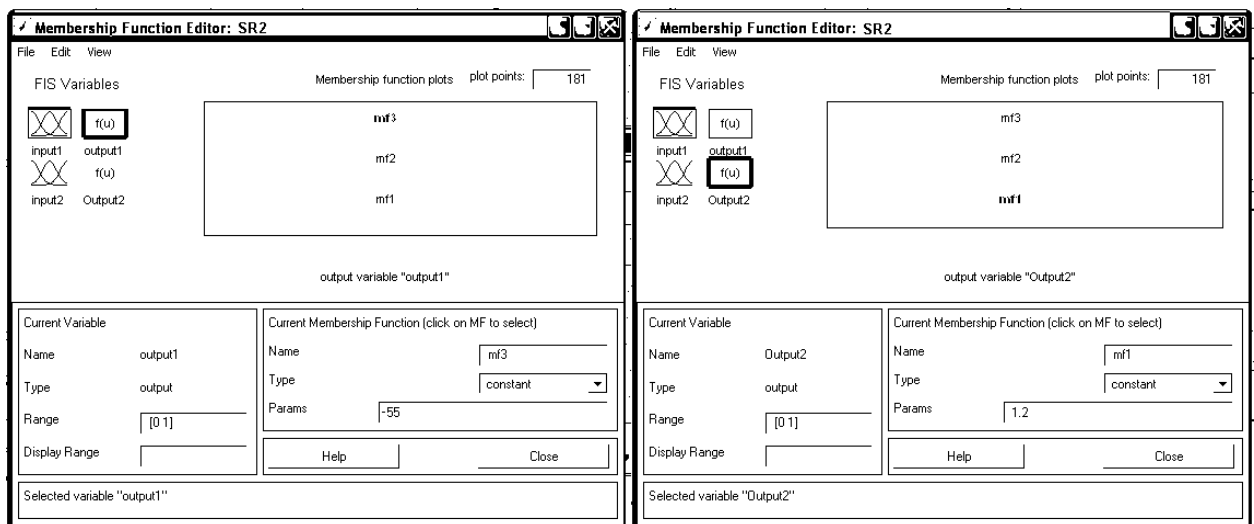


Рисунок 3.18. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

Була розроблена також модель САУ з нечіткими регуляторами структурна схема якої представлена на рисунку 3.19. В програмному середовищі MATLAB\Simulink було проведено моделювання різних САУ структурні схеми які представлені на рисунках 3.14 та 3.19. В результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів за температурою стерилізації соку T_c при використанні нечіткого і традиційного ПД регулятора і графіки перехідних процесів в САУ з нечітким регулятором температури охолодження соку T_o . Були отримані графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування і також перехідні процеси при детермінованому впливі, що збурює. Для порівняльного аналізу також були представлені відповідні графіки перехідних процесів у САУ з традиційним ПД-регулятором. З графіків перехідних процесів що представлені на рисунках 3.20 та 3.21 можливо побачити що САУ з нечітким регулятором за температурою стерилізації T_c та за температурою охолодження соку T_o функціонує за якістю регулювання також само як САУ з традиційними ПД регуляторами.

Підвищення якості регулювання можливо при перетворенні нечітких регуляторів в нейрорегулятори за відповідною методикою та оптимізації параметрів цих нейрорегуляторів за визначеними критеріями якості роботи системи.

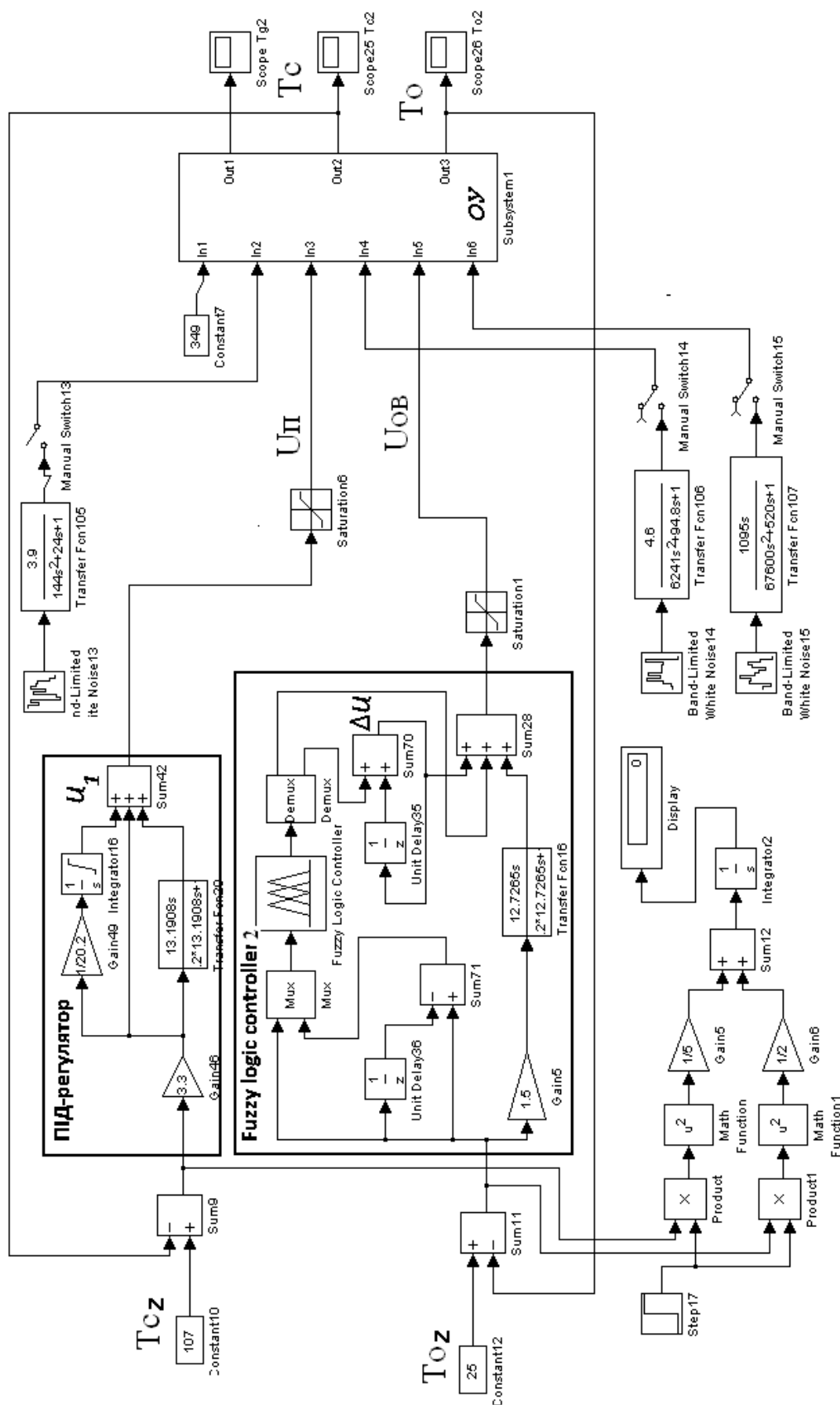


Рисунок 3.19 – Структурна схема моделі САУ з нечіткими регуляторами за температурою охолодження соку T_o і ПІД-регулятором температури стерилізації T_c , що реалізована засобами середовища

MATLAB\Simulink

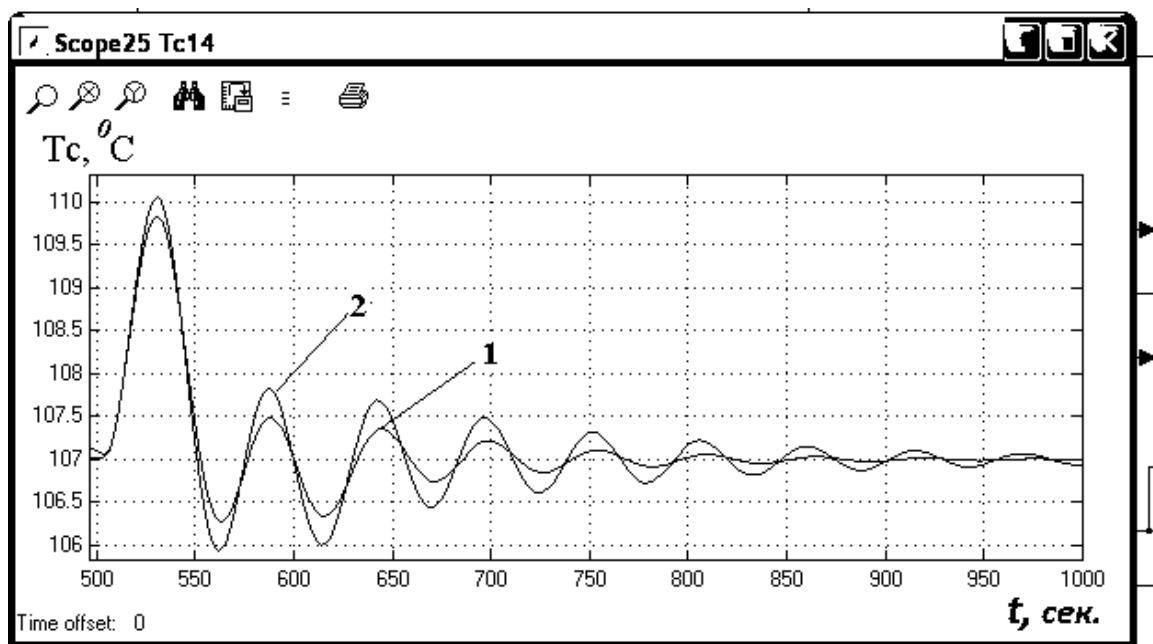


Рисунок 3.20. Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графіки 1– перехідний процес у САУ з ПІД регулятором; 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором температури стерилізації соку T_c ;

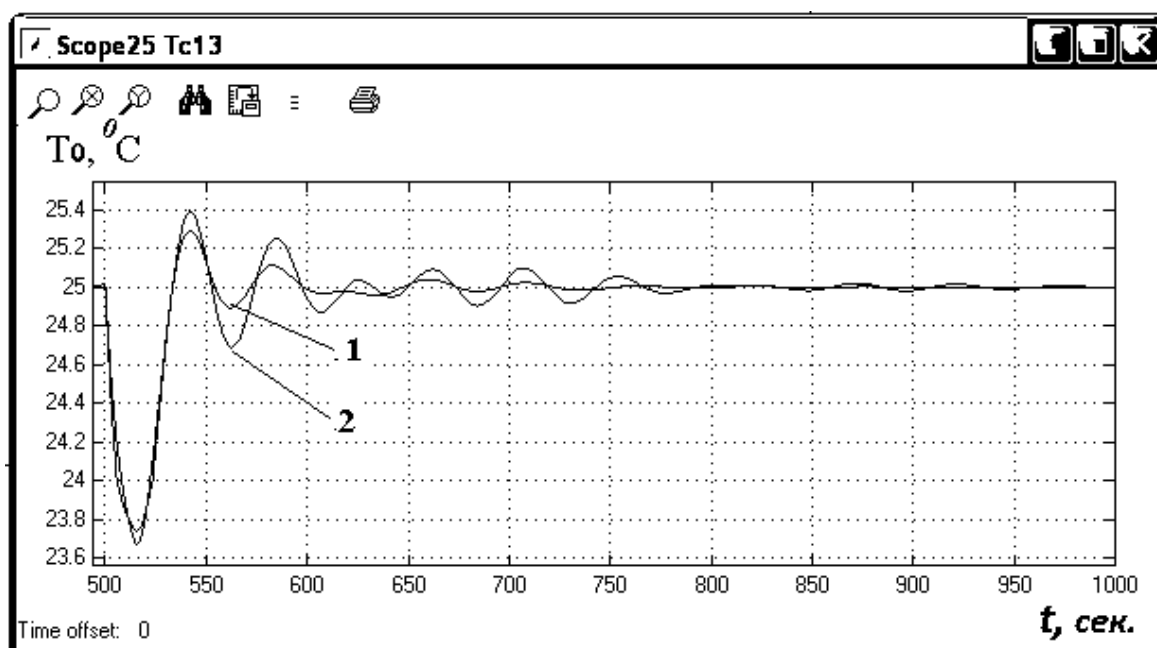


Рисунок 3.20. Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графіки 1– перехідний процес у САУ з ПІД регулятором; 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором температури охолодження соку T_o

3.5 Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів керування

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

Наприкінці XX-го століття в розвитку теорії автоматичного керування почався новий етап, пов'язаний з адаптивною постановкою основного завдання керування. Його особливість полягає у відсутності споконвічних знань про математичну модель об'єкта керування, будь то диференціальні рівняння або щільності ймовірностей випадкових зовнішніх впливів. Об'єкт — це чорний ящик, що зазнає невідомі випадкові впливи. Нам доступні тільки його входи і виходи. Ціль системи керування (СК) полягає в тому, щоб уже в процесі функціонування визначити закон регулювання, що забезпечує оптимальну поведінку об'єкта. Для розв'язання цього завдання на додаток до основного контуру до системи керування вводиться контур адаптації (Рисунок 3.22).

З самого початку третього етапу величезна увага приділялася адаптивному керуванню лінійними стаціонарними об'єктами з невідомими параметрами (наприклад, широко використовуються методики, що опираються на побудову спостерігачів). У рамках цього підходу в 80-х роках почалося використання ШНМ для розв'язання завдань керування. Отримані результати показали, що ШНМ являють собою не просто нову методику в

теорії автоматичного керування, а цілу парадигму. Для нового напрямку в теорії керування була введена окрема назва — нейрокерування (neurocontrol).

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

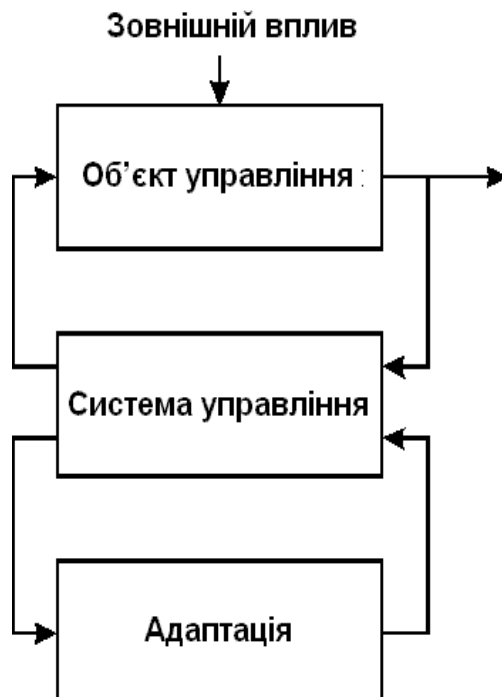


Рисунок 3.21. Загальна схема адаптивної системи керування

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

3.6 Синтез моделі САУ з нейрорегуляторами

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

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятора визначає приріст управляючої дія як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейронрегулятора необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку буде використано гіперболічну тангенціальну функцію ($\tanh$). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі керування. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.35.

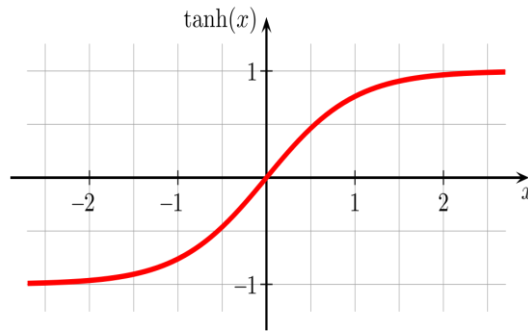


Рисунок 3.22. Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

В одній з перших робот з нейрокерування представляється дискретна СУ із НК, що одержує на вхід сигнал керування системою $u_r(k)$ і затримані в кілька разів сигнали з виходу об'єкта керування. У загальному випадку НК такого типу може одержувати і затримані сигнали зі свого виходу (рисунок 3.23). Таким чином, він формує керуючий вплив за наступним законом:

$$u(k) = NN(y(k), y(k-1), \dots, y(k-l_1), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-l_2), u_r(k)), \quad (5)$$

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

Якщо тип САУ з комбінованим регулятором є компромісним розв'язком у рамках класичного підходу, коли нейронні мережі використовуються з стандартним законом ПД регулювання як єдиний алгоритм, то другий тип що представлений на рисунку 3.36 побудований тільки на ШНМ.

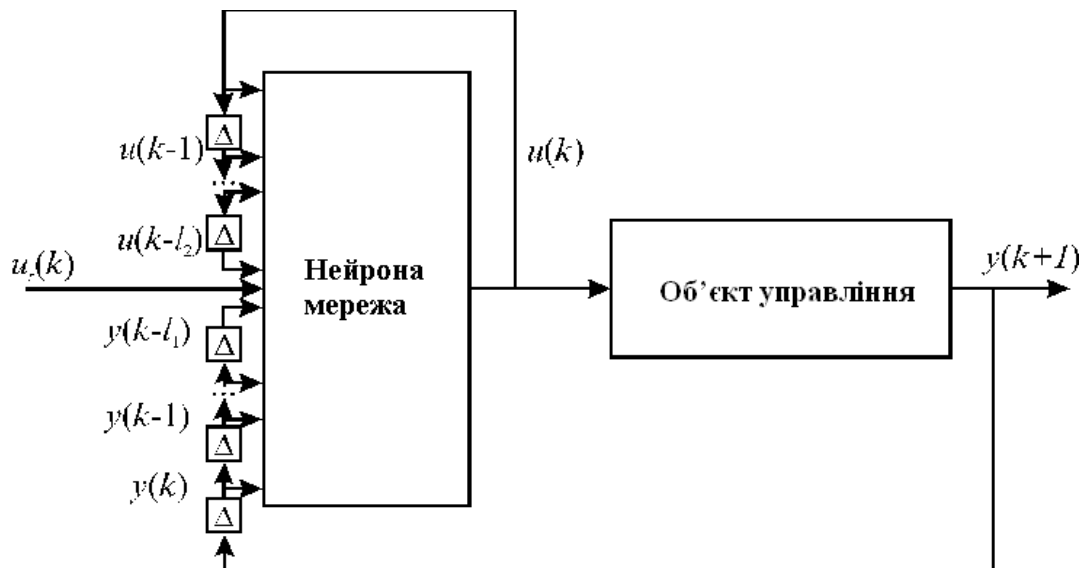


Рисунок 3.23 Система керування з нейроконтролером

В цьому другому випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.24.

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

$$u(t) \Rightarrow I[y(t)] \rightarrow \text{ext}.$$

Якщо розглядати другий варіант нейромержевого алгоритму керування то нейрорегулятор можливо спочатку налаштувати також за методом зворотного поширення. В цьому випадку треба визначити кількість визначених похибок регулювання для тренування нейронної мережі. На рисунку 3.26 також зображені похибки на кожному нейроні для коректування ваг за методом зворотного поширення. Якщо така структура буде недостатня, то необхідно буде збільшити кількість нейронів в вхідному шарі мережі та збільшити кількість шарів до трьох.

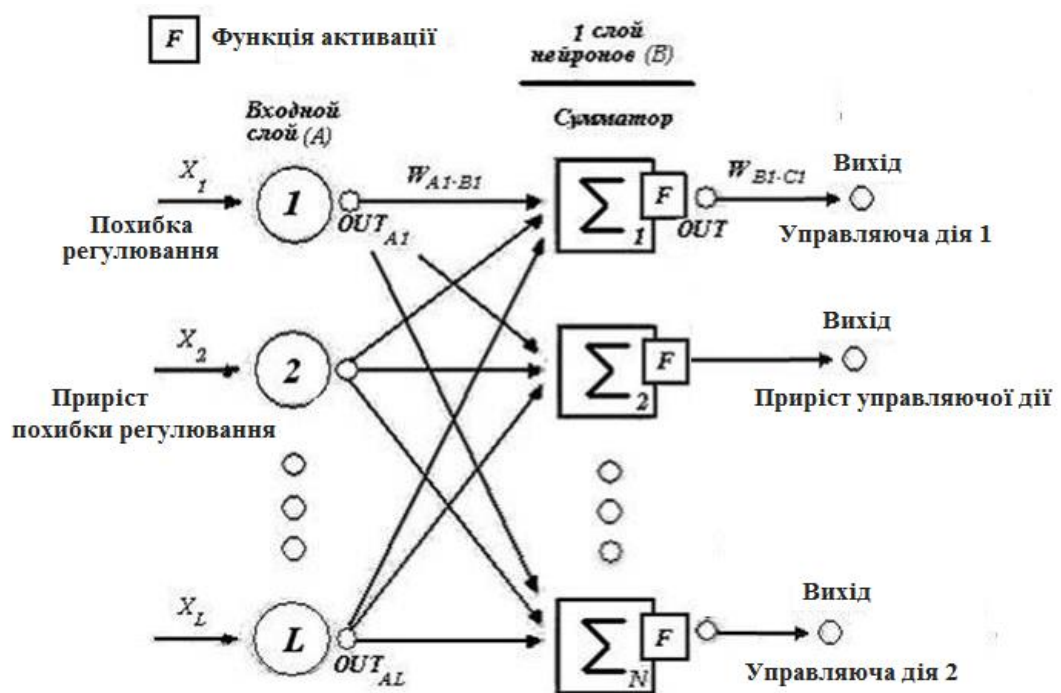


Рис. 3.24 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму керування

Такий функціонал відповідає за поточний стан системи як показано на рисунку 3.25.

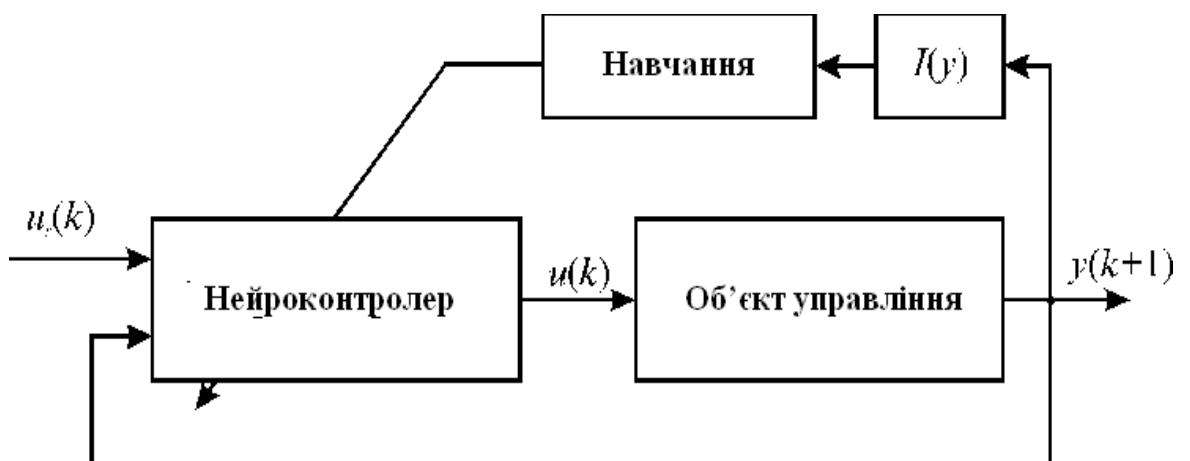


Рисунок 3. 25 Нейромережева система керування з екстремальним показником якості регулювання

Для визначення ваг між нейронними з'єднаннями за методом зворотного поширення було використано програмне середовище MATLAB,

що дозволяє згенерувати задану нейрону мережу на базі вхідних і вихідних значень сигналів. Таким чином, для тренування нейронної мережі необхідно вказати вхідні і вихідні значення сигналів нейрорегулятора, а точніше, значення похибок регулювання та приріст управляючого впливу.

Штучна нейрона мережа, що виконує роль регулятора, синтезується на базі характеристик нечіткого логічного регулятора. Ці характеристики представляються у табличній формі у вигляді вхідних і вихідних значень нечіткого регулятора (таблиця 3.3). Дані, представлені у таблиці 3.3, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

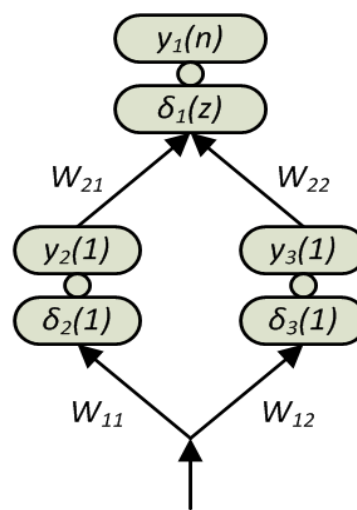


Рисунок 3.26 Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

Далі створюємо М-файл в середовищі Matlab і в цьому файлі прописуємо команди для створення і навчання нашого нейрорегулятора. Вхідні і вихідні значення нейрорегулятора були отримані на основі характеристик нечіткого логічного регулятора, отриманих на основі схеми моделювання, представленій на рисунку 3.27.

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.28 і 3.29 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у командній строчці Matlab – command window, в результаті чого згенерується

відповідна нейронна мережа.

