

Міністерство освіти і науки України

Одеський національний технологічний університет

Кафедра Автоматизації технологічних електромеханічних і робототехнічних систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему: «Підвищення ефективності автоматичного керування процесу
охолодження технологічної води »

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