Таблиця 3.3 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	l	u	Δu
1	-100	-331	-0.175
2	-50	-165	-0.08
3	-15	-50	-0.025
4	-1	-3,3	-0.0016
4	0	0	0
5	1	3,3	0.0016
6	15	50	0.025
7	50	165	0.081
8	100	330	0.175

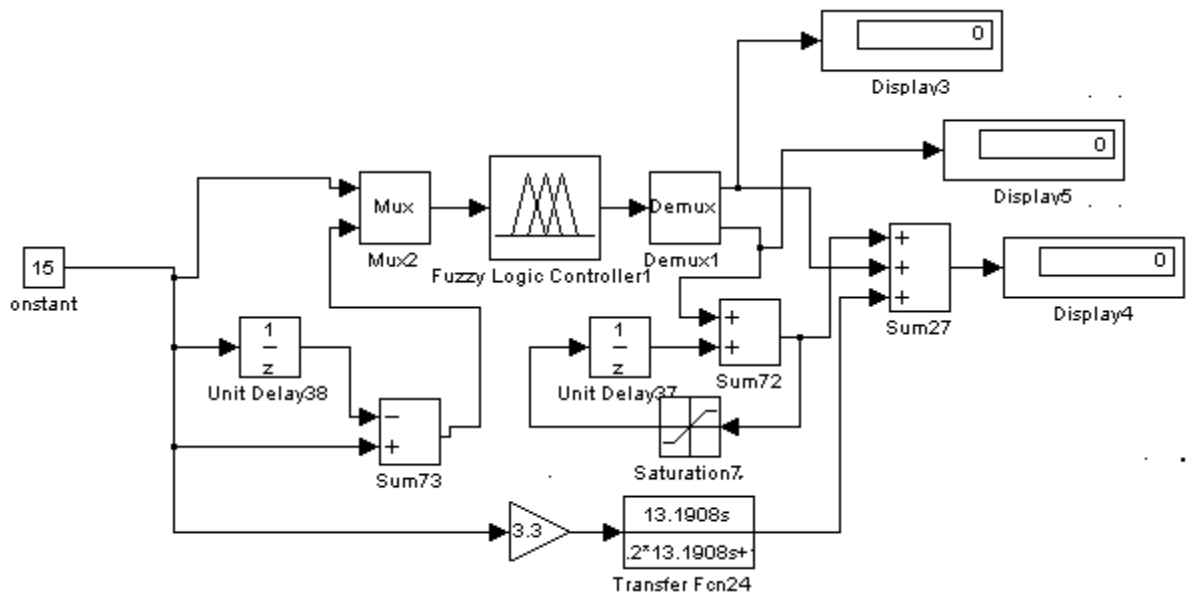


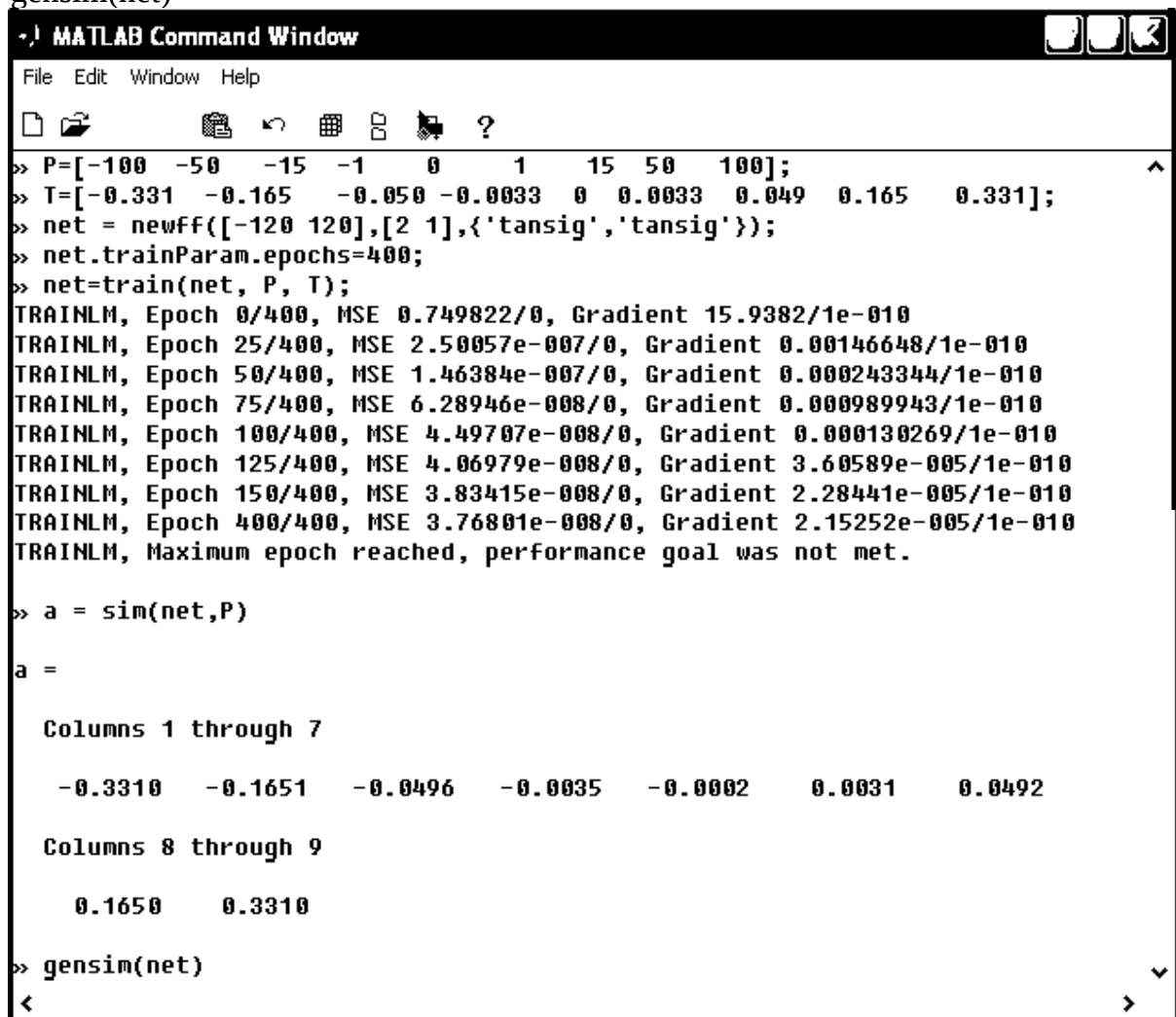
Рисунок. 3.27 – Схема моделювання для отримання даних для навчання нейронної мережі

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

```

» P=[-100 -50 -15 -1 0 1 15 50 100];
» T=[-0.331 -0.165 -0.050 -0.0033 0 0.0033 0.049 0.165 0.331];
» net = newff([-120 120],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=400;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/400, MSE 0.81978/0, Gradient 22.1029/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/400, MSE 8.46404e-005/0, Gradient 0.179295/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/400, MSE 1.32946e-005/0, Gradient 0.00862978/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/400, MSE 6.68207e-006/0, Gradient 0.00918808/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/400, MSE 5.21143e-006/0, Gradient 0.046909/1e-010
TRAINLM, Epoch 400/400, MSE 4.17423e-008/0, Gradient 0.000466748/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
-0.3310 -0.1651 -0.0495 -0.0035 -0.0002 0.0031 0.0492
Columns 8 through 9
0.1650 0.3310
» gensim(net)

```



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

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
» P=[-100 -50 -15 -1 0 1 15 50 100];
» T=[-0.331 -0.165 -0.050 -0.0033 0 0.0033 0.049 0.165 0.331];
» net = newff([-120 120],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=400;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/400, MSE 0.749822/0, Gradient 15.9382/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/400, MSE 2.50057e-007/0, Gradient 0.00146648/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/400, MSE 1.46384e-007/0, Gradient 0.000243344/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/400, MSE 6.28946e-008/0, Gradient 0.000989943/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/400, MSE 4.49707e-008/0, Gradient 0.000130269/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/400, MSE 4.06979e-008/0, Gradient 3.60589e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/400, MSE 3.83415e-008/0, Gradient 2.28441e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 400/400, MSE 3.76801e-008/0, Gradient 2.15252e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
-0.3310 -0.1651 -0.0496 -0.0035 -0.0002 0.0031 0.0492
Columns 8 through 9
0.1650 0.3310
» gensim(net)

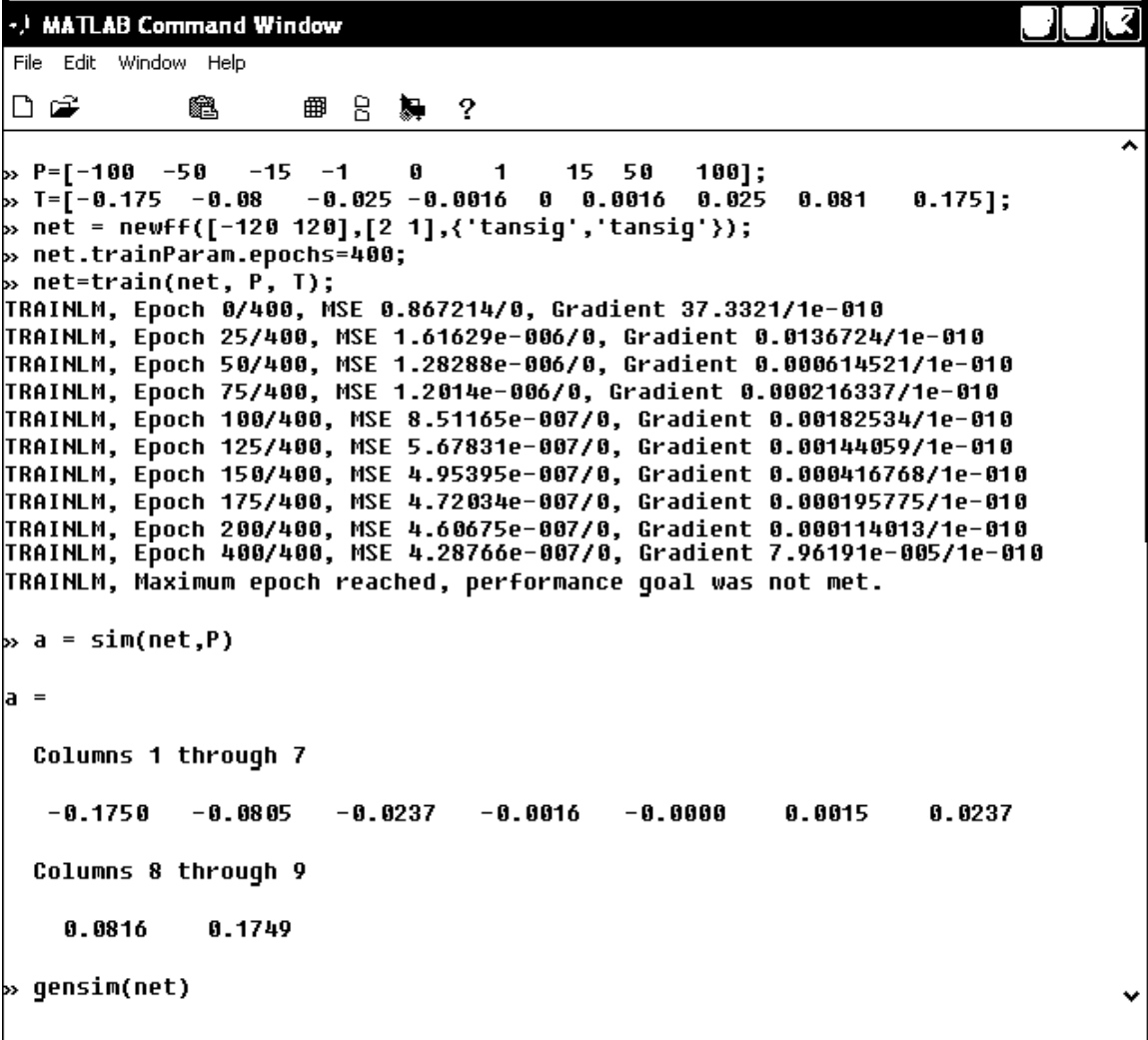
```

Рисунок 3.28 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

» P=[-100 -50 -15 -1 0 1 15 50 100];
» T=[-0.175 -0.08 -0.025 -0.0016 0 0.0016 0.025 0.081 0.175];
» net = newff([-120 120],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=400;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/400, MSE 0.867214/0, Gradient 37.3321/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/400, MSE 1.61629e-006/0, Gradient 0.0136724/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/400, MSE 1.28288e-006/0, Gradient 0.000614521/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/400, MSE 1.2014e-006/0, Gradient 0.000216337/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/400, MSE 4.95395e-007/0, Gradient 0.000416768/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
-0.1750 -0.0805 -0.0237 -0.0016 -0.0000 0.0015 0.0237
Columns 8 through 9
0.0816 0.1749
» gensim(net)
»

```



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

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
[Icons]
» P=[-100 -50 -15 -1 0 1 15 50 100];
» T=[-0.175 -0.08 -0.025 -0.0016 0 0.0016 0.025 0.081 0.175];
» net = newff([-120 120],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=400;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/400, MSE 0.867214/0, Gradient 37.3321/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/400, MSE 1.61629e-006/0, Gradient 0.0136724/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/400, MSE 1.28288e-006/0, Gradient 0.000614521/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/400, MSE 1.2014e-006/0, Gradient 0.000216337/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/400, MSE 8.51165e-007/0, Gradient 0.00182534/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/400, MSE 5.67831e-007/0, Gradient 0.00144059/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/400, MSE 4.95395e-007/0, Gradient 0.000416768/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/400, MSE 4.72034e-007/0, Gradient 0.000195775/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/400, MSE 4.60675e-007/0, Gradient 0.000114013/1e-010
TRAINLM, Epoch 400/400, MSE 4.28766e-007/0, Gradient 7.96191e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
-0.1750 -0.0805 -0.0237 -0.0016 -0.0000 0.0015 0.0237
Columns 8 through 9
0.0816 0.1749
» gensim(net)

```

Рисунок 3.29 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.45, з яких можливо побачити, що десь на 100-м кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями було закінчено.

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

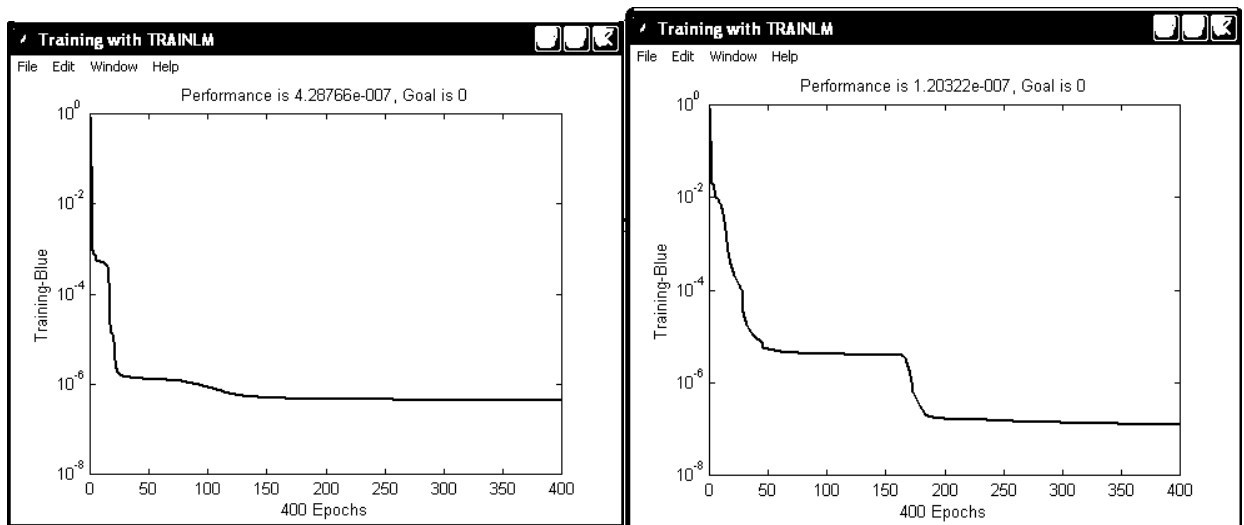


Рисунок 3.30 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених в програмах на рисунках 3.28 і 3.29, розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для i -тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі.

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

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

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

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

Похибка для i -того нейрону прихованого шару розраховується за

наступною формулою (2).:

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

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

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

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 2.23:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0492 - 0.050) * (0.0492) * (1 - 0.0492) = 0.000000085 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i-тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) * 0.000000085 = \\ &= -0.0000000143 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) * 0.000000085 = \\ &= 0.0000000351 \end{aligned}$$

Розрахунок помилок для I – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0237 - 0.025) * (0.0237) * (1 - 0.0237) = 0.033300085 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i-тих нейронів прихованого шару:

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

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

Сформовані нейроні мережі були визначені у схемі моделювання замість нечіткого регулятора, як показано на рисунку 3.14. У такий спосіб була синтезована модель САУ з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.31.

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.32, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.31.

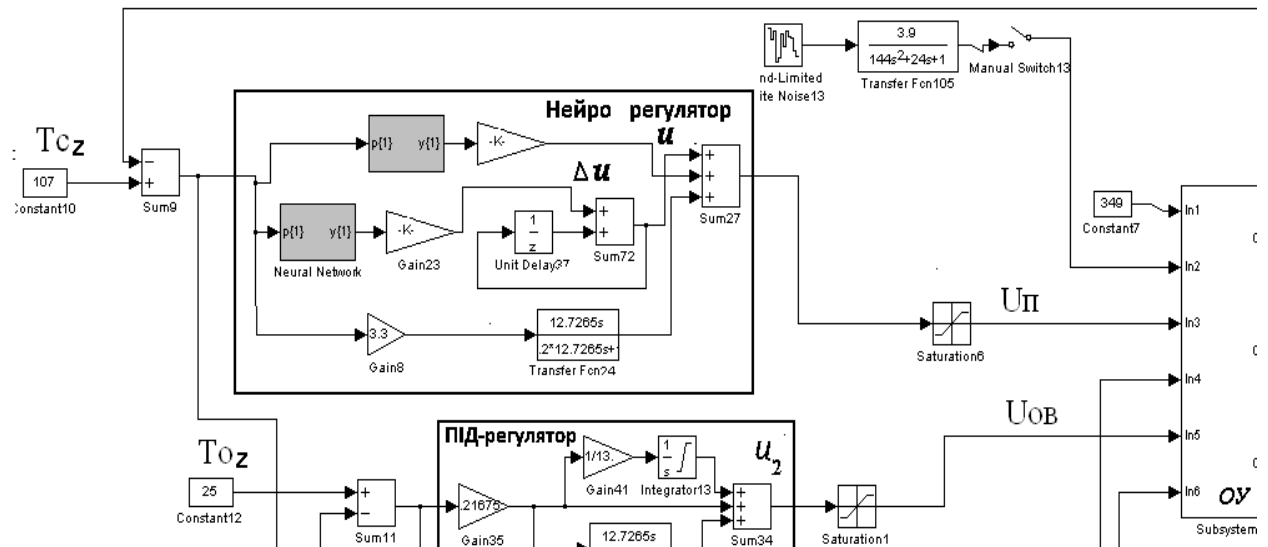


Рисунок 3.31 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

У результаті моделювання САУ з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САУ з нечітким регулятором та традиційним ПІД-регулятором. Ці графіки представлені на рисунку 3.50. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором працює незначно гірше, ніж САУ з нечітким регулятором.

Час регулювання при східчастому впливі, що збурює складає 250 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПІД регулятором, і 220 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому збуренні значно більше в САУ з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.33. Незважаючи на це регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має 8-м ваг між нейронних з'єднань, а саме параметри які можна оптимізувати для покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.32, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

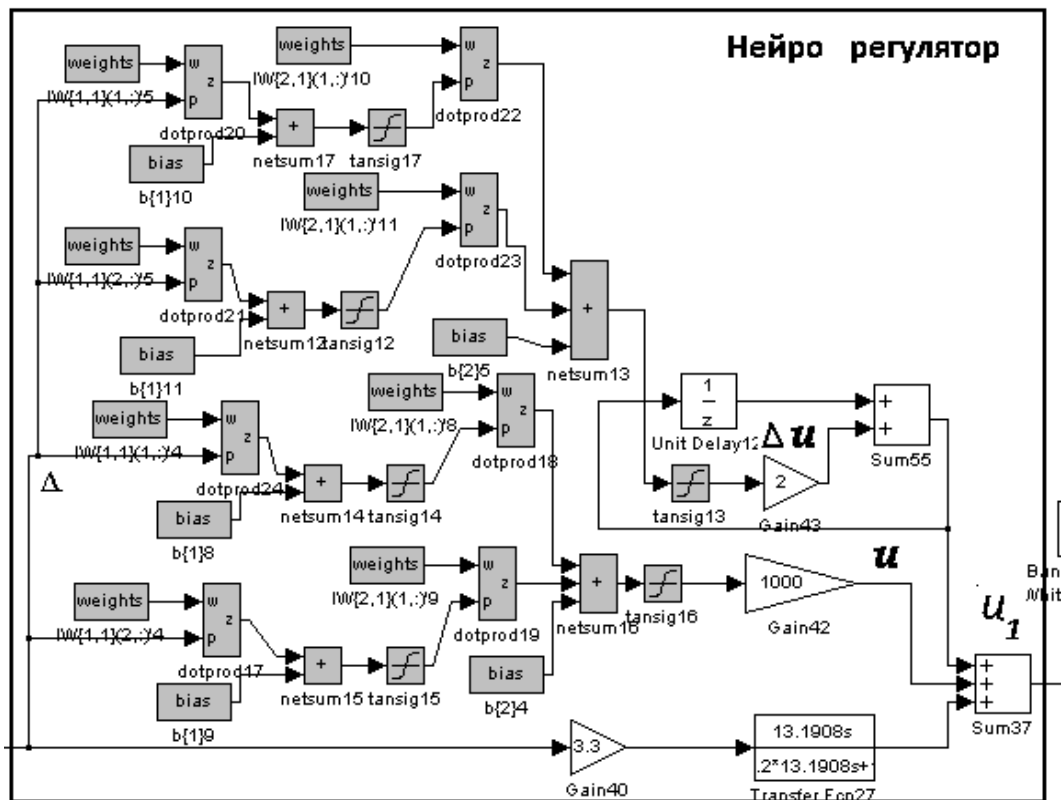


Рисунок 3.32 – Схема моделювання нейронного регулятора

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

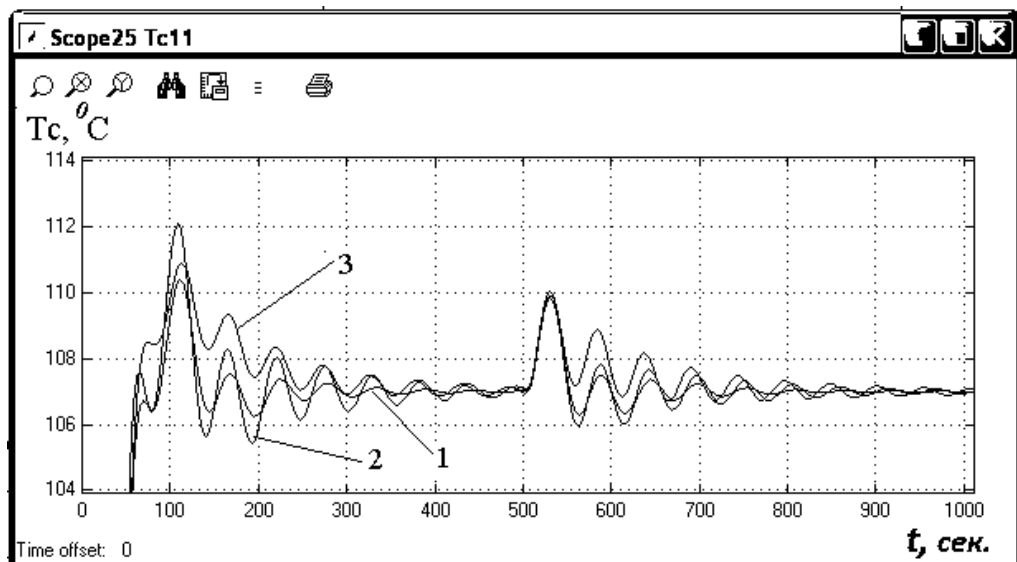


Рисунок 3.33. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором; ; графік 3 – перехідний процес у САУ з нейро регулятором;

Аналогічним чином був синтезований нейрорегулятор температури охолодження соку T_o . На основі характеристик нечіткого регулятора структурна схема яка представлена на рисунку 3.34. були сформовані данні для тренування штучної нейтронної мережі. Дані для тренування штучної нейтронної мережі, що представляє нейрорегулятор, були представлені в таблиці 3.4 Згідно з цими даними була сформована програма для генерації штучної нейтронної мережі в середовище MATLAB/Simulink і за цією програмою була згенерована нейрона мережа в моделі Simulink.

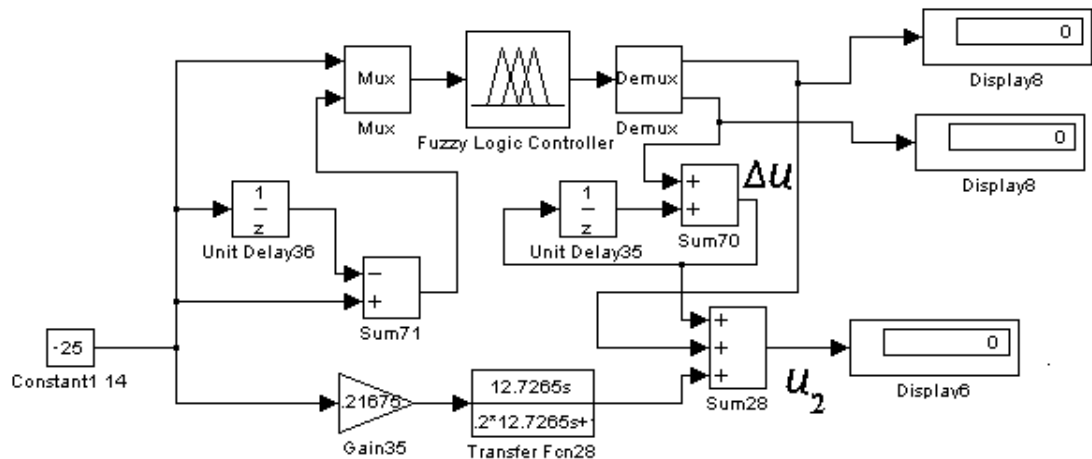


Рисунок. 3.34 – Схема моделювання для отримання даних для навчання нейронної мережі

Таблиця 3.4 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	l	u	Δu
1	-25	130	0.98
2	-5	25	0.197
3	-1	5	0.0394
4	0	0	0
5	1	-5	-0.0394
6	5	-25	-0.197
7	25	-130	-0.98

Зміна показника точності навчання представлено на рисунку 3.36. Згідно з рисунком 3.36 можливо зробити висновок що тренування штучної нейтронної мережі була закінчена ще на 50 кроці і подальше тренування штучної нейтронної мережі вже непотрібне.

```

» P=[-25 -5 -1 0 1 5 25];
» T=[0.130 0.025 0.005 0 -0.005 -0.025 -0.130];
» net = newff([-40 40],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.647626/0, Gradient 6.68637/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 3.15201e-007/0, Gradient 0.00024425/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 5.62747e-011/0, Gradient 4.51903e-007/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
    0.1300    0.0250    0.0050    0.0000   -0.0050   -0.0250   -0.1300
» gensim(net)

```

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
» P=[-25 -5 -1 0 1 5 25];
» T=[0.130 0.025 0.005 0 -0.005 -0.025 -0.130];
» net = newff([-40 40],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.647626/0, Gradient 6.68637/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 3.15201e-007/0, Gradient 0.00024425/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 5.62747e-011/0, Gradient 4.51903e-007/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
    0.1300    0.0250    0.0050    0.0000   -0.0050   -0.0250   -0.1300
» gensim(net)

```

Рисунок 3.35 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора температури охолодження соку To

```

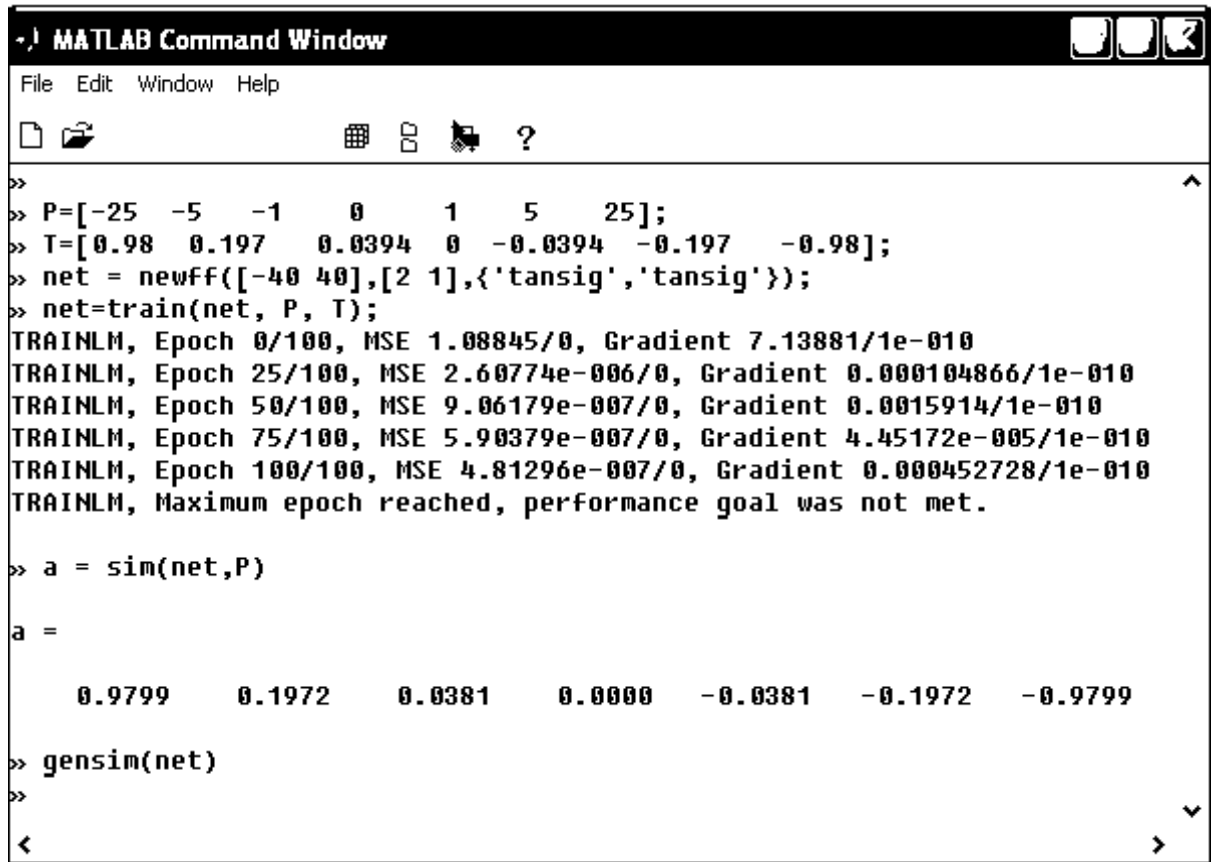
» P=[-25 -5 -1 0 1 5 25];
» T=[0.98 0.197 0.0394 0 -0.0394 -0.197 -0.98];
» net = newff([-40 40],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 1.08845/0, Gradient 7.13881/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 2.60774e-006/0, Gradient 0.000104866/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 9.06179e-007/0, Gradient 0.0015914/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 5.90379e-007/0, Gradient 4.45172e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 4.81296e-007/0, Gradient 0.000452728/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =

```

```

0.9799 0.1972 0.0381 0.0000 -0.0381 -0.1972 -0.9799
» gensim(net)
»

```



```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
[Icons]

»
» P=[-25 -5 -1 0 1 5 25];
» T=[0.98 0.197 0.0394 0 -0.0394 -0.197 -0.98];
» net = newff([-40 40],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 1.08845/0, Gradient 7.13881/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 2.60774e-006/0, Gradient 0.000104866/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 9.06179e-007/0, Gradient 0.0015914/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 5.90379e-007/0, Gradient 4.45172e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 4.81296e-007/0, Gradient 0.000452728/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a = sim(net,P)

a =

    0.9799    0.1972    0.0381    0.0000   -0.0381   -0.1972   -0.9799

» gensim(net)
»

```

Рисунок 3.35 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює складову нейрорегулятора температури охолодження соку To

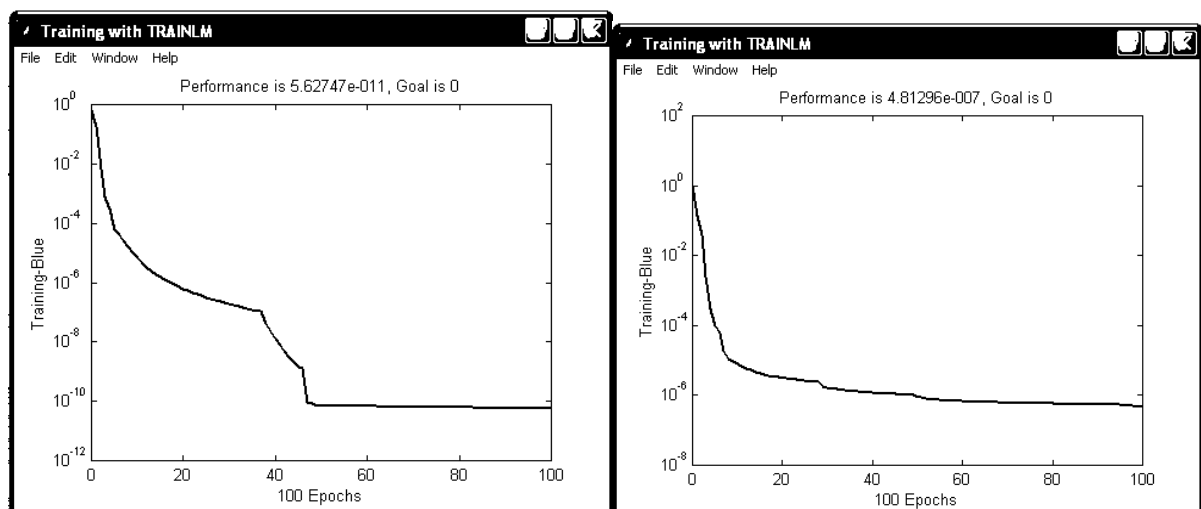


Рисунок 3.36 – Характеристика точності навчання складової нейрорегулятора

3.7 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегуляторами

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

Таким чином, інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний відповідно таким же, як при оптимізації САУ з традиційним ПД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була спочатку визначена модель САУ з нейрорегулятором за температурою стерилізації T_c і параметричним оптимізатором, структурна схема яка відображена на рисунку 3.37. Таким чином, оптимізація проводилась послідовно спочатку оптимізувався нейрорегулятор температури стерелізації T_c при наявності ПД-регулятора температури охолодження соку, а потім оптимізувався нейрорегулятор температури охолодження соку T_o при наявності ПД регулятора температури стерилізації T_c . Відповідно була ще розроблена модель САУ з нейрорегулятором температури охолодження соку і параметричним оптимізатором, структурна схема яка представлена на рисунку 3.38.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі що представлена в таблиці 3.5. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленому рисунку 3.40. На рисунку 3.41 представлений результат оптимізації, який був отриманий при оптимізації нейрорегулятора за температурою охолодження соку T_o після попередньої оптимізації нейрорегулятора температури стерилізації P_c .

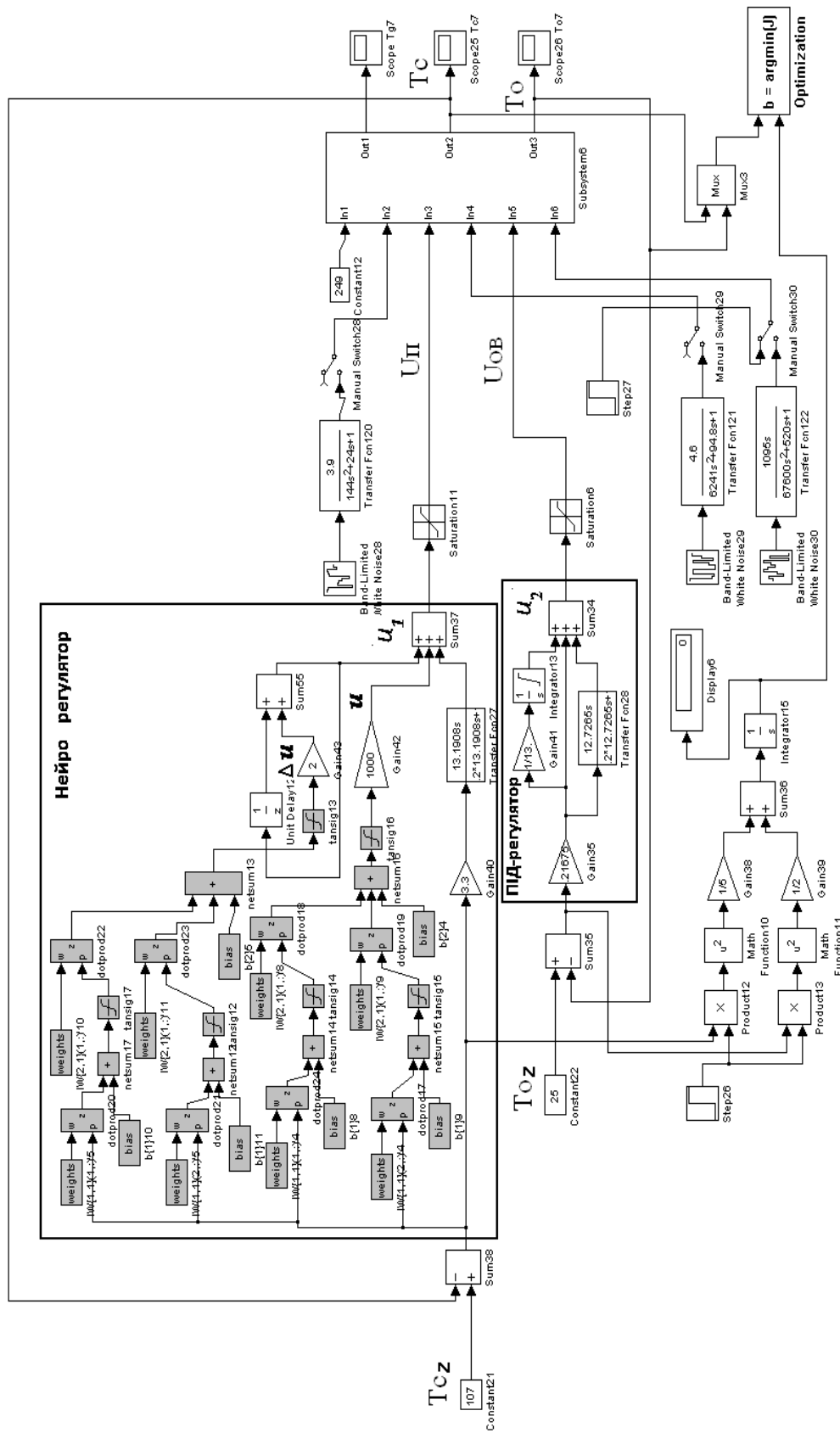


Рисунок 3.37 –Структурна схема моделі САУ з нейро регулятором за T_c і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink

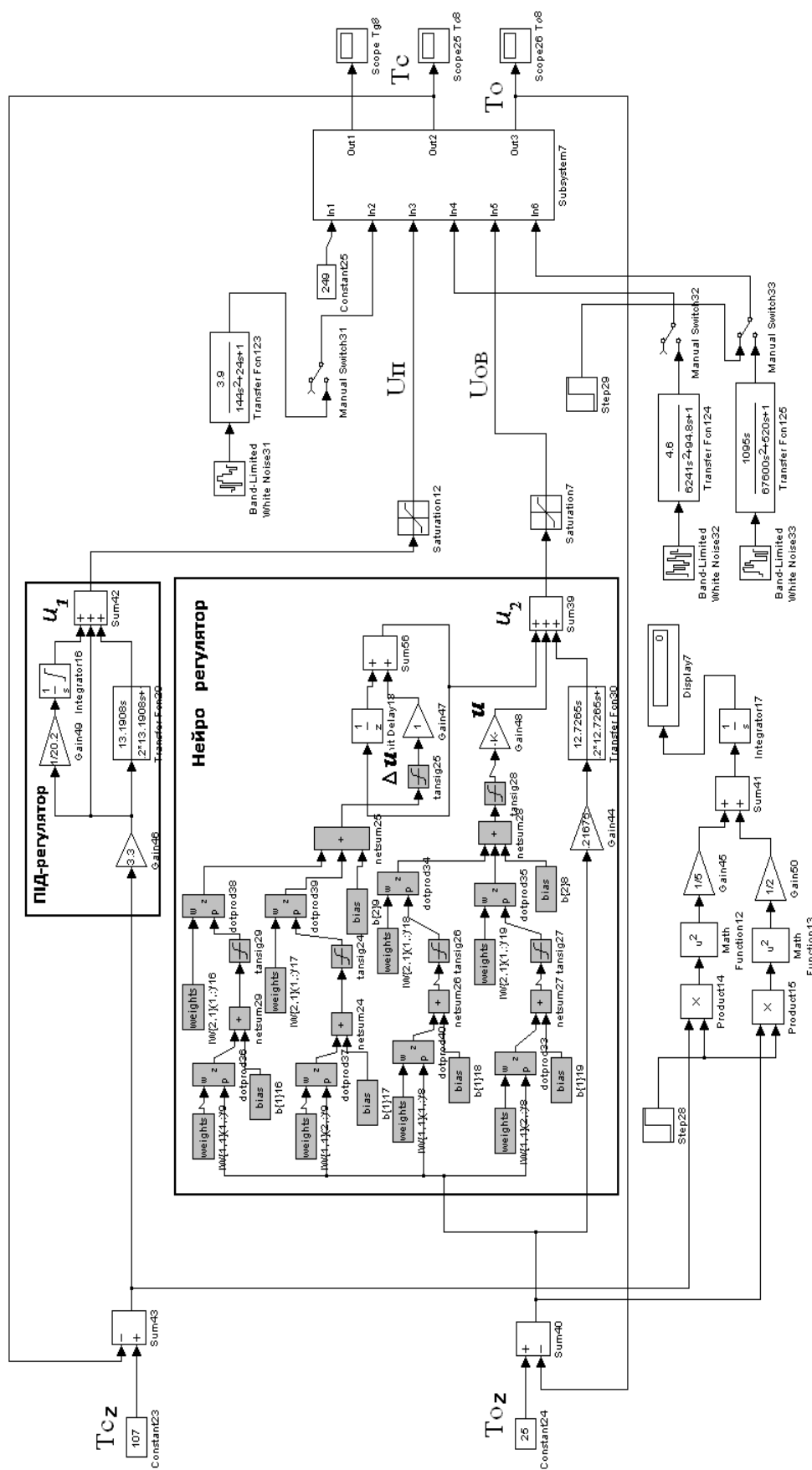


Рисунок 3.38 –Структурна схема моделі САУ з нейро регулятором за температурою охолодження соку T_o і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink

Оптимізація

Конкретизація задачі оптимального параметричного синтезу (ОПС)

☐ ОПС в условиях параметрической неопределенности ОУ.
☒ ОПС при фиксированных параметрах ОУ.

Параметри об'єкта управління (ОУ)

Ім'я параметрів: ko tau T T1
Номинальные значения: 3.4 2.5 12 10
Нижние значения диапазонов:
Верхние значения диапазонов:

Параметри що оптимізуються (аргументи)

Ім'я параметрів: k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 k
Начальні приближення: -0.058015 0.05911 -0.01
Нижні границі: -100 -100 -100 -100 -100
Верхние ограничения: 100 100 100 100 100

Умови оптимізації (Симплекс метод Нелдера-Мида)

Максимальна кількість кроків процедур оптимізації: 200
Минимальное приращение аргументов: 0.01
Минимально значимое приращение критерия: 0.001

Візуалізація результатів

Кількість графіків: 2
Имена переменных отображаемых на графиках: y, x

Старт Отмена

Рисунок 3.39 – Вікно для визначення початкових значень параметрів оптимізації регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного керування

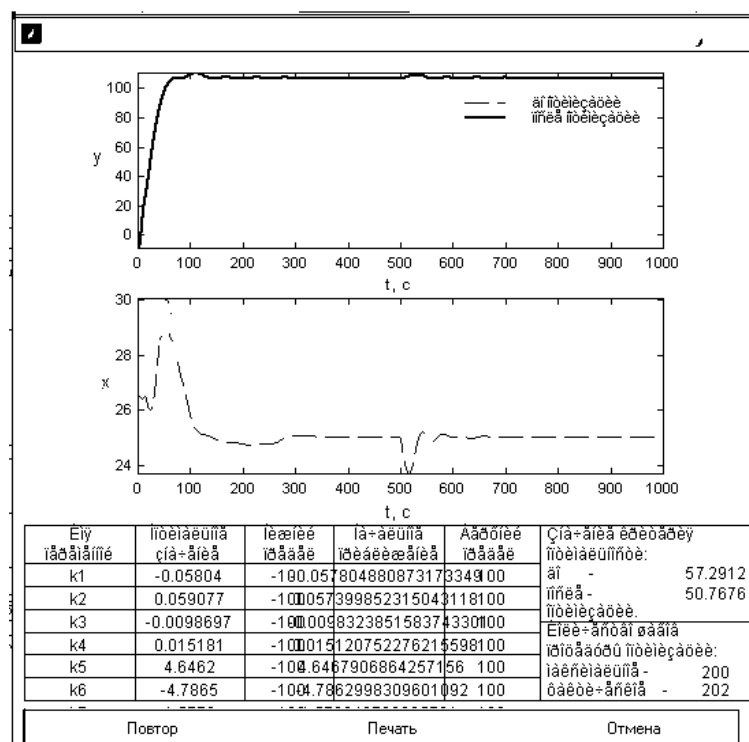


Рисунок 3.40 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного

керування

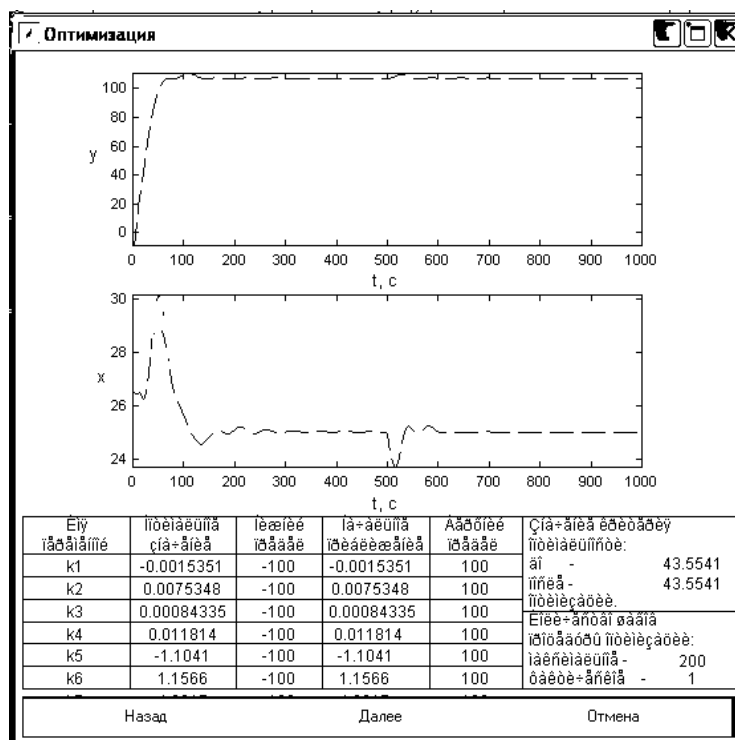


Рисунок 3.41 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного керування

Згідно з рисунків 3.5 та 3.41 можна побачити що вдалося значно покращити якість регулювання порівнявши значення інтегральних критеріїв якості роботи системи. Значення інтегрального показника при САР з ПД регулятором 57 а при САР з нейрорегулятором 43.

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.

Зведені в таблицю 3.5 та інші оптимальні значення параметрів нейрорегуляторів були визначені в моделі САУ для подальшого дослідження якості регулювання при збурюючих впливах випадкового характеру. Для визначення принципової придатності оптимізованих нейрорегуляторів необхідно визначити, чи не втрачає стійкість САУ при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених, на етапі розробки моделі

у діапазоні $\pm 20\%$.

Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САУ (рисунок 3.42). Параметри перевірки системи на грубість не відрізняються від попереднього випадку коли була виконана перевірка на грубість системи з ПД-регулятором.

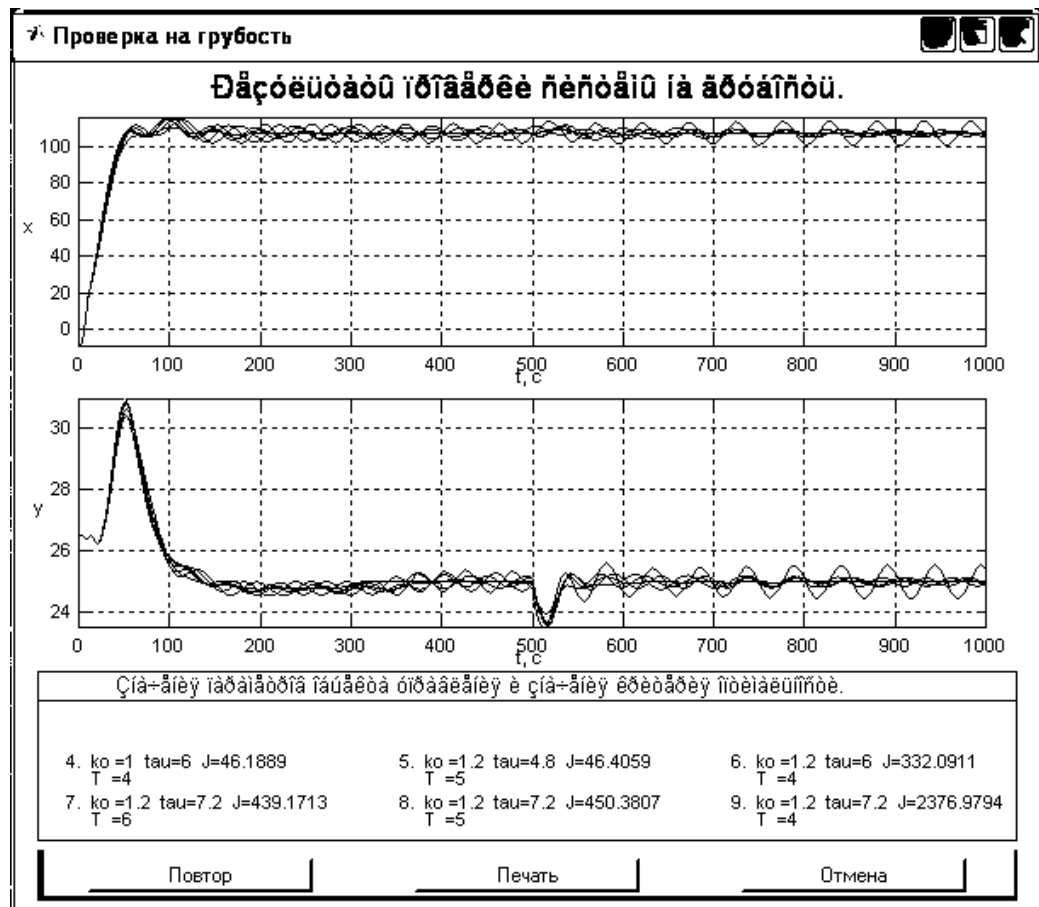


Рис. 3.42 – Вікно результатів перевірки на грубість САУ з нейрорегулятором температури стерилізації P_C

Згідно з результатом перевірки яка представлена на рисунку 3.42 можна зробити висновок що САУ з нейрорегулятором значно груба це дає можливість зробити висновок про принципову придатність нейрорегулятора до застосування.

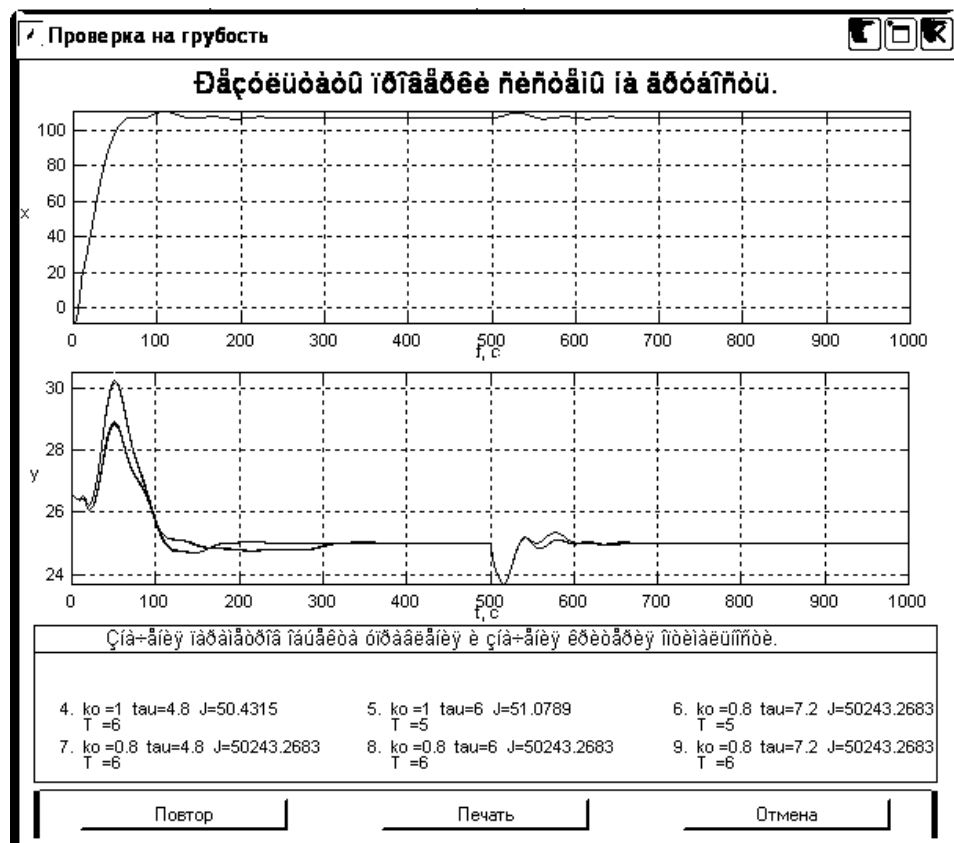


Рис. 3.42 – Вікно результатів перевірки на грубість САУ з нейрорегулятором температури охолодження соку T_o

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

На заключному етапі розробки САУ був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САУ за виходом системи на номінальний режим функціонування та при східчастому впливі що збурює на 500 сек функціонування. З графіків перехідних процесів що представлені на рисунку 3.43 можливо побачити, що час регулювання при САУ з нейронним регулятором та ПІД регулятором одноковий але максимальне динамічне відхилення в САУ з нейрорегулятором трохи менше. Найгірша якість регулювання була в системі з нечітким регулятором порівняно з іншими системами, тому що при синтезі нечіткого регулятора враховувались експертні данні та при налаштуванні системи

використовувався метод проб та похибок якій має відповідні недоліки.

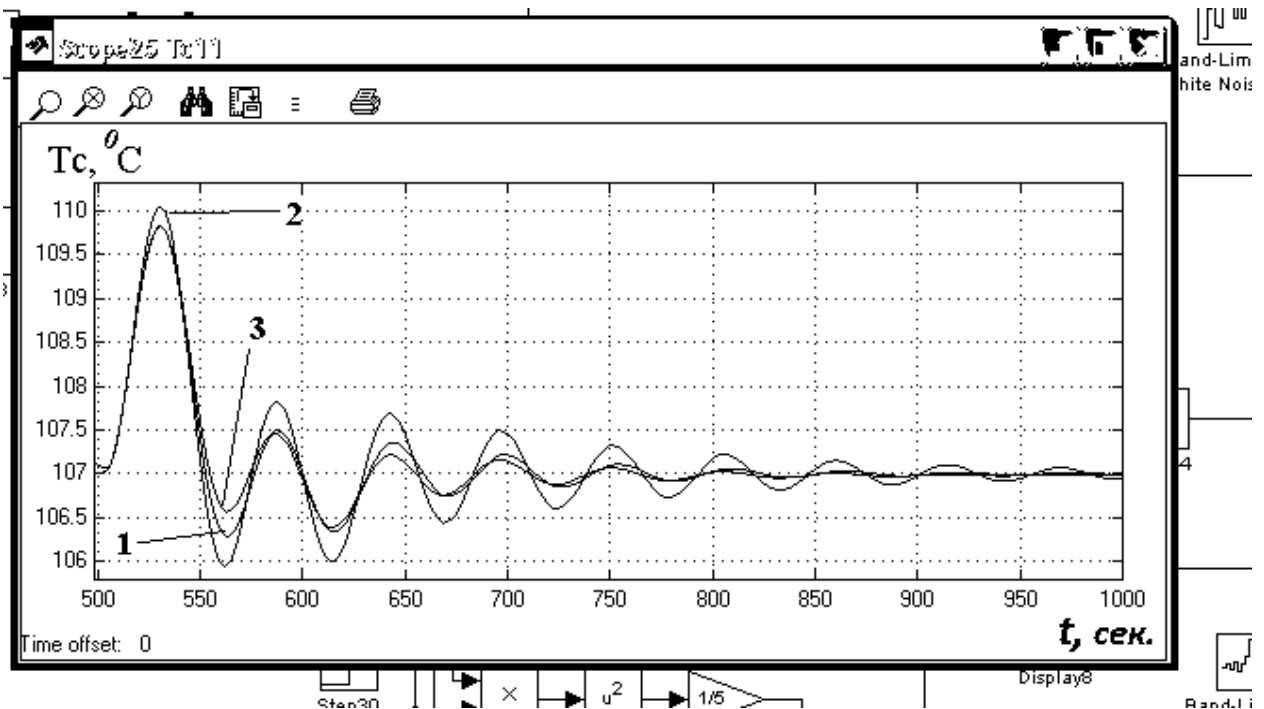


Рисунок 3.43. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 –перехідний процес у САУ з нечітким регулятором; графік 3 – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних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

Також на основі аналізатора імовірнісних характеристик, що був вбудований у середовище MATLAB/Simulink, була визначена якість регулювання різних САУ при випадкових впливах що збурюють. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень змінних регулювання різних САУ при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.44 та 3.45, де зображені вікна результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень змінних регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.44 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням найкраще функціонує САУ з нейрорегулятором. З рисунку 3.45 видно що САУ з нечітким регулятором за температурою стерилізації T_c функціонує найгірше від інших систем. В кінцевому випадку показники

функціонування різних САУ за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.6 де були визначені показники якості функціонування оптимізованих САУ з ПД-регуляторами та САУ з нейрорегуляторами.

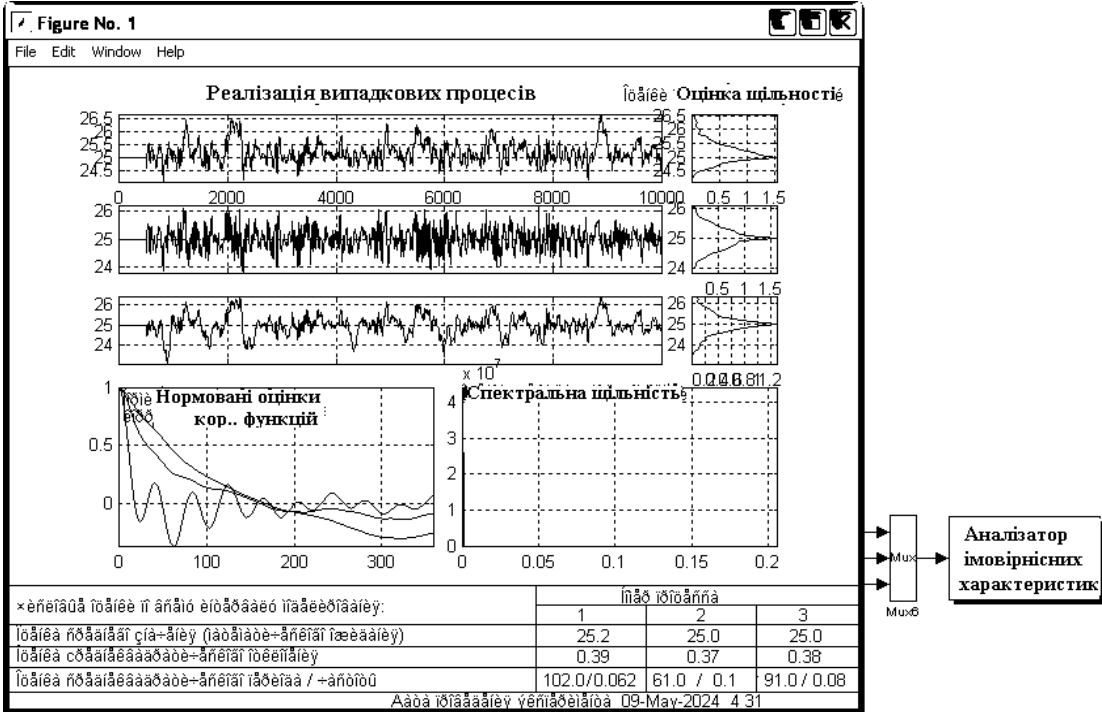


Рисунок 3.45 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик за каналом температури стерилізації соку T_C

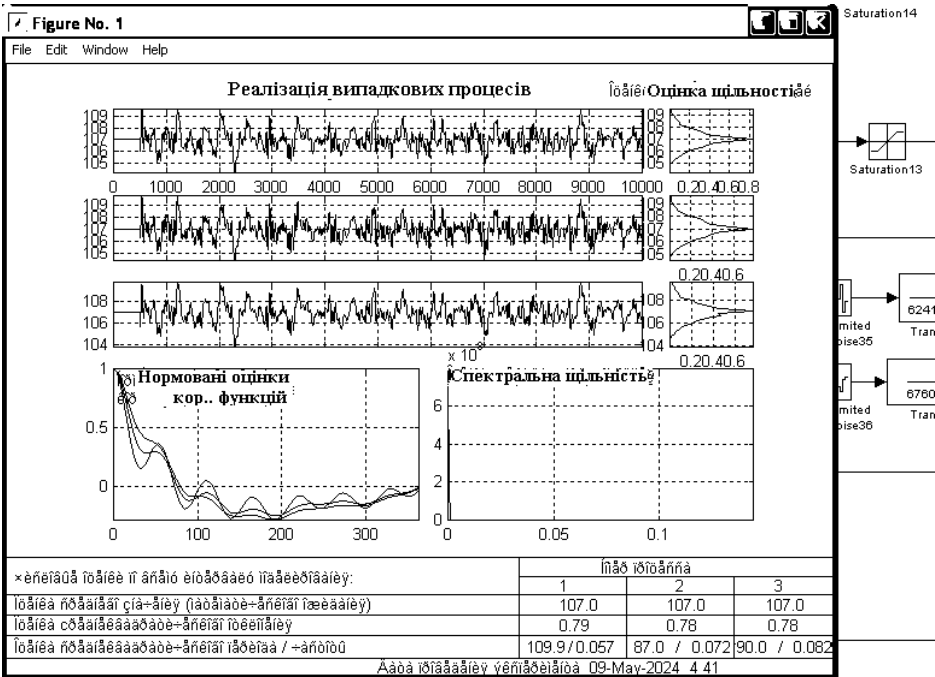


Рисунок 3.45 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик за каналом температури охолодження соку T_O

Таблиця 3.6 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПІД	САУ з нечітким регулятором	САУ з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈300 с	≈320 с	≈300 с
Максимальн е динамічне відхилення	2.7	2.8	2.7
Інтегральни й показник	57	61	43,5
Математичне очікування	107/25	107/25	107/25
Середньоквадра тичне відхилення	0.39	0.37	0.38

З таблиці 3.6 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САУ з нейронним регулятором краще функціонує, ніж інші розглянуті САУ. САУ з традиційним ПІД-регулятором функціонує за якістю регулювання краще ніж САУ з нечітким регулятором при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

3.9 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера

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

Спочатку вибираємо Subsystem Parametrs на блоці регулятора, синтезованого на основі штучної нейронної мережі. У цьому вікні відзначаємо «Treat as atomic unit» і натискаємо кнопку Ок. На функціональному блоці натискаємо

праву клавішу миші і вибираємо PLC Coder / Options. Далі вибираємо, у який тип ПЛК буде згенерований код (Target IDE) і натискаємо клавішу Generate code. Згенерований код для SIMATIC STEP 7 наступний:

```
(*
*
* File: lpcod1.scl
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem
"lpcod1/Subsystem"
*
* Model name           : lod1
* Model version         : 1.2
* Model creator        : R1
* Model last modified by : R1
* Model last modified on : Tue Dec 15 20:08:56 2012
* Model sample time     : 0.1s
* Subsystem name       : lod1/Subsystem
* Subsystem sample time : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 1.3 (R2012a) 29-Dec-2012
* ST code generated on   : Tue Dec 11 21:15:00 2012
*
* Target IDE selection   : Siemens SIMATIC Step 7 5.4
* Test Bench included    : No
*
*)
FUNCTION_BLOCK Subsystem
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    In1: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Out1: REAL;
END_VAR
VAR
    UnitDelay2_DSTATE: REAL;
    rtb_Gain11: REAL;
    rtb_Product: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:

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

1:

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

```
(* Sum: '<S1>/Sum28' incorporates:  
* Constant: '<S12>/one'  
* Constant: '<S12>/one1'  
* Constant: '<S13>/one'  
* Constant: '<S13>/one1'  
* Constant: '<S14>/one'  
* Constant: '<S14>/one1'  
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)''1'  
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:)''1'  
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)''2'  
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)''3'  
* Constant: '<S1>/b{1}2'  
* Constant: '<S1>/b{1}3'  
* Constant: '<S1>/b{2}1'  
* Gain: '<S12>/Gain'  
* Gain: '<S12>/Gain1'  
* Gain: '<S13>/Gain'  
* Gain: '<S13>/Gain1'  
* Gain: '<S14>/Gain'  
* Gain: '<S14>/Gain1'  
* Math: '<S12>/Exp'  
* Math: '<S12>/Reciprocal'  
* Math: '<S13>/Exp'  
* Math: '<S13>/Reciprocal'  
* Math: '<S14>/Exp'  
* Math: '<S14>/Reciprocal'  
* Product: '<S20>/Product'  
* Product: '<S21>/Product'  
* Product: '<S22>/Product'  
* Product: '<S23>/Product'  
* Sum: '<S12>/Sum'  
* Sum: '<S12>/Sum1'  
* Sum: '<S13>/Sum'  
* Sum: '<S13>/Sum1'  
* Sum: '<S14>/Sum'  
* Sum: '<S14>/Sum1'  
* Sum: '<S1>/netsum3'  
* Sum: '<S1>/netsum4'  
* Sum: '<S1>/netsum5'
```

```

* UnitDelay: '<S1>/Unit Delay2'
*
* About '<S12>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S12>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S13>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S13>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S14>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S14>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal *)
rtb_Product := (((1.0 / (EXP((((((1.0 / (EXP((( -0.0004516 * rtb_Gain11) +
0.045783785887807272) * -2.0) + 1.0)) *
2.0) - 1.0) * -7.6794854549188) + (((1.0 / (EXP((( -0.004755 *
rtb_Gain11) + 3.437837831064233) * -2.0) +
1.0)) * 2.0) - 1.0) * -0.63370089657517)) + 0.2870679) * -2.0) + 1.0)) *
2.0) - 1.0) + UnitDelay2_DSTATE;

```

(* Outport: '<Root>/Out1' incorporates:

```

* Constant: '<S10>/one'
* Constant: '<S10>/one1'
* Constant: '<S11>/one'
* Constant: '<S11>/one1'
* Constant: '<S15>/one'
* Constant: '<S15>/one1'
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)"
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:)"
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)"
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)1'
* Constant: '<S1>/b{1}'
* Constant: '<S1>/b{1}1'
* Constant: '<S1>/b{2}'
* Gain: '<S10>/Gain'
* Gain: '<S10>/Gain1'
* Gain: '<S11>/Gain'
* Gain: '<S11>/Gain1'
* Gain: '<S15>/Gain'

```

- * Gain: '<S15>/Gain1'
- * Gain: '<S1>/Gain10'
- * Math: '<S10>/Exp'
- * Math: '<S10>/Reciprocal'
- * Math: '<S11>/Exp'
- * Math: '<S11>/Reciprocal'
- * Math: '<S15>/Exp'
- * Math: '<S15>/Reciprocal'
- * Product: '<S16>/Product'
- * Product: '<S17>/Product'
- * Product: '<S18>/Product'
- * Product: '<S19>/Product'
- * Sum: '<S10>/Sum'
- * Sum: '<S10>/Sum1'
- * Sum: '<S11>/Sum'
- * Sum: '<S11>/Sum1'
- * Sum: '<S15>/Sum'
- * Sum: '<S15>/Sum1'
- * Sum: '<S1>/Sum5'
- * Sum: '<S1>/netsum'
- * Sum: '<S1>/netsum1'
- * Sum: '<S1>/netsum2'
- *
- * About '<S10>/Exp':
- * Operator: exp
- *
- * About '<S10>/Reciprocal':
- * Operator: reciprocal
- *
- * About '<S11>/Exp':
- * Operator: exp
- *
- * About '<S11>/Reciprocal':
- * Operator: reciprocal
- *
- * About '<S15>/Exp':
- * Operator: exp

Програма представлена структурованою мовою керування Structured Text (ST), за синтаксисом близька до [Pascal](#); Structured Text (ST) — мова програмування стандарту [IEC61131-3](#). Призначена для програмування промислових [контролерів](#) і операторських станцій. Основою St-програми є

вираження. Вираження складаються з операндів (констант і змінних) і операторів.

3.10 Висновки за розділом 3

В процесі виконання роботи були розроблені моделі САУ з нечіткими регуляторами та з нейрорегуляторами що визначають нейронмереживу системи керування. Нечіткі регулятори розроблені у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Були визначені функції приналежності до нечітких множин, сформована база правил функціонування регуляторів у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначений алгоритм нечіткого виводу – Сугено 0-порядку. Було встановлено, що за якістю регулювання така САУ функціонує незначно гірше, ніж САУ з традиційним ПІД-регулятором при об'єкті керування з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САУ, за характеристиками нечітких регуляторів було виконано тренування визначених штучних нейронних мереж, яка можуть виконувати роль нейрорегуляторів. Тренування штучних нейронних мереж було виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink за відповідними виконавчими кодами. Були розроблені моделі САУ з регуляторами, що представляється штучними нейронними мережами. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегуляторами були проведена при тих же умовах, що і САУ з традиційними ПІД-регуляторами.

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 43 при САУ з нейрорегулятором і 57 при САУ з традиційним ПІД-регулятором.

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора за температурою стерилізації T_c була сформована програма для промислового контролера. Таким чином, на основі виконаного синтезу і аналізу різних САУ можна зробити заключний висновок, що нейрорегулятор має принципову придатність для практичного використання на базі промислового контролера при об'єктах керування з нелінійними характеристиками за каналами регулювання.

Розділ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1. Опис загальних принципів побудови модернізованої системи керування.

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

САР такими об'єктами включають:

а) системи (контур) автоматичного регулювання (САР) регламентованих змінних $y(t)$, що забезпечують їх стабілізацію на околицях заданих значень (уставок) $y^{зд}(t)$;

б) системи захисту, що запобігають розвитку несприятливих наслідків, обумовлених порушенням регульованої змінної $y(t)$ встановлених регламентом гранично допустимих значень $y^{гп}$ (подія S).

При побудові САУ такими об'єктами є дві альтернативи:

1. Реалізувати звичайну САР, задане значення для якої встановити відповідним найбільш несприятливій ситуації, яка може виникнути під час роботи системи та таким чином запобігти порушенню $y(t)$ $y^{гп+}$.

Недоліки:

- низька ефективність роботи ОУ завжди;
- найнесприятливіша ситуація апіорі невідома, тому гарантувати відсутність події S неможливо навіть з урахуванням прийнятих несприятливих умов.

2. Реалізувати систему гарантуючого керування (СГУ), тобто, таку

САУ, яка поряд із функціями регулювання та захисту, реалізувала б

функцію гарантованого дотримання встановлених обмежень з заданою ймовірністю.

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

Альтернативні варіанти МНР для оцінки поточної ймовірності виникнення події S представлені у формі виразів для розрахунку поточних значень оцінок середньої інтенсивності подій S . Вихідною інформацією цих розрахунків є результати оцінювання ймовірнісних характеристик процесу $y(t)$ і значення $y^{rp\pm}$. Вигляд МНР залежить від прийнятої моделі зміни $y(t)$ і конкретно від виду прийнятої моделі зміни $m_y(t)$. У нашому випадку приймаємо, що $m_y(t)$ є апіорі невідомою функцією часу. Тоді розрахунок заданого допустимого значення $y^{зд\pm}$ вироблений безпосередньо за моделлю порушення регламенту буде здійснюватися за такою формулою:

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

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

вероятности и его производная;

$\hat{m}_y$, $\hat{\sigma}_y$, $\hat{\sigma}_y$, $\hat{A}_y$, $\hat{\omega}_y$ – оценки соответствующих характеристик случайных процессов, вычисляемые на скользящем интервале времени $T_{кст}$;

$\hat{m}_y(t)$, $\hat{m}_y(t)$ – оценки изменяющегося математического ожидания и его первой производной, вычисляемые на скользящем интервале времени $T_m \ll T_{кст}$.

Оценки характеристик случайных процессов, вычисляемые в реальном времени на скользящих интервалах, определяются усреднением на $T_{\text{кст}}$ (или на $T_m \ll T_{\text{кст}}$ для $m(t)$). При усреднении с равномерным взвешиванием реализуются следующие выражения:

$$\begin{aligned} \hat{m}_y &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} y(t) dt, \quad \hat{m}_{\dot{y}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \dot{y}(t) dt, \quad \hat{m}_y(t) = \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} y(t) dt, \quad \hat{m}_{\dot{y}}(t) = \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} \dot{y}(t) dt; \\ \hat{\sigma}_y &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^2 dt, \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}})^2 dt, \\ \hat{\mu}_y^4 &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^4 dt, \quad \hat{\mu}_{\dot{y}}^4 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}})^4 dt. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Структурна схема СГК з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту представлена на рис. 4.1.

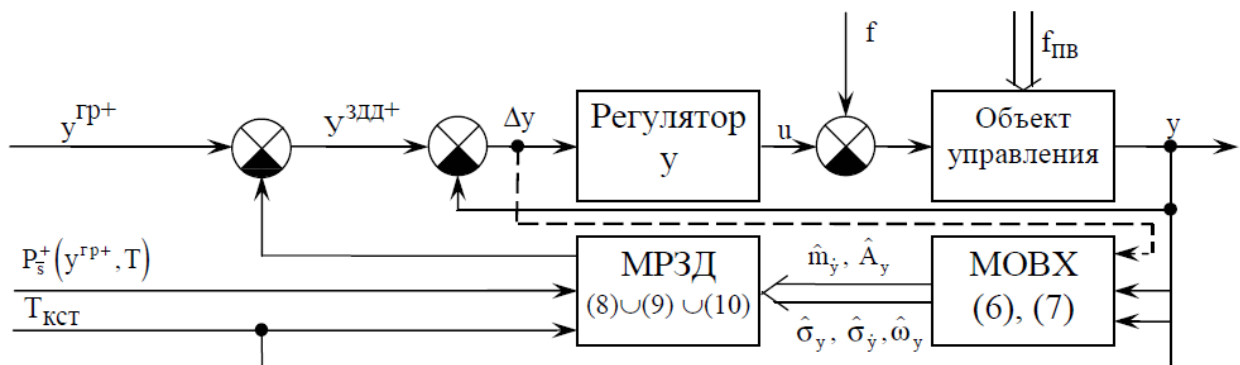


Рис. 4.1 – Структурна схема СГК з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту (МРЗД – модуль розрахунку допустимого заданого значення; МОВХ – модуль оцінки ймовірнісних характеристик).

Сигнал від помилки регулювання та поточний стан змінної надходить на вхід МОВХ, куди також надходить $T_{\text{кст}}$ - мінімальний інтервал часу, де виконуються умови квазістаціонарних $y^0(t)$. У МОВХ йде оцінка складових центрованого випадкового процесу (середньоквадратичне відхилення поточної змінної, середньоквадратичне відхилення її похідної, частота та амплітуда випадкової складової, а також математичне очікування похідної

від поточної змінної). Далі вище зазначені змінні надходять на вхід МРЗД куди також надходить $T_{\text{кст}}$, і $P_s(y^{\text{гр}\pm}, T)$ -імовірність відсутності події S , де формується таке значення, що після відрахування з граничним значенням в $y^{\text{гр}}$ було таке значення $y^{\text{зд}\pm}$, яке разом із контуром регулювання забезпечувало роботу нашої САУ з наперед заданою ймовірністю безаварійності.

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

На основі базової САР розроблена структура модернізованої САК, що передбачає керування температурою стерилізації соку. Структурна схема САК представлена на рис. 4.2.

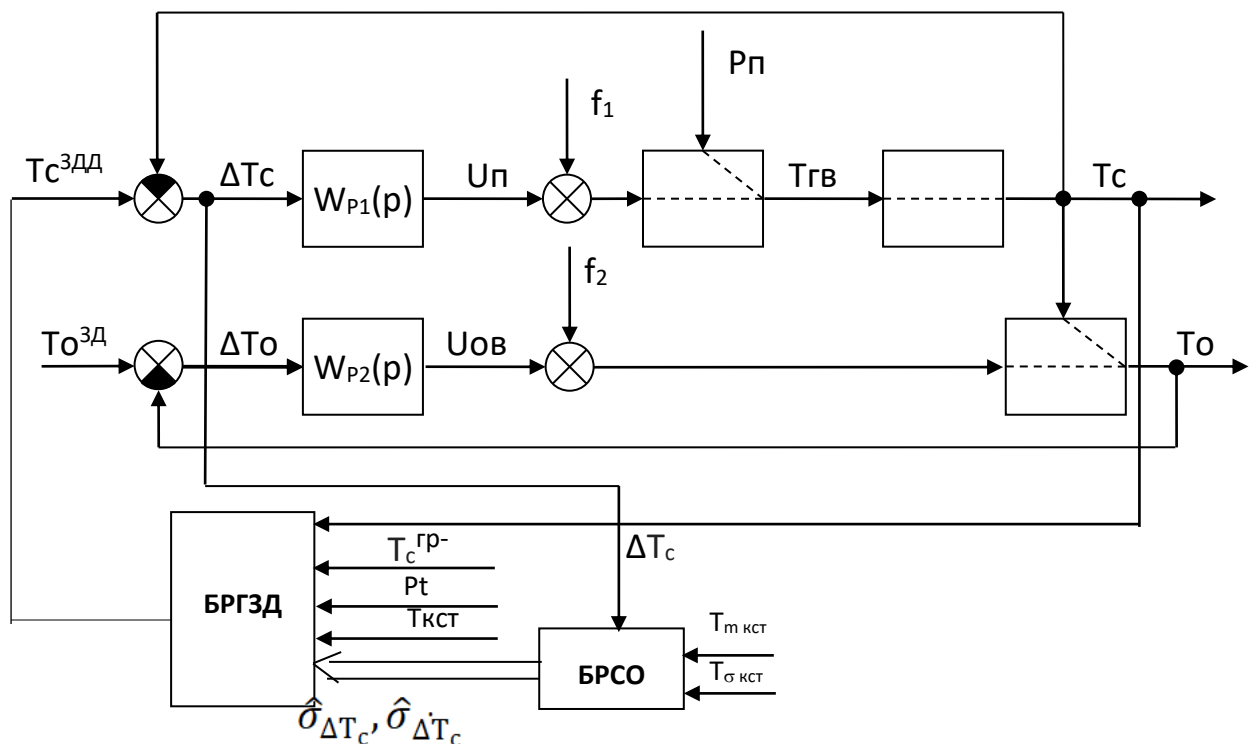


Рис. 4.2 – Структурна схема модернізованої системи керування яка додатково реалізує функцію гарантуючого керування температурою стерилізації соку (БРГЗД – блок розрахунку гарантуючого заданого значення; БРСО – блок розрахунку статистичних оцінок).

Позначення на схемі:

T_c – температура стерилізації соку;

T_o – температура охолодження соку;

$T_{гв}$ – температура гарячої води;

U_p – положення регулюючого органу подачі пари;

$U_{ов}$ – положення регулюючого органу подачі охолоджуючої води;

f_1, f_2 – вектори неконтрольованих збурень;

P_p – контрольоване збурення (тиск пари в паропроводі);

$W_{p1}(p), W_{p2}(p)$ – передаточні функції регуляторів;

$T_c^{зДД}$ – задане допустиме значення температури стерилізації;

$T_o^{зДН}$ – задане значення температури охолодження;

ΔT_c – помилка регулювання температури стерилізації;

ΔT_o – помилка регулювання температури охолодження;

У представленій системі передбачено регулювання стерилізації соку. Система стабілізує температуру стерилізації соку на заданому значенні. Регулятор температури стерилізації соку отримує задане значення від блоку БРГЗД алгоритма гарантуючого керування. Алгоритм гарантуючого керування реалізований двома блоками: БРСО та БРГЗД. У блоці БРСО на ковзних інтервалах часу розраховуються оцінка середньоквадратичного відхилення помилки регулювання температури стерилізації соку та оцінка середньоквадратичного відхилення похідної помилки регулювання температури стерилізації соку відповідно до формул, наведених у пункті 2.1. Ковзаючи інтервали часу задаються як параметри налаштування системи. У блоці БРГЗД безпосередньо з урахуванням моделі порушення регламенту виконується розрахунок гранично допустимого заданого значення температури стерилізації соку (п. 2.1). Розрахунок виконується на основі: граничного значення температури стерилізації соку – $T_c^{гр-}$; заданого значення ймовірності відсутності порушення обмеження – P_t ; заданого значення інтервалу часу, на якому гарантується відсутність порушення обмеження; поточних значень оцінок ймовірнісних характеристик розрахованих у блоці БРСО та поточного значення температури стерилізації соку.

2.3. Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів

керування.

Налаштовуювальні параметри регулятора температури стерилізації соку залишимо отриманими раніше при проведенні оптимального параметричного синтезу САР.

Налаштовуванні параметри системи гарантуючого керування задаватимемо на основі вимог технологічного регламенту та динамічних властивостей помилки регулювання як випадкового процесу. Зокрема, для розрахунку інтервалів зосередження використовуватимемо оцінку середньоквадратичного періоду помилки регулювання.

4.3. Доопрацювання математичної моделі ОР для вирішення задачі синтезу та аналізу системи гарантуючого керування.

Для виконання завдання синтезу та аналізу роботи системи гарантуючого керування доповнимо модель об'єкта керування моделями параметричних збурень (зміна коефіцієнту передачі в каналі регулювання температури стерилізації соку) та моделлю зміни дисперсії координатних збурень.

Повна схема моделювання об'єкта регулювання представлена на рис. 4.3.

Параметричні збурення та зміна дисперсії координатних збурень реалізовуватимемо на основі гармонійного сигналу. Періоди гармонійних сигналів будуть різними.

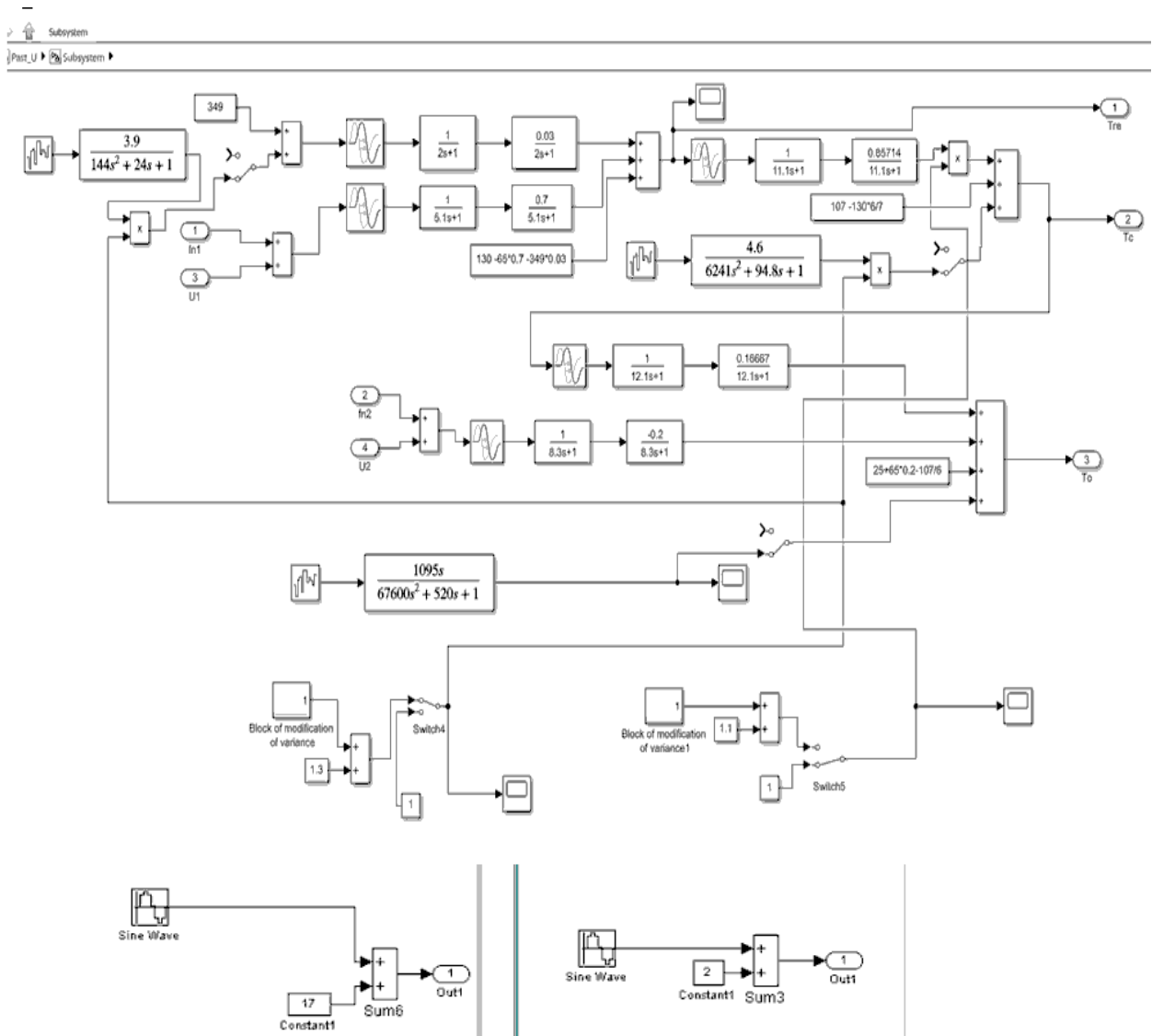


Рис. 4.3 – Схема моделювання об'єкта керування.

4.4. Розробка імітаційної моделі системи гарантуючого керування температури стерилізації соку та дослідження її роботи.

Доповнимо схему моделювання функціональними блоками, що реалізують алгоритми гарантуючого керування і проведемо налаштування їх параметрів. Отримана схема моделювання представлена на рис. 4.4. А схеми внутрішніх структур блоків BRGZD та BRSO представлені на рис. 4.5 та 4.6.

Проведемо дослідження роботи отриманої системи гарантуючого керування порівняно зі стабілізуючою САР в умовах діючих стаціонарних та

нестационарних (змінюється дисперсія) координатних збурень випадкового характеру.

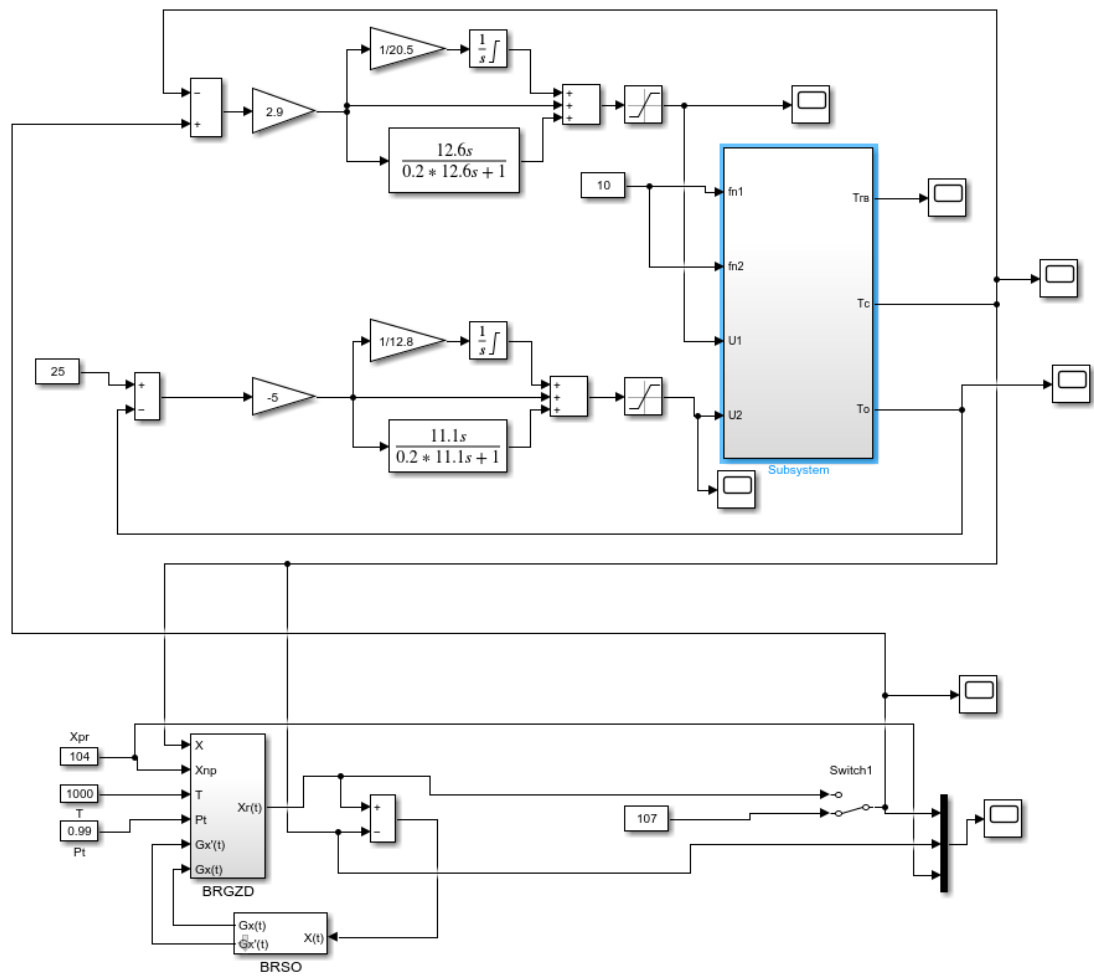


Рис. 4.4 – Схема моделювання САР с алгоритмом гарантуючого керування температурі стерилізації соку.

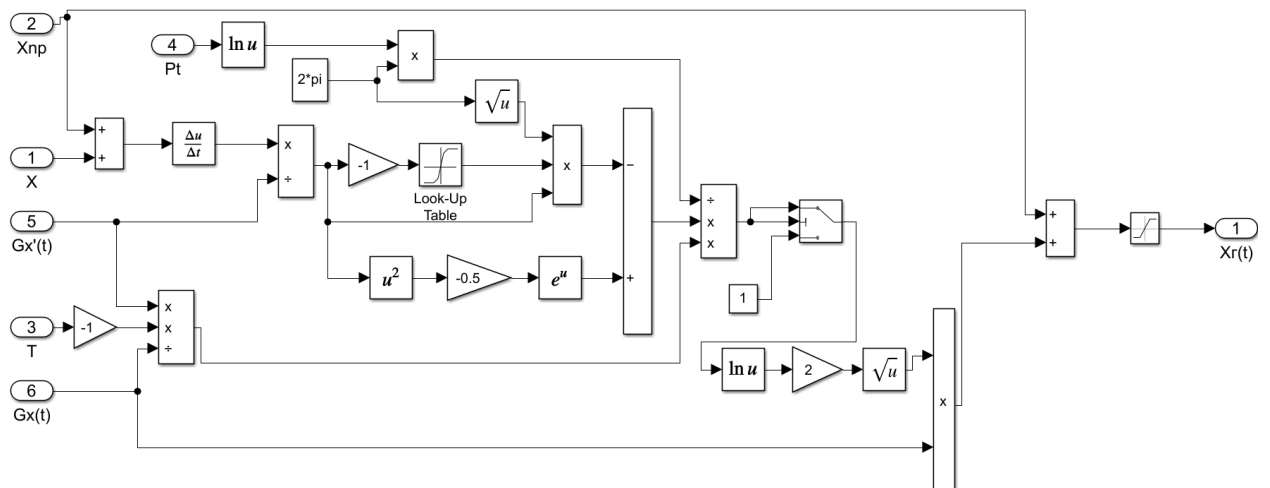


Рис. 4.5 – Внутрішня структура блоку BRGZD.

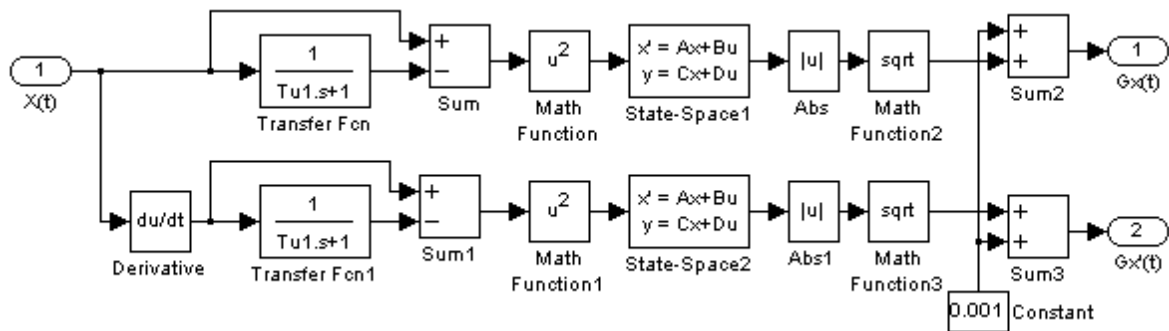


Рис. 4.6 – Внутрішня структура блоку BRSO.

На рис. 4.6 та 4.8 представлені результати моделювання стабілізуючої САР температури стерилізації соку та системи, що реалізує гарантующе керування при фіксованому значенні середньоквадратичного відхилення збурень. Задане значення температури стерилізації соку встановлено на рівні 107 °С, а граничне на рівні 104 °С. Як видно з результатів моделювання в СГУ викиди за граничне значення відсутні. Середнє видалення менше в системі, що реалізує гарантующе керування.

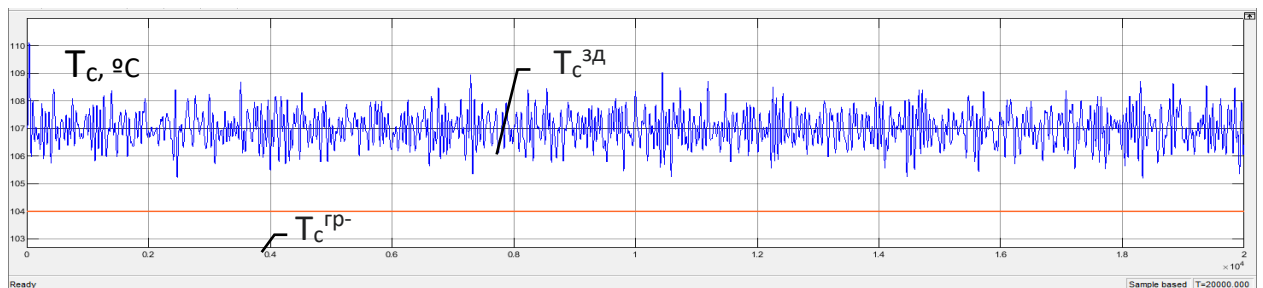


Рис. 4.7. Результати моделювання стабілізуючого САР температури стерилізації соку при координатних збуреннях випадкового характеру з фіксованим середньоквадратичним відхиленням.

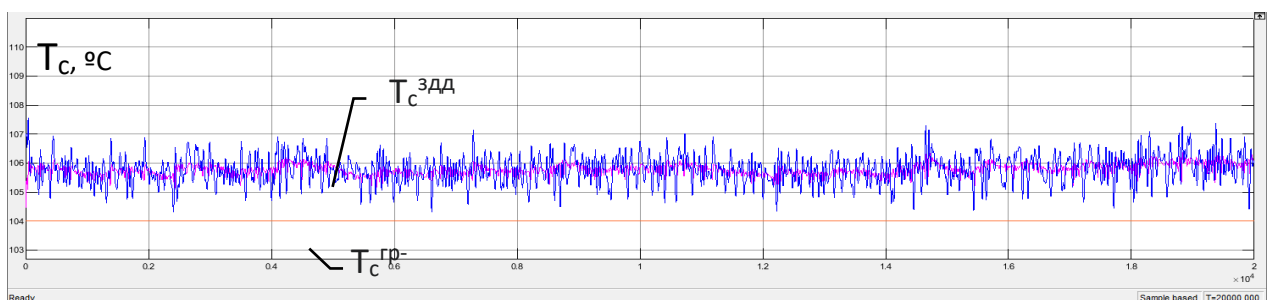


Рис. 4.8. Результати моделювання СГУ температури стерилізації соку при

координатних збуреннях випадкового характеру з фіксованим середньоквадратичним відхиленням.

При моделюванні обох варіантів систем керування в умовах, коли середньоквадратичне відхилення координатних збурень змінюється за синусоїдою (рис. 4.9), робота стабілізуючої САР погіршується (рис. 4.10). Є викиди регульованої змінної за граничну межу 104 °С. Система, що реалізує гарантуюче керування залишається працездатною (рис. 4.11). А середнє видалення температури стерилізації соку від граничного значення збільшується.

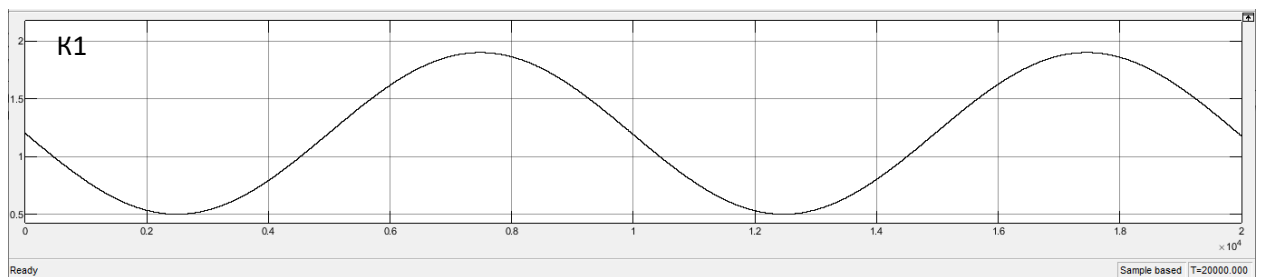


Рис. 4.9. Графік, що відбиває характер зміни середньоквадратичного відхилення координатних неконтрольованих збурень (зміна температури стерилізації томато-продуктів).

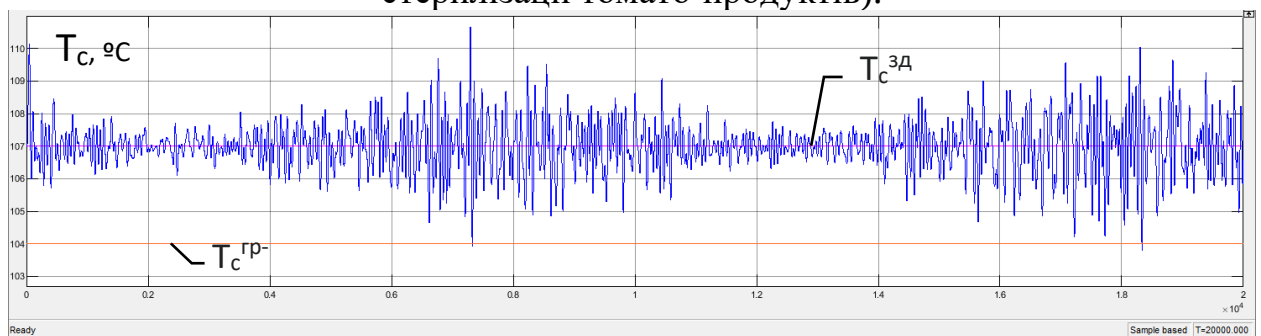


Рис. 4.10. Результати моделювання стабілізуючої САР.

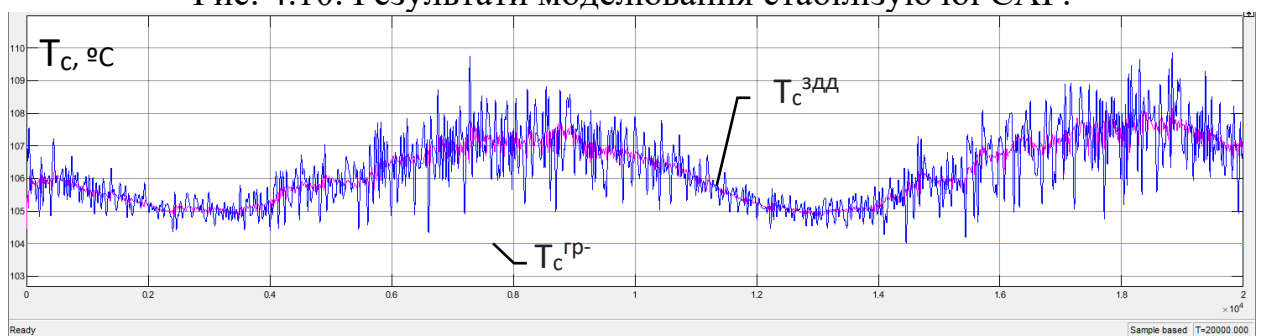


Рис. 4.11. Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування.

При моделюванні обох варіантів систем керування в умовах, коли діють параметричні збурення (рис. 4.12) та середньоквадратичне відхилення координатних збурень не змінюється, робота стабілізуючої САР погіршується (рис. 4.13). Є велика кількість викидів регульованої змінної за граничну межу 104 °С. Система стає нестійкою. Система, що реалізує гарантуюче керування залишається працездатною (рис. 4.14). Вихідів за граничне значення немає, але середнє віддалення від граничного значення збільшується незначно.

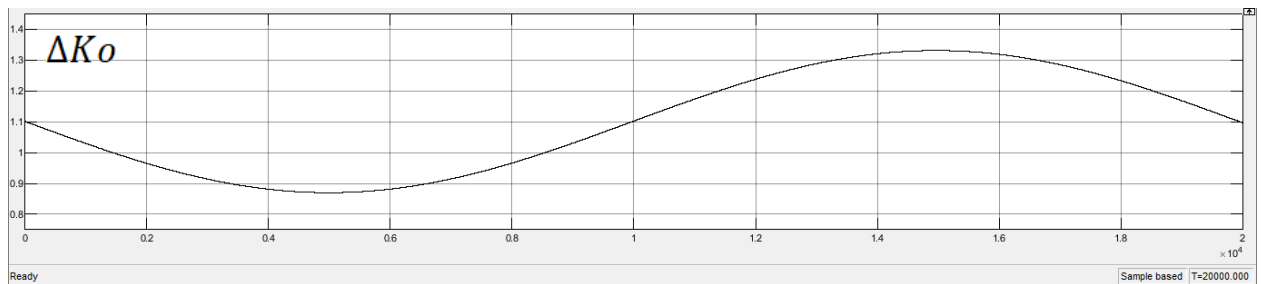


Рис. 4.12. Графік, що відображає характер зміни коефіцієнта передачі у каналі регулювання температури стерилізації.

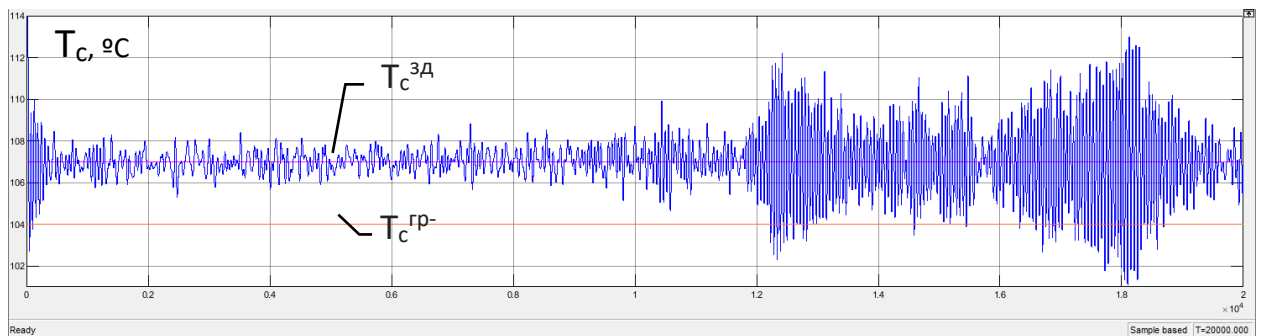


Рис. 4.13. Результати моделювання стабілізуючої САР.

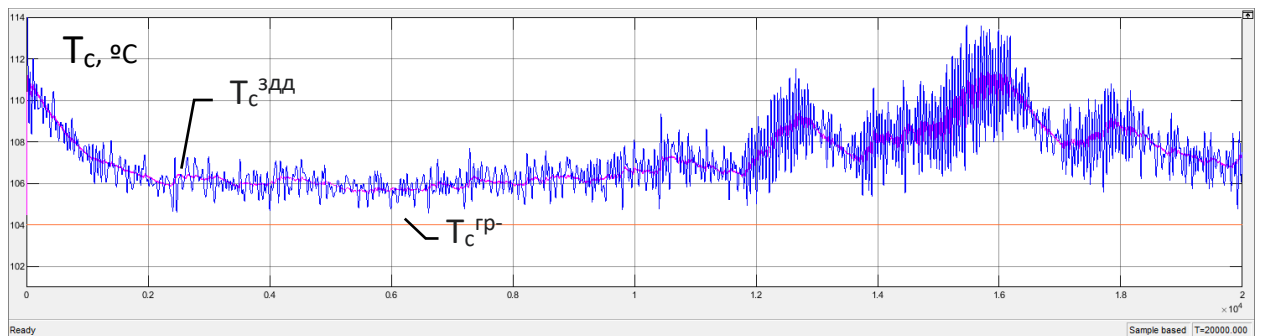


Рис. 4.14. Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування.

Результати моделювання обох варіантів систем керування в умовах, коли діють параметричні збурення (рис. 4.14) та середньоквадратичне відхилення координатних збурень змінюється за гармонічним законом (4.15), робота стабілізуючої САР значно погіршується (рис. 4.17). СГУ залишається працездатною та середнє видалення температури стерилізації соку від нижньої межі залишається менше, ніж у стабілізуючій САР, без вихідів за гранично припустиме значення температури стерилізації соку.

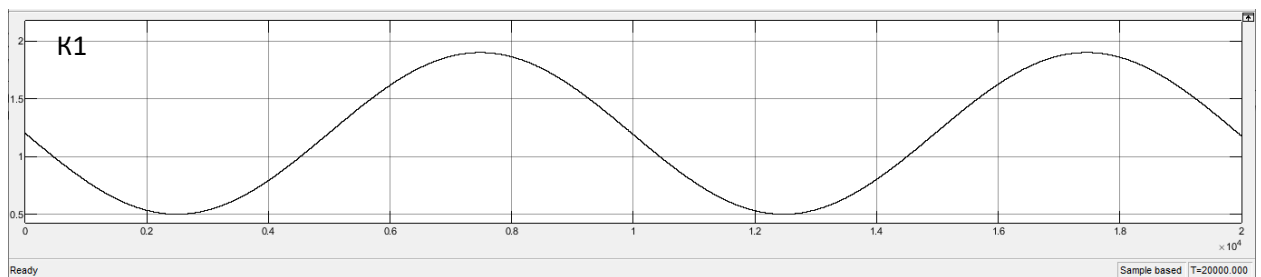


Рис. 4.15. Графік, що відбиває характер зміни середньоквадратичного відхилення координатних неконтрольованих збурень (зміна температури стерилізації соку).

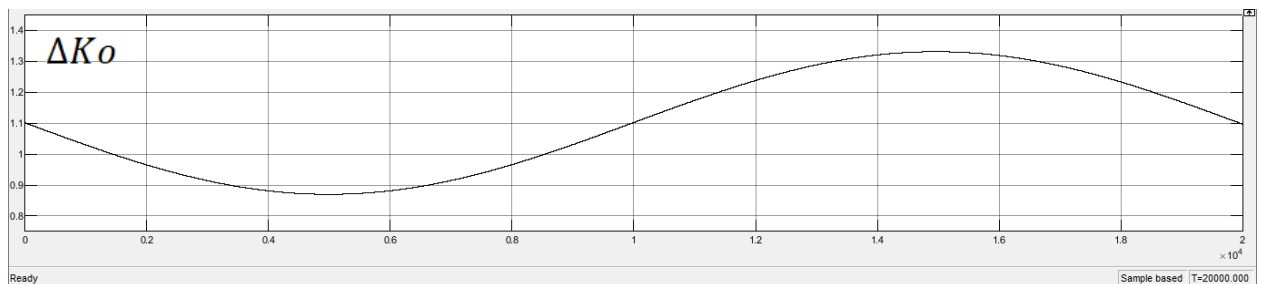


Рис. 4.16. Графік, що відображає характер зміни коефіцієнта передачі у каналі регулювання температури стерилізації соку.

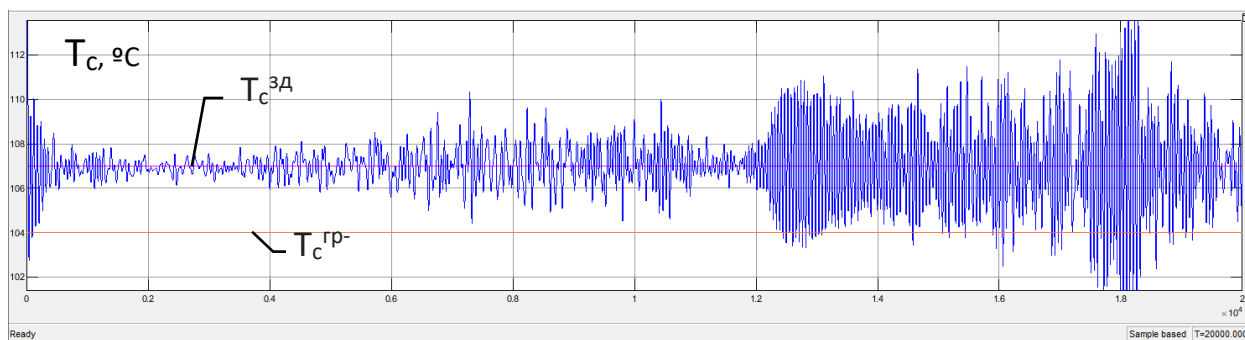


Рис. 4.17. Результати моделювання стабілізуючої САР.

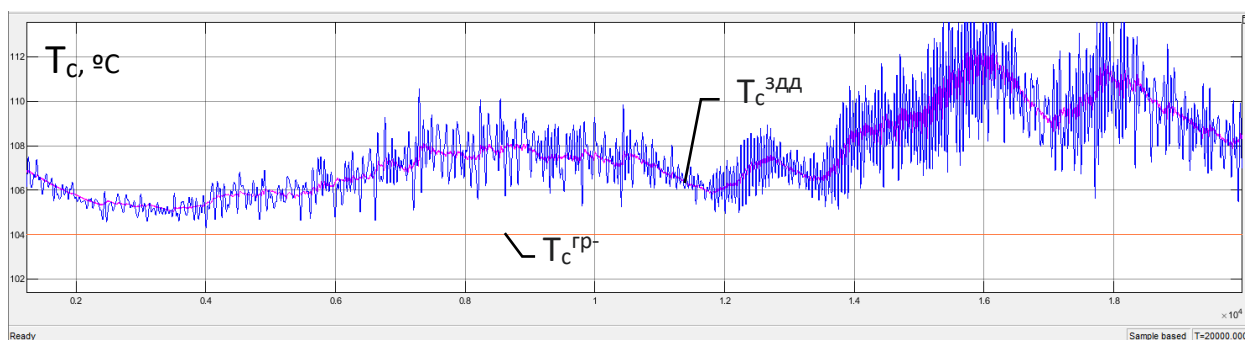


Рис. 4.18. Результати моделювання системи, що реалізує гарантующе керування.

За результатами проведених досліджень можна дійти висновку, що система, яка реалізує гарантующе керування температури стерилізації соку при дії нестационарних збурень забезпечує виконання процесу стерилізації томатопродуктів, підтримує температуру стерилізації соку максимально близько до нижньої межі регламенту, забезпечуючи зниження питомих енерговитрат. Стабілізуючі САР для вирішення такого завдання не підходять.

Розглянемо вплив значення ймовірності відсутності порушення регламенту на якість роботи системи гарантующого керування. Проведемо моделювання системи за різних значень ймовірності безаварійного режиму роботи ($P_t = [0.9, 0.99, 0.999]$). При значенні ймовірності $P_t = 0.99$ проводилися попередні дослідження, тому проведемо моделювання системи гарантующого керування при значеннях ймовірності $P_t = 0.9$ і $P_t = 0.999$. Результати моделювання подано на рис. 4.19 та 4.20.

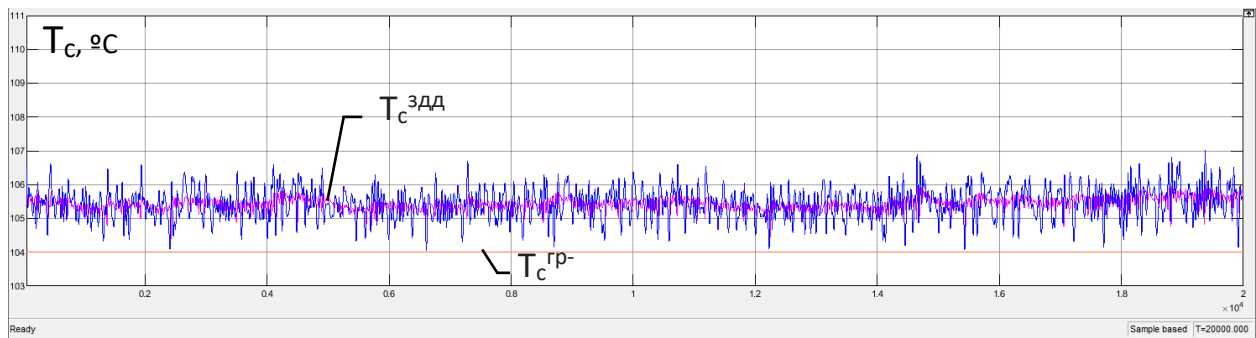


Рис. 4.19. Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування температурою стерилізації соку при $P_t = 0.9$.

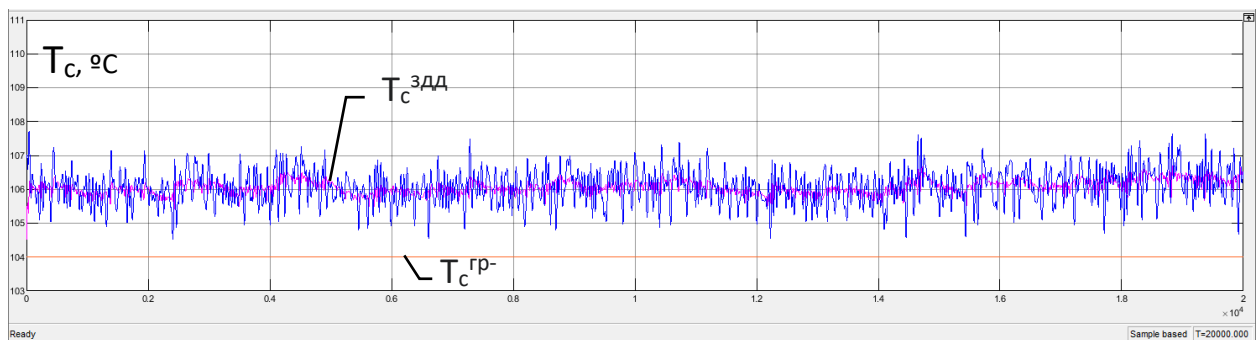


Рис. 4.20. Результати моделювання системи, що реалізує гарантуюче керування температурою стерилізації соку при $P_t = 0.999$.

За результатами можна дійти висновку, що більше значення P_t тим далі система відводить регульовану змінну від граничного значення. При зниженні значення P_t можуть з'явитися виходи за граничне значення температури стерилізації соку.

4.5 Висновки за розділом 4

У 4 розділі роботи розроблено та досліджено модернізовану САУ процесом стерилізації томатопродуктів. САУ реалізує нову функцію: функцію гарантуючого керування температурою стерилізації соку. Реалізація цієї функції забезпечує зниження питомих енерговитрат (витрат енергії пари) на стерилізації томатного соку за рахунок підтримки температури стерилізації соку поблизу нижньої межі регламенту без її порушення.

У роботі проведено низку порівняльних аналізів САР базової структури

та САУ, що реалізує функцію гарантуючого керування. Дослідження проводилися за умов постійно діючих обурення випадкового характеру.

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що система гарантуючого керування при дії нестационарних збурень забезпечує виконання процесу стерилізації томатопродуктів, підтримує температуру стерилізації соку максимально близько до нижньої межі регламенту, забезпечуючи зниження питомих енерговитрат. Стабілізуючі САР для вирішення такого завдання не підходять.

За результатами можна дійти невтішного висновку, що більше значення P_t тим далі система відводить регульовану змінну від граничного значення. У всіх експериментах САУ, що реалізує функцію гарантуючого керування, є кращою, ніж САР базової структури, і подальше її використання є доцільним.

РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ НАПІДПРИЄМСТВІ

5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми керування процесом стерилізації томатопродуктів і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.

Технічну структуру системи керування процесом стерилізації томатопродуктів розроблено на базі контролера Simatic S7-300. Для реалізації системи керування в модулях ПЗО контролера передбачені: 3-аналогових входів, 2- аналогових виходи, 9 –дискретних входів і 4 - дискретних виходів. Виходячи з середньої складності алгоритмів керування, для реалізації системи керування скористаємося контролером CPU 313C-2DP із вбудованими дискретними входами/виходами (рис 5.1).

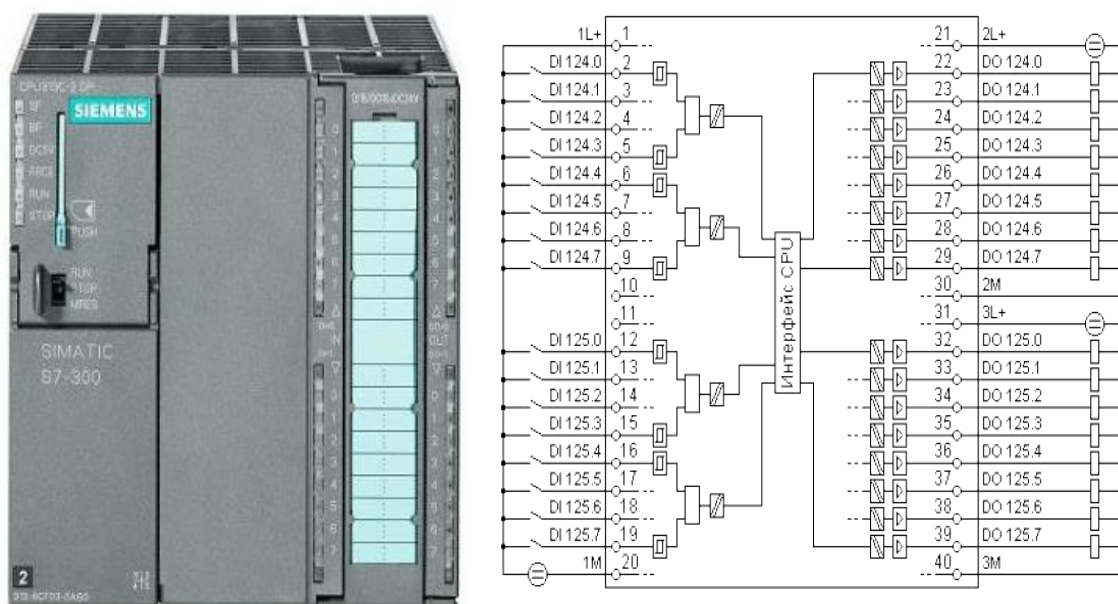


Рис. 5.1. Загальний вигляд та схеми зовнішніх підключень CPU 313C-2DP.

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

Табл. 5.1 Технічні дані входів/виходів CPU

Центральные процессоры S7-300C	CPU 312C	CPU 313C-2 PIP	CPU 313C-2 DP
Встроенные дискретные входы			
Количество входных каналов: • общее • используемое технологическими функциями Адреса входов, устанавливаемые по умолчанию Количество входных сигналов, одновременно фиксируемых триггерами: • горизонтальная установка: – при температуре до 40°C – при температуре до 60°C • вертикальная установка: – при температуре до 40°C Гальваническое разделение: • между каналами и внутренней шиной контроллера • между каналами Допустимая разность потенциалов между различными цепями Испытательное напряжение изоляции Ток, потребляемый из цепи L+ при холостном ходе Индикация состояний входных сигналов Поддержка прерываний	10 8 DI124.0 ... DI125.1 10 5 5 Есть Нет =75В/~60В =500В Нет	16 12 DI124.0 ... DI125.7 16 8 8 Есть Нет =75В/~60В =500В 70мА	16 12 DI124.0 ... DI125.7 16 8 8 Есть Нет =75В/~60В =500В 70мА
Диагностические функции Входное напряжение: • номинальное значение • логической единицы • логического нуля • защита от неправильной полярности напряжения Входной ток логической единицы Задержка распространения входного сигнала при номинальном входном напряжении: • для стандартных входов • для входов, используемых технологическими функциями Входная характеристика по IEC 1131 2-проводное подключение датчиков BERO: • допустимый установившийся ток Длина кабеля для стандартных дискретных входов/ входов технологических функций, не более: • обычного • экранированного	=24В 15...30В -3...+5В Есть 9мА 0.1/ 0.3/ 3.0/ 15мс, конфигурируется, по умолчанию 3.0мс 48 мкс Тип 1 Возможно 1.5мА 600м/ нет 1000м/ 100м	=24В 15...30В -3...+5В Есть 9мА 16 мкс Тип 1 Возможно 1.5мА 600м/ нет 1000м/ 100м	=24В 15...30В -3...+5В Есть 9мА 16 мкс Тип 1 Возможно 1.5мА 600м/ нет 1000м/ 100м

Рекомендації по підключенню дискретних входів наведені на наступних рисунках.

Схемы защиты для катушек, обтекаемых постоянным током

К катушкам, обтекаемым постоянным током, параллельно подключается, как показано на следующем рисунке, диод или стабилитрон.

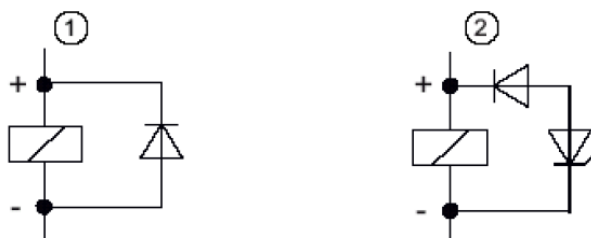


Рис. 3-2. Схемы защиты для катушек, обтекаемых постоянным током

- ① с диодом
② со стабилитроном

Схема с диодом/стабилитроном обладает следующими свойствами:

- Можно полностью избежать перенапряжений, связанных с отключениями. Стабилитрон допускает более высокое отключаемое напряжение.
 - Большая задержка отключения (в 6 – 10 раз больше, чем без защитной схемы).
- Схема со стабилитроном обеспечивает более быстрое отключение, чем схема с диодом.

Рис. 5.2. Рекомендації по захисту дискретних входів від індуктивних перенапруг (початок).

Схемы защиты для катушек, обтекаемых переменным током

К катушкам, обтекаемым переменным током, параллельно подключается, как показано на следующем рисунке, варистор или RC-цепочка.

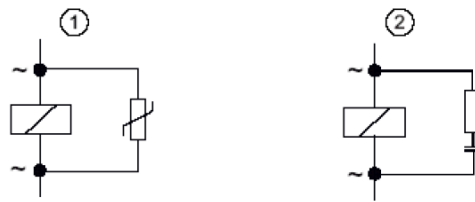


Рис. 3-3. Схемы защиты для катушек, обтекаемых переменным током

- ① с варистором
- ② с RC-цепочкой

Схема с варистором обладает следующими свойствами:

- Амплитуда перенапряжения, возникающего при отключении, ограничивается, но не демпфируется.
- Крутизна перенапряжения остается той же самой.
- Задержка отключения незначительна.

Схема с RC-цепочкой обладает следующими свойствами:

- Уменьшаются амплитуда и крутизна напряжения, возникающего при отключении.
- Задержка отключения незначительна.

Рис. 5.2. Рекомендації по захисту дискретних входів від індуктивних перенапруг (закінчення).

Для вводу аналогових сигналів керування скористаємося аналоговим модулем вводу вводу SM 331 (6ES7331-7NF10-0AB0)



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

Рис.5.3. Загальний вигляд та характеристики модулю аналогового введення.

Для виводу аналогових керуючих впливів виберемо аналоговий модуль виводу SM 332 (6ES7332-5HD01-0AB0).



Кількість виходів	4
Вхідна напруга L	L+ 24V DC
Вихідні діапазони:	
- напруги	$\pm 10V$, 1...5V, 0...10V
- струму	0...20 ма, 4...20 ма, ± 20 mA
Споживання струму по задній шині	120mA
Потужність, що розсіюється	3W
Робоча температура	0...55°C, природна вентиляція
Ступінь захисту	IP20

Рис.5.4. Загальний вигляд та характеристики модулю аналогового виводу.

Загальний вигляд розробленої схеми технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом стерилізації томатопродуктів наведено на рис. 5.5.

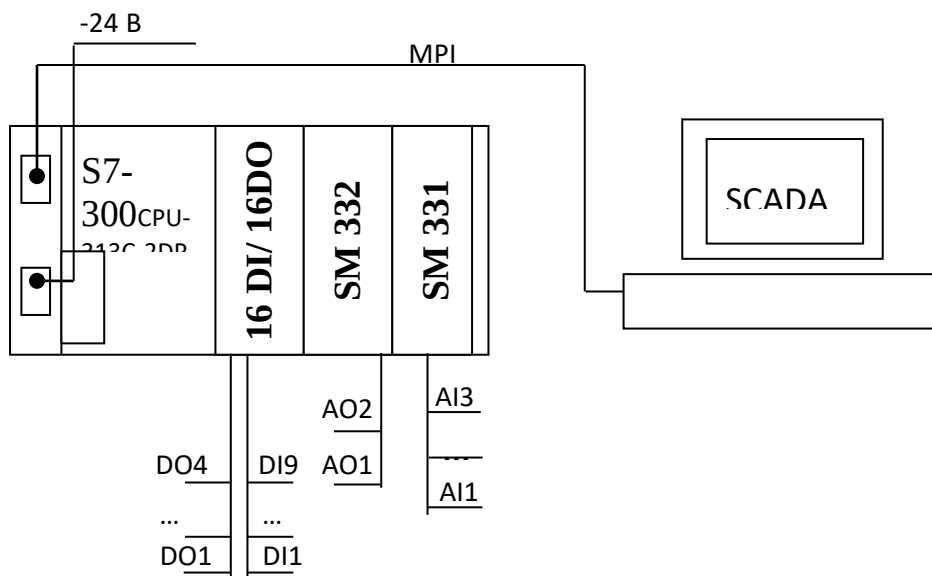


Рис. 5.5. Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом стерилізації томатопродуктів.

Існуюча система керування процесом стерилізації томатопродуктів, яка реалізована на базі наведеної технічної структури доповнена функцією гарантуючого керування. Інтегрована функція гарантування не потребує істотного збільшення обчислюваних ресурсів, та реалізації додаткових каналів вводу виводу сигналів. 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 процесом стерилізації томатопродуктів перевести у цифрову форму та вид придатний для програмування, а потім написати відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загалі такий підхід потребує багато часу. Альтернативою цьому є варіант конвертації отриманих алгоритмів з системи Matlab у потрібну середу програмування контролерів. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.

Для програмної реалізації розроблених алгоритмів будемо використовувати пакет Simulink PLC Coder з його бібліотекою функціональних блоків PLCLib. Для цього з використанням блоків бібліотеки PLCLib проведемо цифрову реалізацію алгоритмів керування у моделі Simulink. Отримана модель САК процесом стерилізації томатопродуктів з алгоритмами підготовленими до конвертації наведена на рис. 5.6.

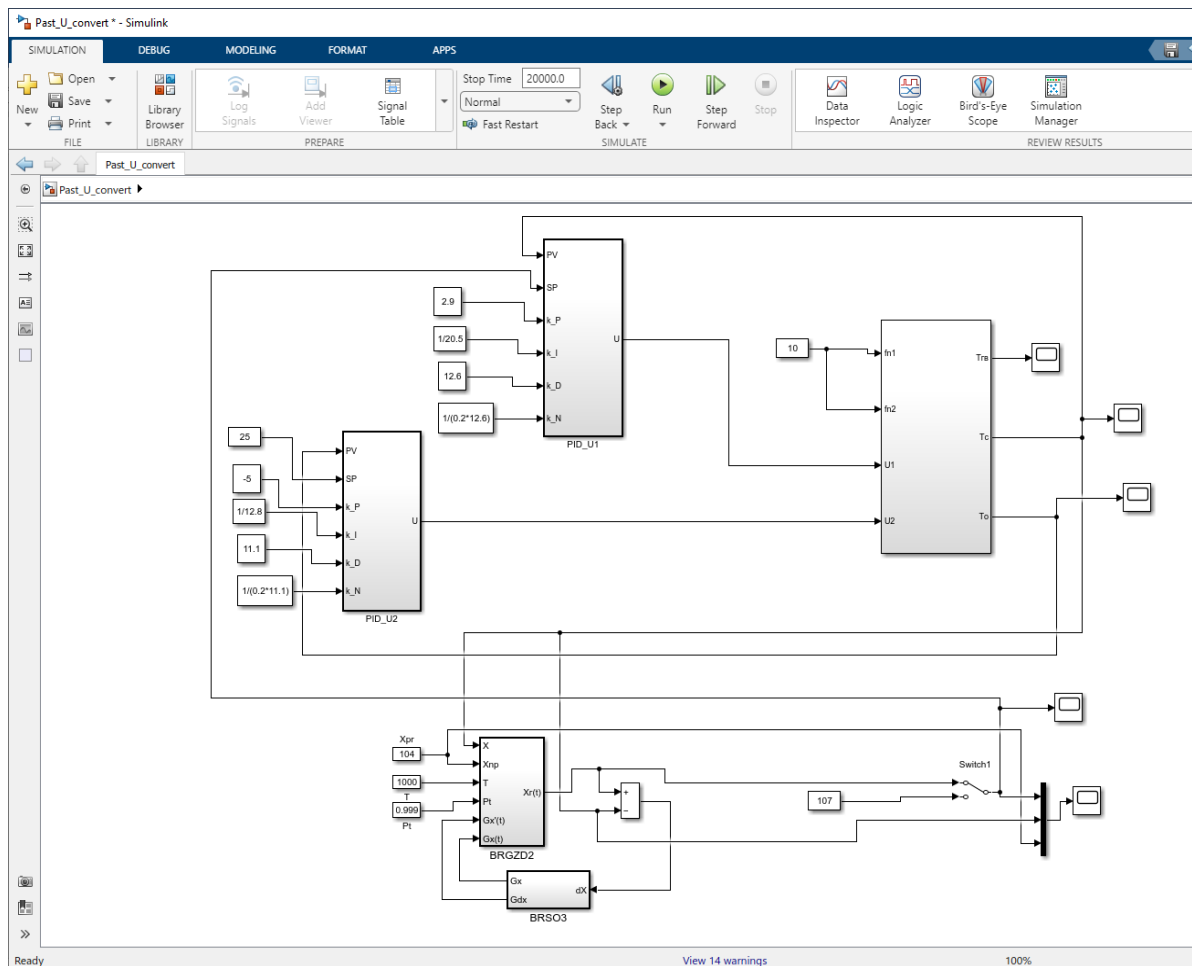


Рис. 5.6. Схема моделювання САК процесом стерилізації томатопродуктів з цифровими алгоритмами керування, які підготовлені до конвертації.

На рис. 5.7 – 5.9 наведені схеми моделювання ПІД регулятора, алгоритмів гарантуючого керування та коригуючого зв'язку.

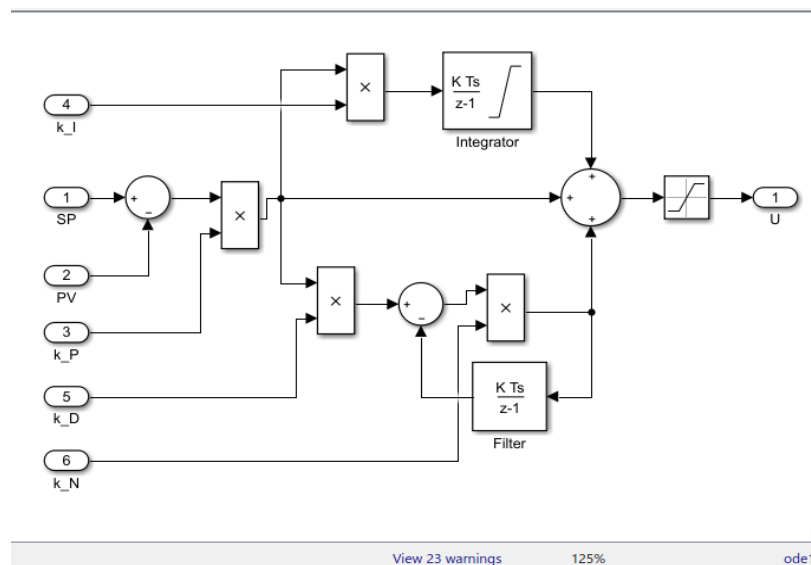


Рис. 5.7. Схема цифрового ПІД-регулятора.

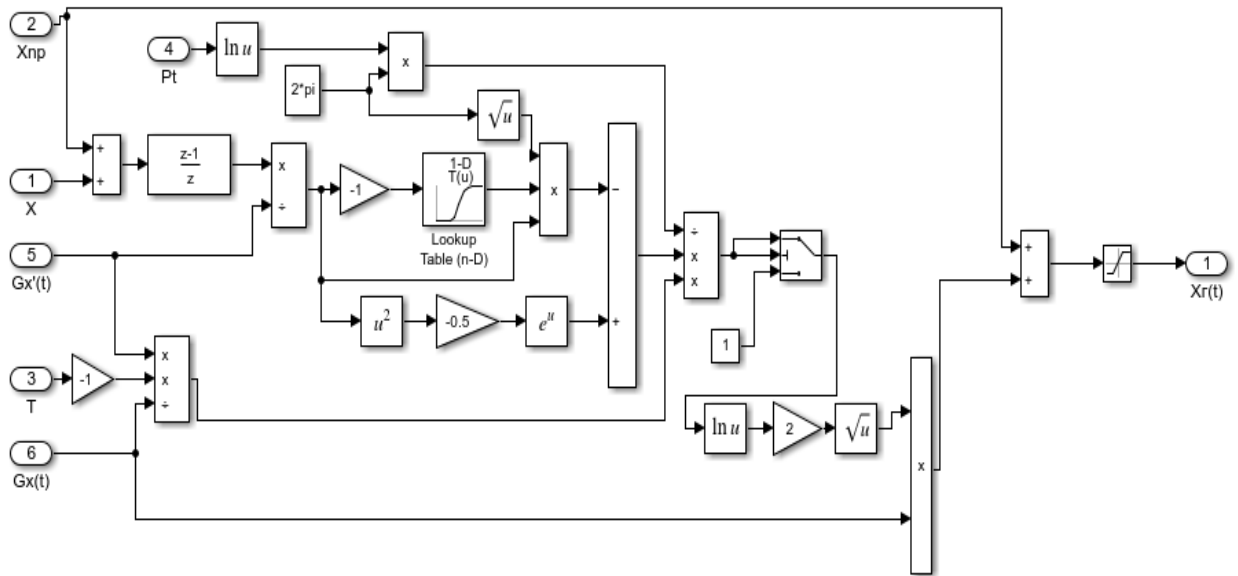


Рис. 5.8. Схема блока BRGZD (БРГЗД – блок розрахунку, гарантує заданого значення)

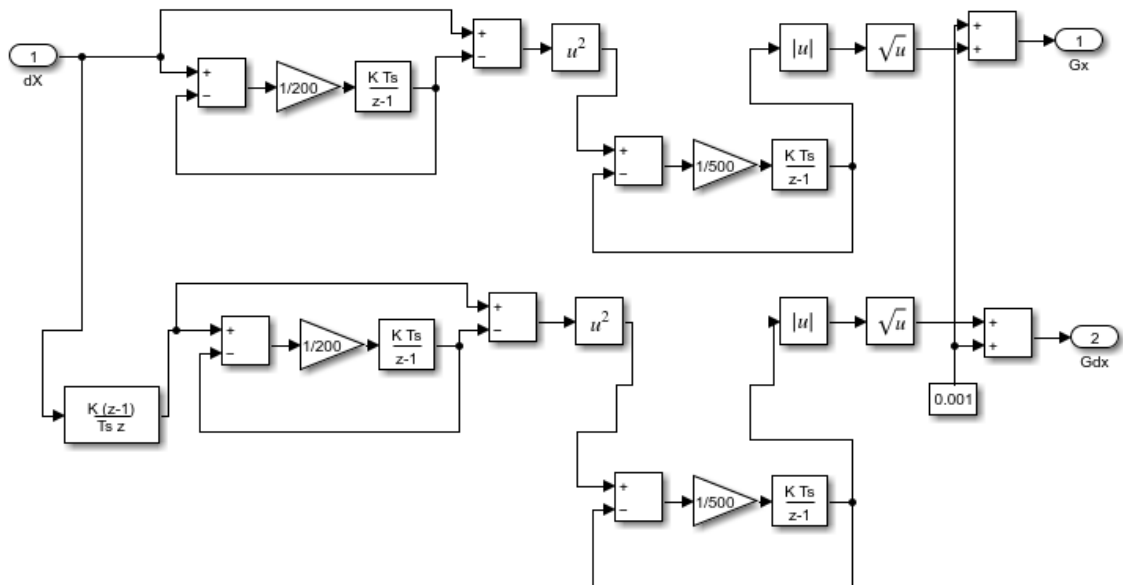


Рис. 5.9. Схема блока BRSO (БРСО – блок розрахунку статистичних оцінок на кожному інтервалі часу).

Отримання z-передатних функцій проводилось у системі Matlab. Приклад отримання z-передатної функції наведено на рис. 5.10.

```

Command Window

>> sys=tf([2],[5 1])

sys =

      2
-----
    5 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> sysd=c2d(sys,0.1,'zoh')

sysd =

    0.0396
-----
    z - 0.9802

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> sysd=c2d(sys,0.1,'foh')

sysd =

    0.01987 z + 0.01974
-----
            z - 0.9802

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

fx >>

```

Рис. 5.10. Приклад отримання z-передатної функції з її неперервного аналогу.

На рис. 5.11 наведена схема моделювання об'єкта керування.

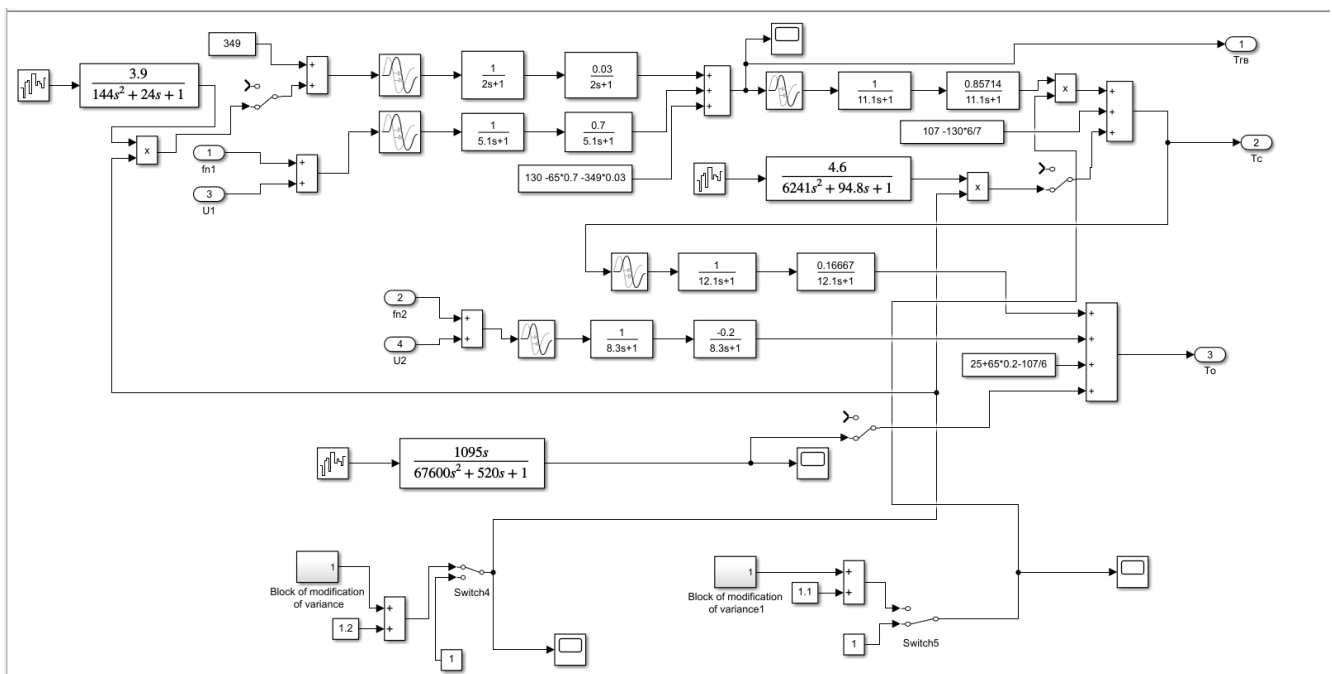


Рис. 5.11. Схема моделювання фрагменту об'єкта керування.

Результати моделювання системи керування при використанні цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис.5.12.

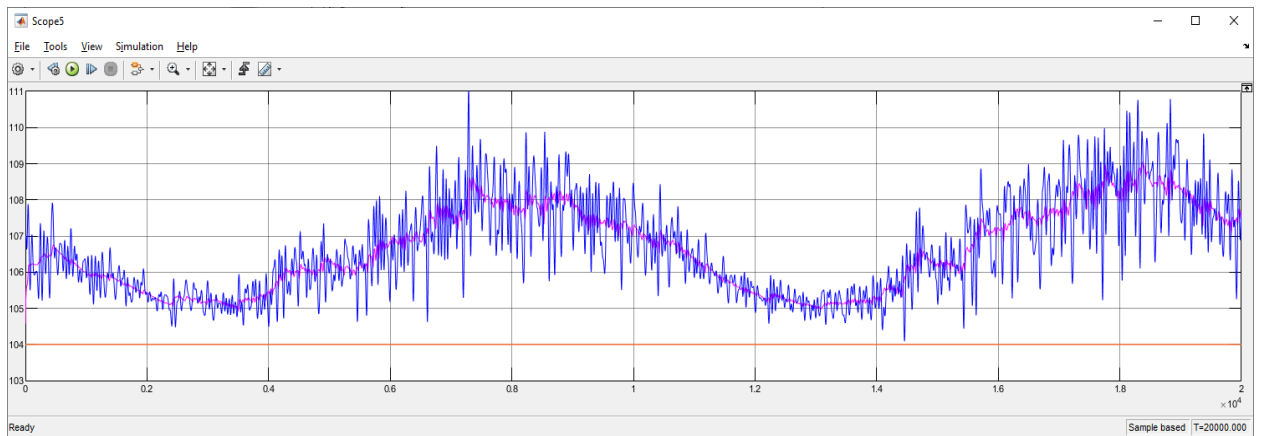


Рис. 5.12. Результати моделювання системи гарантуючого керування за каналом регулювання температури стерилізації соку.

Для кожної підсистеми яка буде конвертуватися у мову SCL середовища Step 7 проведемо налаштування рис 5.13.

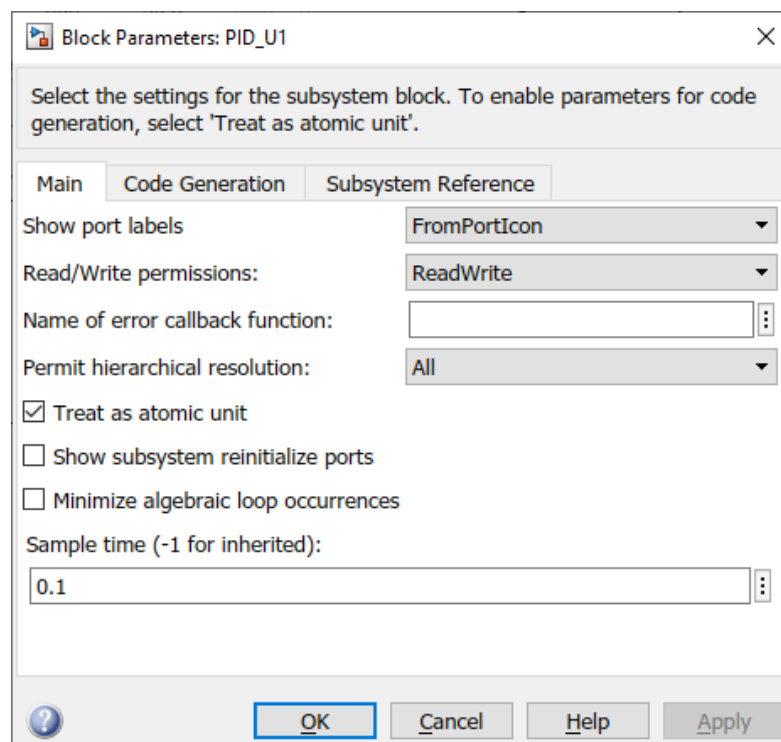


Рис. 5.13. Вікно налаштування параметрів підсистем для їх конвертації.

Пакет Simulink PLC Coder налаштуємо для компіляції коду у середовище Siemens SIMATIC Step7 5.4 (рис. 5.14).

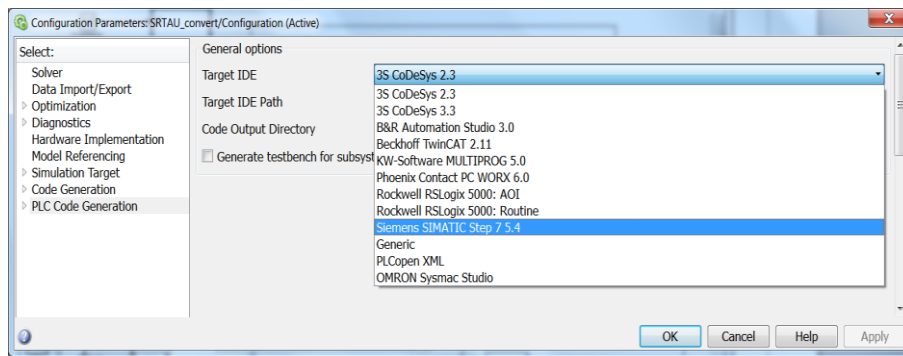


Рис. 5.14. Вікно налаштування пакету SimulinkPLCCoder.

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для блоку ПІД регулятора та блоків системи гарантуючого керування. На рис. 5.15 та 5.16 проведена процедура генерації коду для ПІД регулятора.

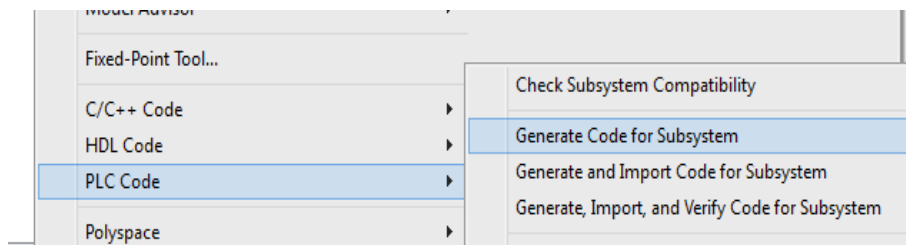


Рис 5.15 – Компіляція коду.

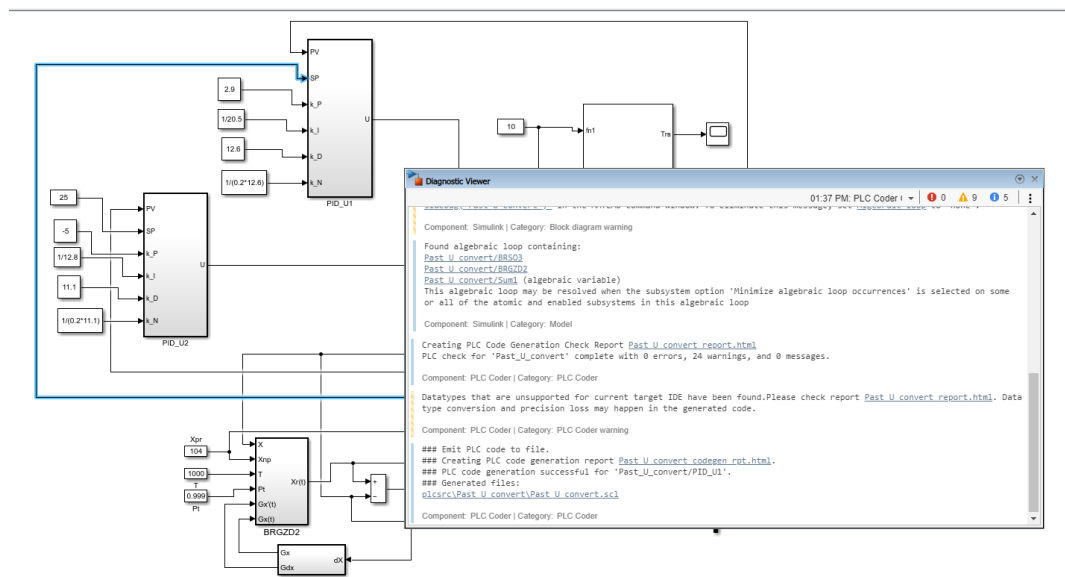
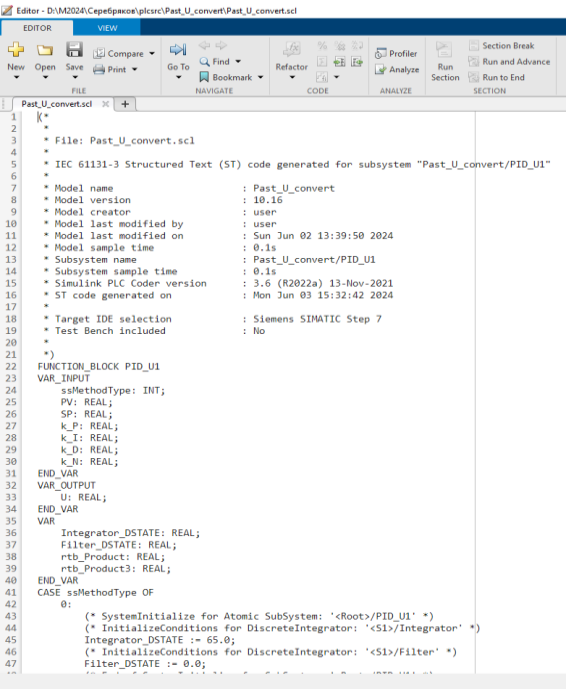


Рис. 5.16 – Результати успішної генерації коду ПІД-регулятора для середовища SIMATIC Step7 5.4.

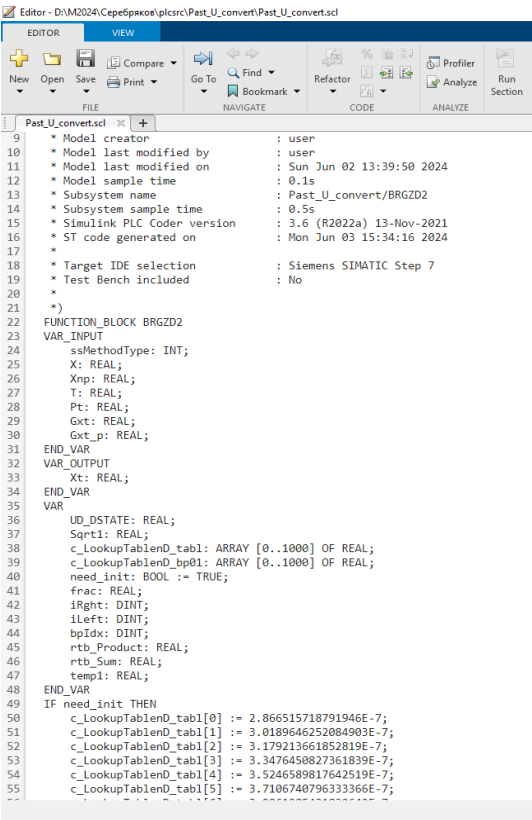
На рис. 5.17 та 5.18 наведено вихідний генерований код мовою SCL для

блоків ПІД регулятора та БРГЗД. Повний список вихідних кодів конвертованих блоків наведено у додатку А.



```
1 (*
2 *
3 * File: Past_U_convert.scl
4 *
5 * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "Past_U_convert/PID_U1"
6 *
7 * Model name          : Past_U_convert
8 * Model version       : 10.16
9 * Model creator       : user
10 * Model last modified by : user
11 * Model last modified on  : Sun Jun 02 13:39:50 2024
12 * Model sample time    : 0.1s
13 * Subsystem name      : Past_U_convert/PID_U1
14 * Subsystem sample time : 0.1s
15 * Simulink PLC Code version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on  : Mon Jun 03 15:32:42 2024
17 *
18 * Target IDE selection  : Siemens SIMATIC Step 7
19 * Test Bench included  : No
20 *
21 *)
22 FUNCTION_BLOCK PID_U1
23 VAR_INPUT
24   ssMethodType: INT;
25   PV: REAL;
26   SP: REAL;
27   k_P: REAL;
28   k_I: REAL;
29   k_D: REAL;
30   k_N: REAL;
31 END_VAR
32 VAR_OUTPUT
33   U: REAL;
34 END_VAR
35 VAR
36   Integrator_DSTATE: REAL;
37   Filter_DSTATE: REAL;
38   rtb_Product1: REAL;
39   rtb_Product3: REAL;
40 END_VAR
41 CASE ssMethodType OF
42   0:
43     (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/PID_U1' *)
44     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
45     Integrator_DSTATE := 65.0;
46     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
47     Filter_DSTATE := 0.0;
```

Рис. 5.17. Приклад генерованого коду ПІД – регулятора для середовища програмування Step7.



```
9 * Model creator          : user
10 * Model last modified by : user
11 * Model last modified on  : Sun Jun 02 13:39:50 2024
12 * Model sample time      : 0.1s
13 * Subsystem name         : Past_U_convert/BRGZD
14 * Subsystem sample time  : 0.5s
15 * Simulink PLC Code version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on   : Mon Jun 03 15:34:16 2024
17 *
18 * Target IDE selection    : Siemens SIMATIC Step 7
19 * Test Bench included     : No
20 *
21 *)
22 FUNCTION_BLOCK BRGZD
23 VAR_INPUT
24   ssMethodType: INT;
25   X: REAL;
26   Xnp: REAL;
27   T: REAL;
28   Pt: REAL;
29   Gxt: REAL;
30   Gxt_p: REAL;
31 END_VAR
32 VAR_OUTPUT
33   Xt: REAL;
34 END_VAR
35 VAR
36   UD_DSTATE: REAL;
37   Sqrt1: REAL;
38   c_LookupTablenD_tab1: ARRAY [0..1000] OF REAL;
39   c_LookupTablenD_bp01: ARRAY [0..1000] OF REAL;
40   need_init: BOOL := TRUE;
41   frac: REAL;
42   iRight: DINT;
43   iLeft: DINT;
44   bpIdx: DINT;
45   rtb_Product: REAL;
46   rtb_Sum: REAL;
47   temp1: REAL;
48 END_VAR
49 IF need_init THEN
50   c_LookupTablenD_tab1[0] := 2.866515718791946E-7;
51   c_LookupTablenD_tab1[1] := 3.0189646252084903E-7;
52   c_LookupTablenD_tab1[2] := 3.179213661852819E-7;
53   c_LookupTablenD_tab1[3] := 3.3476450827361839E-7;
54   c_LookupTablenD_tab1[4] := 3.5246589817642519E-7;
55   c_LookupTablenD_tab1[5] := 3.7106740796333366E-7;
```

Рис. 5.18. Приклад генерованого коду БРГЗД для середовища програмування Step7.

Програмну реалізацію алгоритмів керування на базі нейронних мереж проводимо аналогічним чином. На рис. 5.19 наведена схема моделювання нейронної мережі.

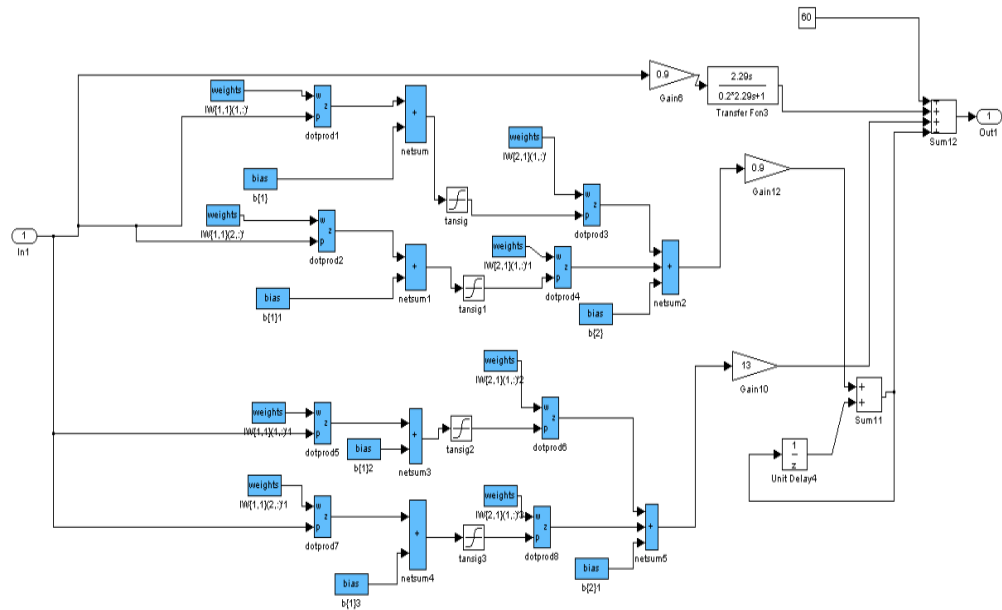


Рис. 5.19. Схема моделювання нейронного регулятора температури стерилізації соку.

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для середовища SIMATIC Step7 5.4. На рис. 5.20 наведено вихідний генерований код мовою SCL для блоку нейронної мережі. Повний список вихідних кодів конвертованих блоків наведено у додатку А.

```

Past_U_convert | SCL
5  * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "Past_U_convert/Neural_net"
6  *
7  * Model name : Past_U_convert
8  * Model version : 10.10
9  * Model creator : user
10 * Model last modified by : user
11 * Model last modified on : Sun Jun 02 13:39:50 2024
12 * Model sample time : 0.1s
13 * Subsystem name : Past_U_convert/Neural_net
14 * Subsystem sample time : 0.5s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on : Mon Jun 03 15:39:40 2024
17 *
18 * Target IDE selection : Siemens SIMATIC Step 7
19 * Test Bench included : No
20 *
21 *
22 FUNCTION_BLOCK Neural_net
23 VAR_INPUT
24   ssMethodType: INT;
25   Gx: REAL;
26 END_VAR
27 VAR_OUTPUT
28   Gx: REAL;
29   Gdx: REAL;
30 END_VAR
31 VAR
32   c_DiscreteTimeIntegr: REAL;
33   d_DiscreteTimeIntegr: REAL;
34   e_DiscreteTimeIntegr: REAL;
35   f_DiscreteTimeIntegr: REAL;
36   UD_0STATE: REAL;
37   rtb_Temp: REAL;
38   rtb_Sqrt: REAL;
39   rtb_Sqrt1: REAL;
40   rtb_Sum1_tmp: REAL;
41   rtb_Sum_tmp: REAL;
42   temp1: REAL;
43   temp2: REAL;
44 END_VAR
45 CASE ssMethodType OF
46   0:
47     (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: 'cRoot/Neural_net' *)
48     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: 'c1s/Discrete-Time Integrator2' *)
49     c_DiscreteTimeIntegr := 0.010000000000000002;
50     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: 'c1s/Discrete-Time Integrator3' *)
51     d_DiscreteTimeIntegr := 0.00062500000000000012;

```

Рис. 5.20. 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. 5.21, а на рис 5.22 приклад імпортованого генерованого коду.

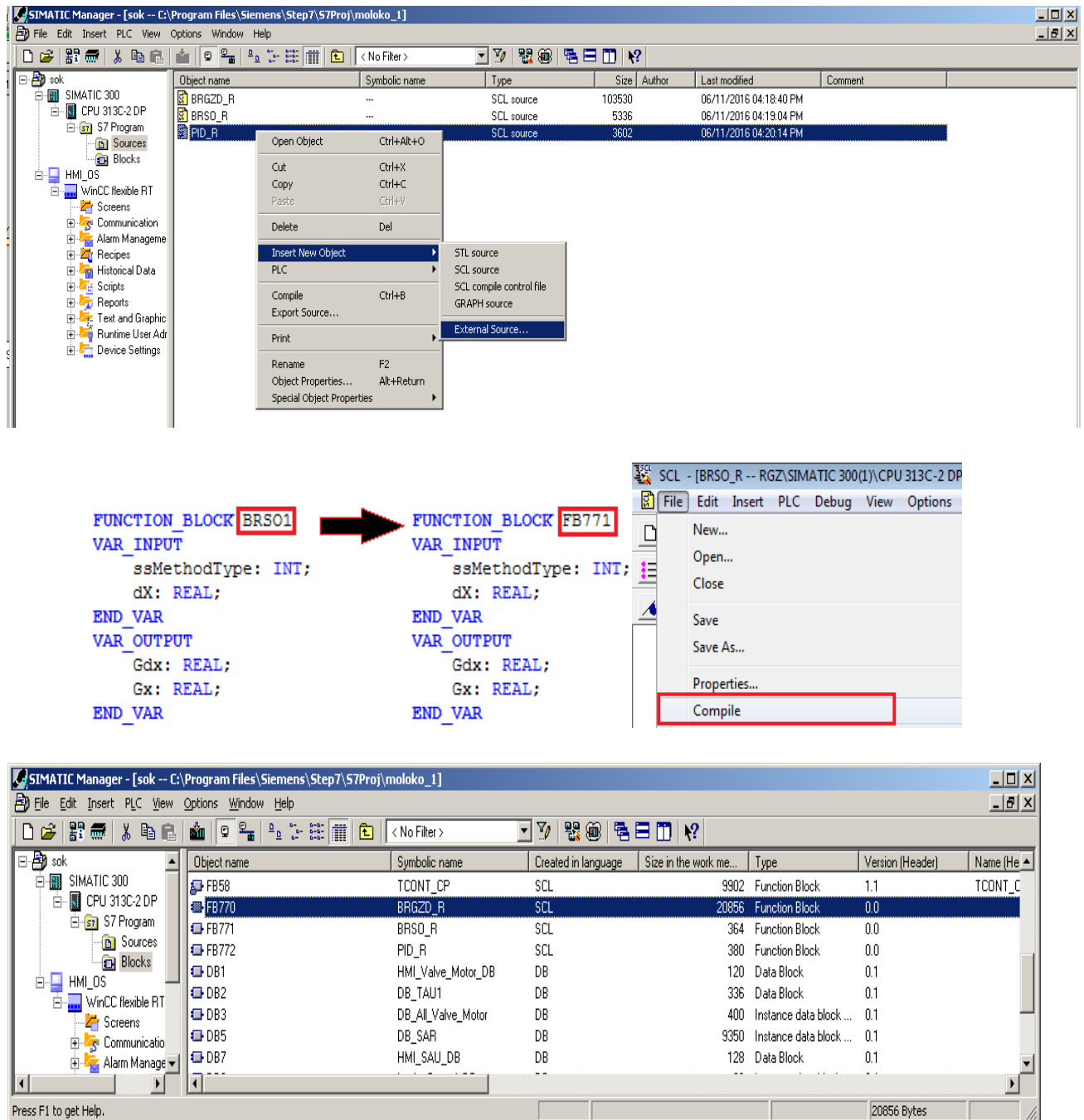
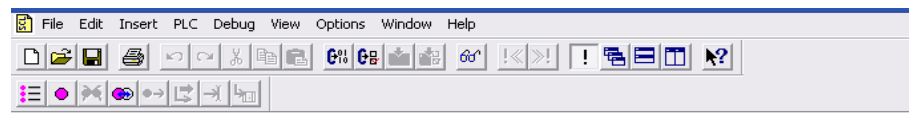


Рис. 5.21. Процедура імпорту генерованого коду СГУ в середовище програмування Step 7 і створення відповідного функціонального блоку.



```

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:
         * Import: '<Root>/k_P' *)
        rtb_Product := rtb_Add2 * k_P;
        (* Product: '<S1>/Product3' incorporates:
         * DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter'
         * Import: '<Root>/k_D'
         * Import: '<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
            (* Outport: '<Root>/U' *)
            U := 100.0;
        ELSIF rtb_Add > -100.0 THEN
            (* Outport: '<Root>/U' *)
            U := rtb_Add;
        ELSE
            (* Outport: '<Root>/U' *)
            U := -100.0;
        END IF;
        (* End of Saturate: '<S1>/Saturation' *)
        (* Outport: '<Root>/dPV' *)
        dPV := rtb_Add2;
        (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' incorporates:
         * Update for Import: '<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. 5.22. Приклад імпортованого коду ПІД-регулятора в середовищі програмування Step 7.

Загальний вигляд розробленого проекту в середовищі Step 7 наведено на рис. 5.23.

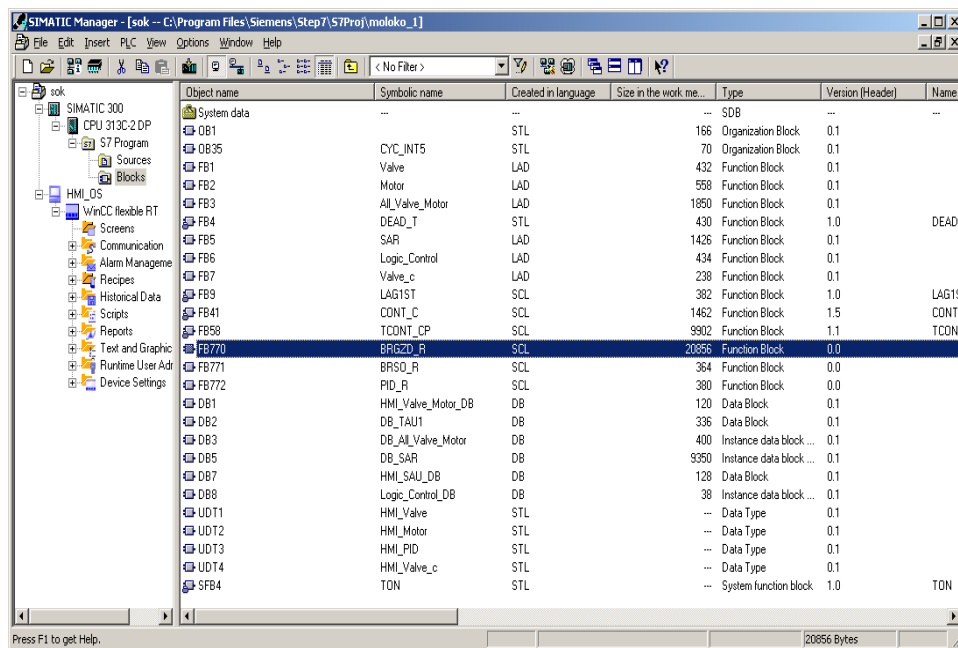


Рис. 5.23. Загальний вид вікна проекту в середовищі Step 7.

Алгоритми регулювання температури стерилізації соку та алгоритм гарантуючого керування реалізовані у функціональному блоці FB5. Фрагмент коду програми наведено на рис. 5.24.

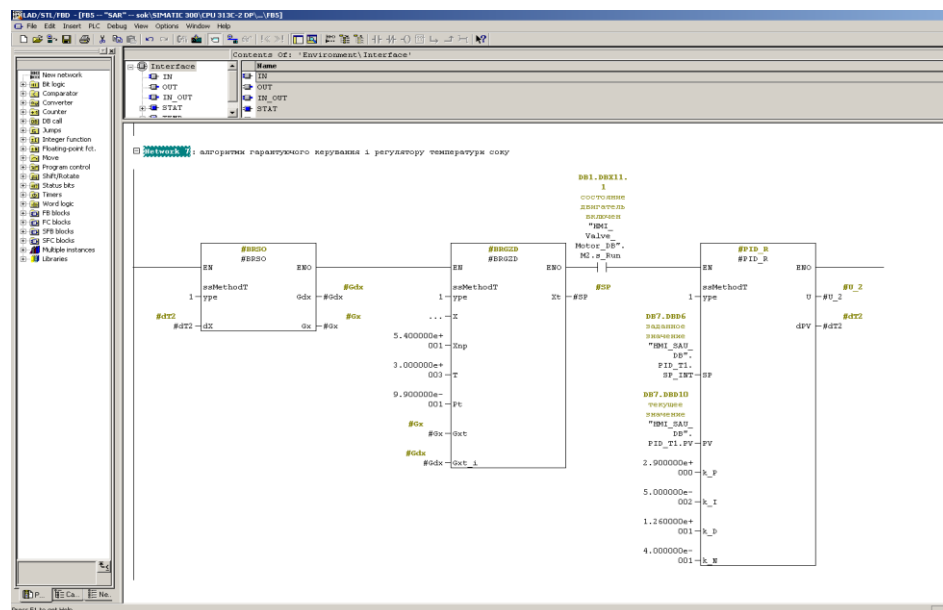


Рис. 5.24. Фрагмент програми в функціональному блоці FB5 яка реалізує розрахунок регулятора та блоків гарантуючого керування.

Провести тестування програми гарантуючого керування в режимі емуляції контролеру досить складно, тому зупинимося на тестуванні програми ПІД-регулятора. Для цього доповнимо програму моделлю об'єкта

керування і запусимо розрахунок моделі CAP за каналами регулювання температури стерилізації соку та його охолодження. Фрагмент програми яка реалізує розрахунок моделі ОК і регулятору температури у режимі тестування наведено на рис. 5.25 і 5.26. А результати тестування у вигляді перехідної характеристики CAP температури стерилізації соку наведені у вікні SCADA системи WinCCflexible на рис. 5.27.

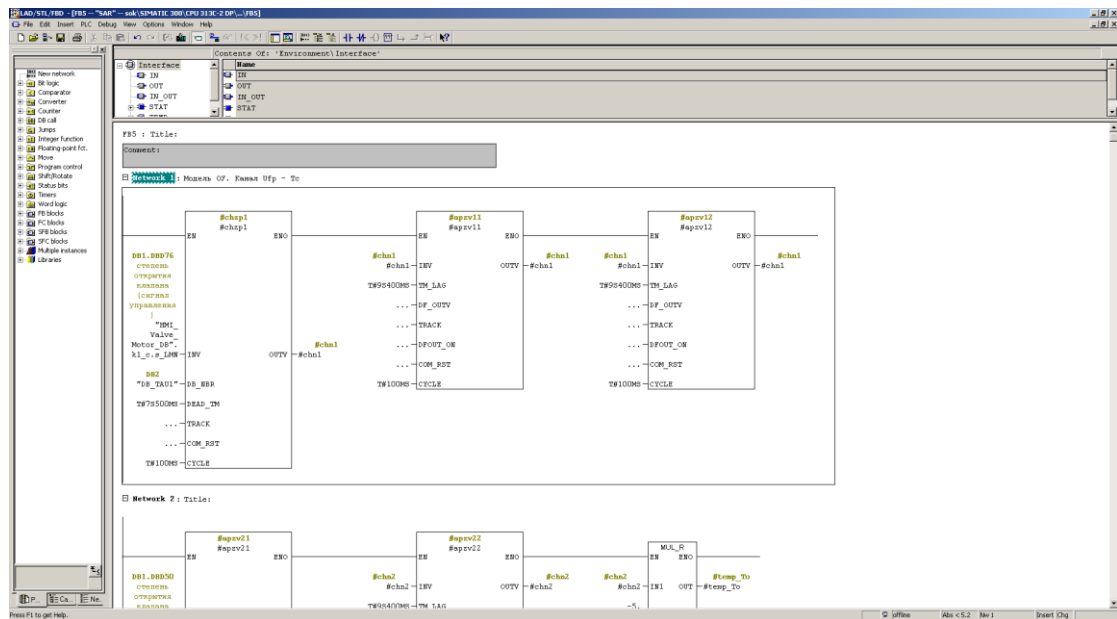


Рис. 5.25. Фрагмент програми яка реалізує розрахунок моделі ОК.

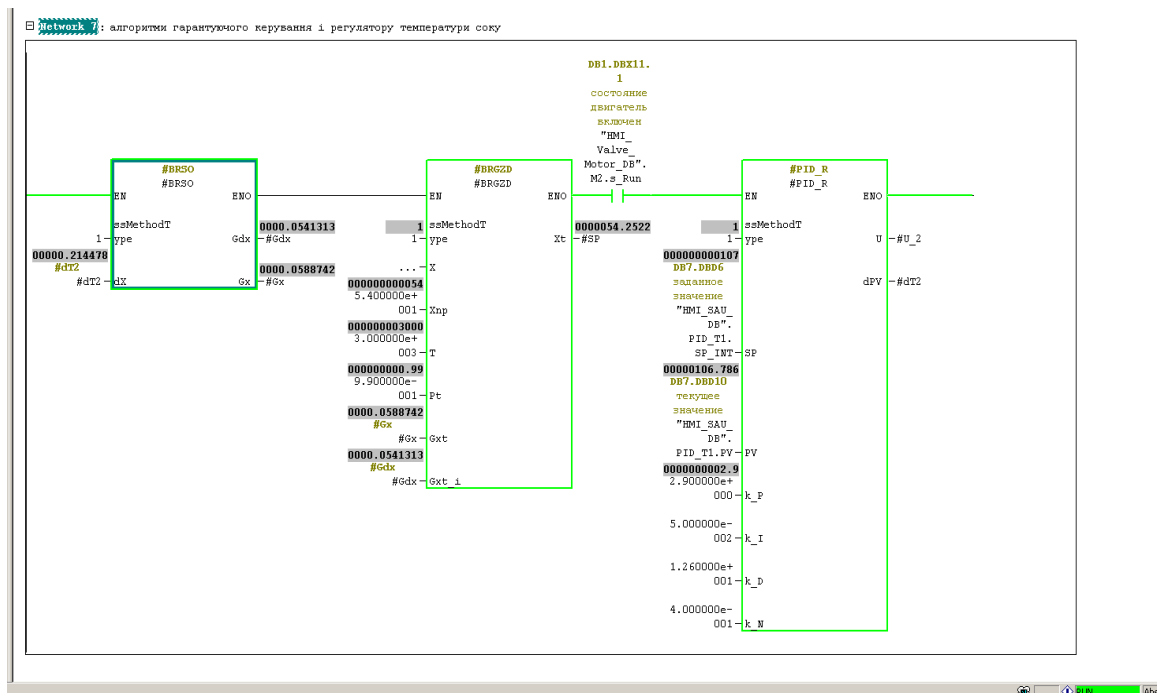


Рис. 5.26. Фрагмент програми конвертованого алгоритму СГУ та регулятору температури стерилізації соку у режимі тестування.

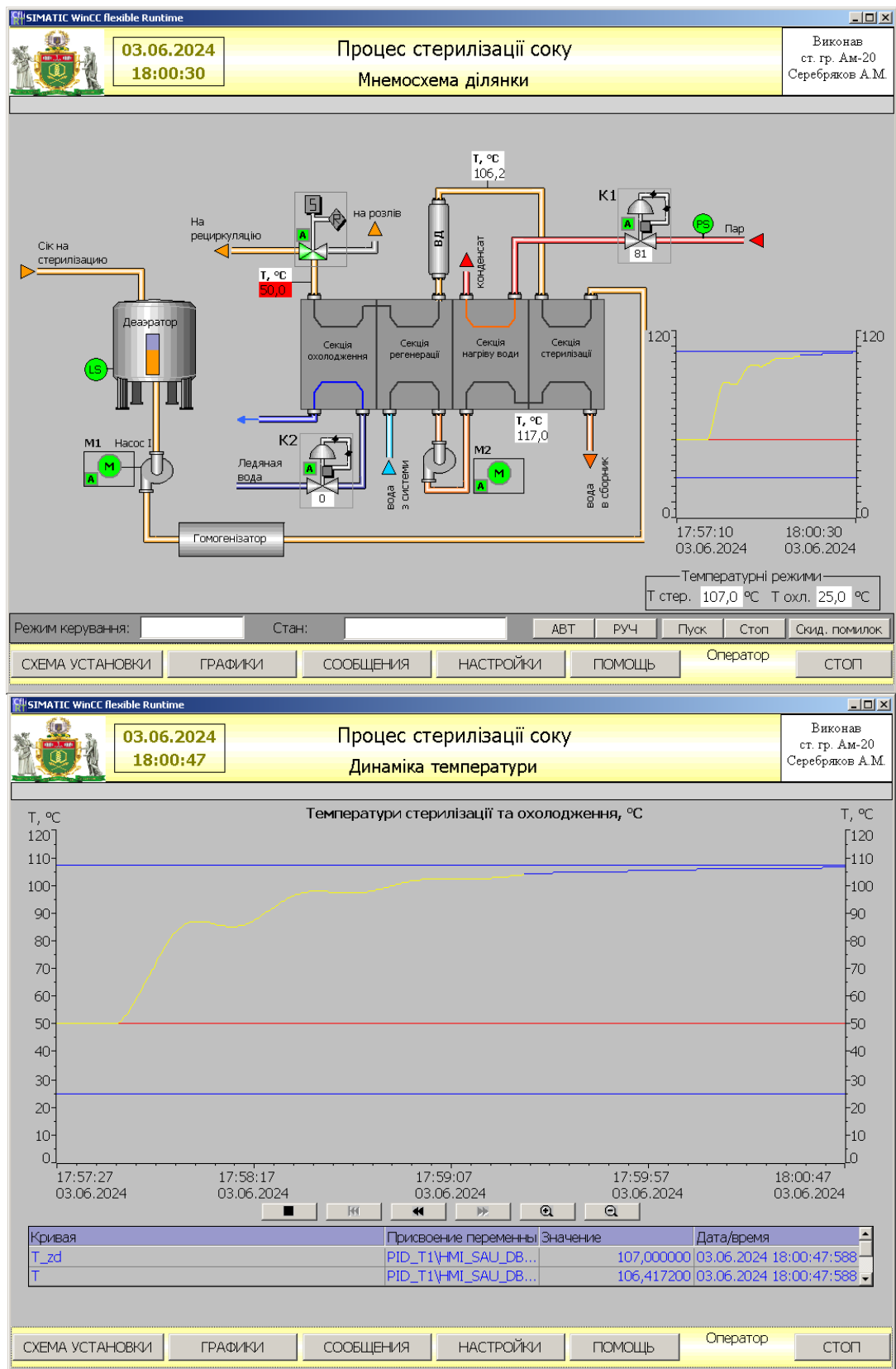


Рис. 5.27. Результати тестування моделі САР температури стерилізації соку.

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 стерилізації томатопродуктів алгоритмів гарантуючого керування температурою стерилізації соку дозволить підтримувати температуру соку ближче до нижньої границі 104 °С не порушуючи регламенту. Це дозволить забезпечити зниження питомих витрат енергії на стерилізацію приблизно до (3 – 3.5)%, при збереженні якості томатопродуктів.

5.4 Висновки за розділом 5

1. В цьому розділі розглянута програмно-технічна структура системи керування процесом стерилізації томатопродуктів в потоці. Обґрунтовано обрані контролер, ПЗО та програмне забезпечення фірми Siemens для реалізації системи.

2. Розроблені в системі Matlab моделі нових алгоритмів керування (алгоритмів гарантуючого 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 за рахунок інтеграції алгоритмів гарантуючого керування не потребує зміни технічної структури системи і дозволяє залишити базовий контролер без змін. Тому модернізація САУ на базі Siemens окуповується досить швидко.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено науково-технічну задачу, яка полягає у синтезі моделей систем керування процесу стерилізації томатопродуктів. Отримані теоретичні та науково-практичні результати в області підвищення ефективності функціонування установки стерилізації томатного соку.

Основні результати і висновки магістерської роботи полягають в наступному:

1. Проведено аналіз типових систем керування процесами стерилізації томатного соку, обґрунтовано задачі розробки моделей більш складних та нетрадиційних систем керування зокрема на основі математичного апарату штучних нейронних мереж;

2. Синтезовані моделі систем керування підвищеної динамічної точності процесами стерилізації томатопродуктів;

3. Розроблені моделі нейронмережевих систем автоматичного керування процесами стерилізації томатопродуктів;

4. Проаналізована ефективність та якість регулювання розроблених моделей систем шляхом їх імітаційного моделювання та зроблені висновки щодо принципової придатності нейромережевих алгоритмів керування та системи що реалізує функцію гарантуючого керування температурою стерилізації соку;

5. Розглянуті основні рішення до впровадження на підприємстві розроблених моделей систем автоматичного керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Топчеев Ю.І., Атлас для проектування систем автоматичного регулювання, М.: Машинобудування, 1989. - 752 с
2. Бессекерський В.А., Попов Є.П. Теорія систем автоматичного регулювання [Текст] / М.: Видавництво "Наука", 1972. - 768 с., Стор. 397.
3. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів спеціальностей 7.092501 денної та заочної форми навчання. - Одеса: ОНАХТ, 2002 р.
4. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування» для студентів спеціальностей 7.092501 денної та заочної форми навчання, 1 частина – Одеса: ОНАХТ, 2006 р.
5. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування» для студентів спеціальностей 7.092501 денної та заочної форми навчання, 2 частина – Одеса: ОНАХТ, 2007 р.
6. Копелович А.П. Інженерні методи розрахунку при виборі автоматичних регуляторів [Текст] / М.: Держ.науково-технічне вид-во літератури з чорної та кольорової металургії, 1960 - 190 с.
7. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» – Одеса: ОНАХТ, 2000. – 16 с.
8. Хобін В.А. - Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Теорія автоматичного керування" - Одеса: ОНАХТ, 2000. - 16 с.
9. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту [Текст] / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
10. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
11. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.

12. Усков А.А. Інтелектуальні технології керування (для фахівців у галузі теорії керування, аспірантів та студентів старших курсів технічних університетів) [Текст] / О.О. Усков, А.В. Кузьмін. - М.: Гаряча лінія. Телеком, 2004. - 144 с.
13. Круглов В.В. Нечітка логіка та штучні нейронні мережі [Текст] / Круглов В.В., Длі М.І., Голунов Р.Ю. - М.: Фізматліт, 2001. - 302 с.
14. Архангельський В.І. і др. Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] – К. : техніка, 1999. – 364с.
15. Василець Т. Ю. и др. Синтез нейромережевого регулятора для електромеханічної системи з пружними зв'язками в кінематичних передачах //Системи обробки інформації. – 2018. – №. 2. – С. 7-17.
16. Сергей А. Терехов *Лаборатория Искусственных Нейронных Сетей НТО-2, ВНИИТФ, Снежинск* / [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://b-ok.org/book/530233/94a2fe>, <https://www.twirpx.com/file/600450/>, <https://studfiles.net/preview/986654/>
17. Штучні нейронні мережі [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Штучна_нейронна_мережа
18. Генетичний алгоритм [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Генетичний_алгоритм
19. Нечітка логіка [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Нечітка_логіка
20. Фазифікація [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Фазифікація>
21. Дефазифікація [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Дефазифікація>
22. Система нечіткого виведення [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Система_нечіткого_виведення

Додаток А

Вихідний код конвертованих модулів регулятора та алгоритмів гарантуючого керування.

Вихідний текст модулю БРГЗД.

```
SCL - [BRGZD_R -- RGZ/SIMATIC 300(1)CPU 313C-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

FUNCTION_BLOCK FB770
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    X: REAL;
    Xnp: REAL;
    T: REAL;
    Pt: REAL;
    Gxt: REAL;
    Gxt_i: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Xt: REAL;
END_VAR
VAR
    UD_DSTATE: REAL;
    LookupTablenD_tabl: ARRAY [0..1000] OF REAL;
    LookupTablenD_bp01: ARRAY [0..1000] OF REAL;
    need_init: BOOL := TRUE;
    frac: REAL;
    iRight: DINT;
    iLeft: DINT;
    bpIdx: DINT;
    rtb_Product: REAL;
    rtb_Sum: REAL;
    Sqrt1: REAL;
END_VAR
IF need_init THEN
    LookupTablenD_tabl[0] := 2.866515718791946E-7;
    LookupTablenD_tabl[1] := 3.0189646252084903E-7;
    LookupTablenD_tabl[2] := 3.179213661852819E-7;
    LookupTablenD_tabl[3] := 3.3476450827361839E-7;
    LookupTablenD_tabl[4] := 3.5246589817642519E-7;
    LookupTablenD_tabl[5] := 3.710674079633366E-7;
    LookupTablenD_tabl[6] := 3.9061285431832642E-7;
    LookupTablenD_tabl[7] := 4.11148083843931E-7;
    LookupTablenD_tabl[8] := 4.32721061861702E-7;
    LookupTablenD_tabl[9] := 4.5538196484073189E-7;
    LookupTablenD_tabl[10] := 4.7918327659032045E-7;
    LookupTablenD_tabl[11] := 5.041798883575366E-7;
    LookupTablenD_tabl[12] := 5.3042920297509489E-7;
    LookupTablenD_tabl[13] := 5.5799124320978274E-7;
    LookupTablenD_tabl[14] := 5.8692876446663828E-7;
    LookupTablenD_tabl[15] := 6.1730737200919884E-7;
    LookupTablenD_tabl[16] := 6.491956428613363E-7;
    LookupTablenD_tabl[17] := 6.826652525616643E-7;
    LookupTablenD_tabl[18] := 7.1779110694690021E-7;
    LookupTablenD_tabl[19] := 7.5465147914637377E-7;
    LookupTablenD_tabl[20] := 7.9332815197559734E-7;
    LookupTablenD_tabl[21] := 8.3390656592291234E-7;
    LookupTablenD_tabl[22] := 8.7647597292920517E-7;
    LookupTablenD_tabl[23] := 9.2112959616714359E-7;
    LookupTablenD_tabl[24] := 9.6796479603273579E-7;
    LookupTablenD_tabl[25] := 1.0170832425687061E-6;
    LookupTablenD_tabl[26] := 1.0685910945459359E-6;
    LookupTablenD_tabl[27] := 1.1225991854361736E-6;
    LookupTablenD_tabl[28] := 1.1792232165163983E-6;
    LookupTablenD_tabl[29] := 1.2385839573524714E-6;
    LookupTablenD_tabl[30] := 1.3008074539172811E-6;
    LookupTablenD_tabl[31] := 1.3660252446061406E-6;
    LookupTablenD_tabl[32] := 1.4343745844201367E-6;
    LookupTablenD_tabl[33] := 1.5059986775961571E-6;
    LookupTablenD_tabl[34] := 1.5810469189705114E-6;
    LookupTablenD_tabl[35] := 1.6596751443714621E-6;
    LookupTablenD_tabl[36] := 1.7420458903446622E-6;
    LookupTablenD_tabl[37] := 1.8283286635241654E-6;
    LookupTablenD_tabl[38] := 1.9187002199708997E-6;
    LookupTablenD_tabl[39] := 2.01334485480934E-6;
    LookupTablenD_tabl[40] := 2.1124547025028592E-6;
    LookupTablenD_tabl[41] := 2.2162300481175476E-6;
    LookupTablenD_tabl[42] := 2.3248796499344139E-6;
    LookupTablenD_tabl[43] := 2.4386210737794265E-6;
    LookupTablenD_tabl[44] := 2.5576810394515308E-6;
    LookupTablenD_tabl[45] := 2.6822957796388553E-6;
    LookupTablenD_tabl[46] := 2.8127114117242163E-6;
    LookupTablenD_tabl[47] := 2.9491843228915214E-6;
    LookupTablenD_tabl[48] := 3.091981568956187E-6;
    LookupTablenD_tabl[49] := 3.2413812873533944E-6;
    LookupTablenD_tabl[50] := 3.3976731247300615E-6;
    LookupTablenD_tabl[51] := 3.5611586795975568E-6;
    LookupTablenD_tabl[52] := 3.7321519605144834E-6;
    LookupTablenD_tabl[53] := 3.91097986028071E-6;
    LookupTablenD_tabl[54] := 4.0979826466363635E-6;
    LookupTablenD_tabl[55] := 4.2935144699718707E-6;
    LookupTablenD_tabl[56] := 4.4979438885679361E-6;
    LookupTablenD_tabl[57] := 4.7116544118972468E-6;
    LookupTablenD_tabl[58] := 4.935045062532788E-6;
    LookupTablenD_tabl[59] := 5.1685309572241428E-6;
```

```
SCL - [BRGZD_R -- RGZSIMATIC 300(1)CPU 313C-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

LookupTablenD_tabl[972] := 0.99999882077678346;
LookupTablenD_tabl[973] := 0.99999887740081461;
LookupTablenD_tabl[974] := 0.9999989314089055;
LookupTablenD_tabl[975] := 0.99999898291675748;
LookupTablenD_tabl[976] := 0.999999032035204;
LookupTablenD_tabl[977] := 0.99999907887040385;
LookupTablenD_tabl[978] := 0.99999912352402709;
LookupTablenD_tabl[979] := 0.99999916609343409;
LookupTablenD_tabl[980] := 0.999999206671848;
LookupTablenD_tabl[981] := 0.9999992453485208;
LookupTablenD_tabl[982] := 0.999999282208893;
LookupTablenD_tabl[983] := 0.99999931733474745;
LookupTablenD_tabl[984] := 0.99999935080435709;
LookupTablenD_tabl[985] := 0.999999382692628;
LookupTablenD_tabl[986] := 0.99999941307123552;
LookupTablenD_tabl[987] := 0.99999944200875679;
LookupTablenD_tabl[988] := 0.999999469570797;
LookupTablenD_tabl[989] := 0.99999949582011161;
LookupTablenD_tabl[990] := 0.99999952081672339;
LookupTablenD_tabl[991] := 0.9999995446180352;
LookupTablenD_tabl[992] := 0.99999956727893813;
LookupTablenD_tabl[993] := 0.9999995888519162;
LookupTablenD_tabl[994] := 0.99999960938714572;
LookupTablenD_tabl[995] := 0.99999962893259209;
LookupTablenD_tabl[996] := 0.99999964753410187;
LookupTablenD_tabl[997] := 0.99999966523549177;
LookupTablenD_tabl[998] := 0.9999996820786377;
LookupTablenD_tabl[999] := 0.999999698103575;
LookupTablenD_tabl[1000] := 0.99999971334842808;
LookupTablenD_bp01[0] := -5.0;
LookupTablenD_bp01[1] := -4.99;
LookupTablenD_bp01[2] := -4.98;
LookupTablenD_bp01[3] := -4.97;
LookupTablenD_bp01[4] := -4.96;
LookupTablenD_bp01[5] := -4.95;
LookupTablenD_bp01[6] := -4.94;
LookupTablenD_bp01[7] := -4.93;
LookupTablenD_bp01[8] := -4.92;
LookupTablenD_bp01[9] := -4.91;
LookupTablenD_bp01[10] := -4.9;
LookupTablenD_bp01[11] := -4.89;
LookupTablenD_bp01[12] := -4.88;
LookupTablenD_bp01[13] := -4.87;
LookupTablenD_bp01[14] := -4.86;

LookupTablenD_bp01[970] := 4.7;
LookupTablenD_bp01[971] := 4.71;
LookupTablenD_bp01[972] := 4.72;
LookupTablenD_bp01[973] := 4.73;
LookupTablenD_bp01[974] := 4.74;
LookupTablenD_bp01[975] := 4.75;
LookupTablenD_bp01[976] := 4.76;
LookupTablenD_bp01[977] := 4.77;
LookupTablenD_bp01[978] := 4.78;
LookupTablenD_bp01[979] := 4.79;
LookupTablenD_bp01[980] := 4.8;
LookupTablenD_bp01[981] := 4.81;
LookupTablenD_bp01[982] := 4.82;
LookupTablenD_bp01[983] := 4.83;
LookupTablenD_bp01[984] := 4.84;
LookupTablenD_bp01[985] := 4.85;
LookupTablenD_bp01[986] := 4.86;
LookupTablenD_bp01[987] := 4.87;
LookupTablenD_bp01[988] := 4.88;
LookupTablenD_bp01[989] := 4.89;
LookupTablenD_bp01[990] := 4.9;
LookupTablenD_bp01[991] := 4.91;
LookupTablenD_bp01[992] := 4.92;
LookupTablenD_bp01[993] := 4.93;
LookupTablenD_bp01[994] := 4.94;
LookupTablenD_bp01[995] := 4.95;
LookupTablenD_bp01[996] := 4.96;
LookupTablenD_bp01[997] := 4.97;
LookupTablenD_bp01[998] := 4.98;
LookupTablenD_bp01[999] := 4.99;
LookupTablenD_bp01[1000] := 5.0;
need_init := FALSE;
END_IF;
CASE asMethodType OF
0:
(* InitializeConditions for UnitDelay: '<S2>/UD'
*
* Block description for '<S2>/UD':
*
* Store in Global RAM *)
UD_DSTATE := 0.0;
1:
```

```

SCL - [BRGZD_R - RGZSIMATIC 300(1)CPU 313C-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

1:

(* Sum: '<S1>/Sum' incorporates:
 * Import: '<Root>/X'
 * Import: '<Root>/Xnp' *)
rtb_Sum := Xnp - X;

(* Product: '<S1>/Product' incorporates:
 * Import: '<Root>/Gx'(t)'
 * Sum: '<S2>/Diff'
 * UnitDelay: '<S2>/UD'
 *
 * Block description for '<S2>/Diff':
 *
 * Add in CPU
 *
 * Block description for '<S2>/UD':
 *
 * Store in Global RAM *)
rtb_Product := (rtb_Sum - UD_DSTATE) / Gxt;

(* Sqrt: '<S1>/Sqrt1' incorporates:
 * Constant: '<S1>/Constant4' *)
Sqrt1 := 2.5066282746310002;

(* Lookup_n-D: '<S1>/Lookup Table (n-D)' incorporates:
 * Gain: '<S1>/Gain3' *)
(* Lookup 1-D
Search method: 'binary'
Use previous index: 'off'
Interpolation method: 'Linear'
Extrapolation method: 'Linear'
Use last breakpoint for index at or above upper limit: 'off'
Remove protection against out-of-range input in generated code: 'off' *)
(* Prelookup - Index and Fraction
Index Search method: 'binary'
Extrapolation method: 'Linear'
Use previous index: 'off'
Use last breakpoint for index at or above upper limit: 'off'
Remove protection against out-of-range input in generated code: 'off' *)
IF (-rtb_Product) <= -5.0 THEN
  iLeft := 0;
  frac := ((-rtb_Product) - -5.0) / 0.0099999999999997868;
ELSIF (-rtb_Product) < 5.0 THEN
  (* Binary Search *)
  bpIdx := 500;
  iLeft := 0;
  iRight := 1000;
  WHILE (iRight - iLeft) > 1 DO
    IF (-rtb_Product) < LookupTablenD_bp01[bpIdx] THEN
      iRight := bpIdx;
    ELSE
      iLeft := bpIdx;
    END IF;
    bpIdx := DWORD_TO_DINT(SHR(IN:=DINT_TO_DWORD(iRight + iLeft), N:=1));
  END WHILE;
  frac := ((-rtb_Product) - LookupTablenD_bp01[iLeft]) / (LookupTablenD_bp01[iLeft + 1] - LookupTablenD_bp01[iLeft]);
ELSE
  iLeft := 999;
  frac := ((-rtb_Product) - 4.99) / 0.0099999999999997868;
END IF;
(* Interpolation 1-D
Interpolation method: 'Linear'
Use last breakpoint for index at or above upper limit: 'off'
Overflow mode: 'wrapping' *)

(* Product: '<S1>/Product3' incorporates:
 * Constant: '<S1>/Constant4'
 * Gain: '<S1>/Gain'
 * Gain: '<S1>/Gain2'
 * Import: '<Root>/Gx'(t)'
 * Import: '<Root>/Gx'(t)'
 * Import: '<Root>/Pt'
 * Import: '<Root>/T'
 * Lookup_n-D: '<S1>/Lookup Table (n-D)'
 * Math: '<S1>/Math Function'
 * Math: '<S1>/Math Function2'
 * Math: '<S1>/Math Function3'
 * Product: '<S1>/Product1'
 * Product: '<S1>/Product2'
 * Product: '<S1>/Product4'
 * Sum: '<S1>/Sum1'
 *
 * About '<S1>/Math Function':
 * Operator: log

```

```

SCL - [BRGZD_R - RGZSIMATIC 300(1)CPU 313C-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

(* Operator: log
 *
 * About '<S1>/Math Function2':
 * Operator: exp *)
rtb_Product := ((((((LookupTablenD_tabl[iLeft + 1] - LookupTablenD_tabl[iLeft]) * frac) + LookupTablenD_tabl[iLeft]) *
Sqrt1) * rtb_Product) + EXP((rtb_Product * rtb_Product) * -0.5)) * (1.0 / (LN(Pt) * 6.2831853071795862))) * (
(Gxt * (-T)) / Gxt_i);

(* Switch: '<S1>/Switch' incorporates:
 * Constant: '<S1>/Constant5' *)
IF NOT (rtb_Product >= 1.0) THEN
    rtb_Product := 1.0;
END IF;
(* End of Switch: '<S1>/Switch' *)

(* Math: '<S1>/Math Function4'
 *
 * About '<S1>/Math Function4':
 * Operator: log *)
rtb_Product := LN(rtb_Product);

(* Gain: '<S1>/Gain1' *)
rtb_Product := 2.0 * rtb_Product;

(* Sqrt: '<S1>/Sqrt' *)
rtb_Product := SQRT(rtb_Product);

(* Sum: '<S1>/Sum2' incorporates:
 * Inport: '<Root>/Gx(t)'
 * Inport: '<Root>/Xnp'
 * Product: '<S1>/Product5' *)
rtb_Product := (rtb_Product * Gxt_i) + Xnp;

(* Saturate: '<S1>/Saturation2' *)
IF rtb_Product >= 120.0 THEN
    (* Output: '<Root>/Xn(t)' *)
    Xt := 120.0;
ELSIF rtb_Product > -20.0 THEN
    (* Output: '<Root>/Xn(t)' *)
    Xt := rtb_Product;
ELSE
    (* Output: '<Root>/Xn(t)' *)
    Xt := -20.0;
END IF;

(* End of Saturate: '<S1>/Saturation2' *)

(* Update for UnitDelay: '<S2>/UD'
 *
 * Block description for '<S2>/UD':
 *
 * Store in Global RAM *)
UD_DSTATE := rtb_Sum;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Вихідний текст модулю БРСО.

```

SCL - [BRSO_R - RGZSIMATIC 300(1)CPU 313C-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

FUNCTION_BLOCK FB771
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    dX: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Gdx: REAL;
    Gx: REAL;
END_VAR
VAR
    c_DiscreteTimeIntegr: REAL;
    d_DiscreteTimeIntegr: REAL;
    e_DiscreteTimeIntegr: REAL;
    f_DiscreteTimeIntegr: REAL;
    UD_DSTATE: REAL;
    rtb_Sum: REAL;
    rtb_TSamp: REAL;
    rtb_Sum4: REAL;
    rtb_Sum1: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:
        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2' *)
        c_DiscreteTimeIntegr := 0.010000000000000002;

        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator3' *)
        d_DiscreteTimeIntegr := 0.00062500000000000012;

        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator' *)
        e_DiscreteTimeIntegr := 0.0;

        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator1' *)
        f_DiscreteTimeIntegr := 0.0;

        (* InitializeConditions for UnitDelay: '<S2>/UD'
        *
        * Block description for '<S2>/UD':
        *
        * Store in Global RAM *)
        UD_DSTATE := 0.0;
    1:
        (* SampleTimeMath: '<S2>/TSamp' incorporates:

```

```

SCL - [BRSO_R -- RGZSIMATIC 300(1)CPU 313C-2 DP]
File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

(* About '<S2>/TSamp':
 * y = u * K where K = 1 / ( w * Ts ) *)
rtb_TSamp := dX * 4.0;

(* Sum: '<S2>/Diff' incorporates:
 * UnitDelay: '<S2>/UD'
 *
 * Block description for '<S2>/Diff':
 *
 * Add in CPU
 *
 * Block description for '<S2>/UD':
 *
 * Store in Global RAM *)
rtb_Sum1 := rtb_TSamp - UD_DSTATE;

(* Sum: '<S1>/Sum4' incorporates:
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator' *)
rtb_Sum4 := rtb_Sum1 - e_DiscreteTimeIntegr;

(* Sum: '<S1>/Sum' incorporates:
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator1'
 * Input: '<Root>/dX' *)
rtb_Sum := dX - f_DiscreteTimeIntegr;

(* Sum: '<S1>/Sum1' incorporates:
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator' *)
rtb_Sum1 := rtb_Sum1 - e_DiscreteTimeIntegr;

(* Output: '<Root>/Gdx' incorporates:
 * Abs: '<S1>/Abs2'
 * Constant: '<S1>/Constant'
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator3'
 * Sqrt: '<S1>/Sqrt'
 * Sum: '<S1>/Sum3' *)
Gdx := Sqrt(Abs(d_DiscreteTimeIntegr)) + 0.01;

(* Output: '<Root>/Gx' incorporates:
 * Abs: '<S1>/Abs1'
 * Constant: '<S1>/Constant'
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2'
 * Sqrt: '<S1>/Sqrt1'
 * Sum: '<S1>/Sum2' *)
Gx := 0.01 + Sqrt(Abs(c_DiscreteTimeIntegr));

(* Output: '<Root>/Gx' incorporates:
 * Abs: '<S1>/Abs1'
 * Constant: '<S1>/Constant'
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2'
 * Sqrt: '<S1>/Sqrt1'
 * Sum: '<S1>/Sum2' *)
Gx := 0.01 + Sqrt(Abs(c_DiscreteTimeIntegr));

(* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2' incorporates:
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2'
 * Gain: '<S1>/Gain2'
 * Math: '<S1>/Math Function'
 * Sum: '<S1>/Sum6' *)
c_DiscreteTimeIntegr := (((rtb_Sum * rtb_Sum) - c_DiscreteTimeIntegr) * 0.02) * 0.25 + c_DiscreteTimeIntegr;

(* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator3' incorporates:
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator3'
 * Gain: '<S1>/Gain3'
 * Math: '<S1>/Math Function1'
 * Sum: '<S1>/Sum7' *)
d_DiscreteTimeIntegr := (((rtb_Sum1 * rtb_Sum1) - d_DiscreteTimeIntegr) * 0.02) * 0.25 + d_DiscreteTimeIntegr;

(* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator' incorporates:
 * Gain: '<S1>/Gain' *)
e_DiscreteTimeIntegr := ((0.2 * rtb_Sum4) * 0.25) + e_DiscreteTimeIntegr;

(* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator1' incorporates:
 * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator1'
 * Gain: '<S1>/Gain1'
 * Input: '<Root>/dX'
 * Sum: '<S1>/Sum5' *)
f_DiscreteTimeIntegr := ((dX - f_DiscreteTimeIntegr) * 0.2) * 0.25 + f_DiscreteTimeIntegr;

(* Update for UnitDelay: '<S2>/UD'
 *
 * Block description for '<S2>/UD':
 *
 * Store in Global RAM *)
UD_DSTATE := rtb_TSamp;

END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Вихідний текст модулю ПІД регулятора..

```
SCL - [PID_R - RGZASIMATIC 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:
         *   Input: '<Root>/PV'
         *   Input: '<Root>/SP' *)
        rtb_Add2 := SP - PV;

        (* Product: '<S1>/Product' incorporates:
         *   Input: '<Root>/k_P' *)
        rtb_Product := rtb_Add2 * k_P;

        (* Product: '<S1>/Product3' incorporates:
         *   DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter'
         *   Input: '<Root>/k_D'
         *   Input: '<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 Input: '<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
```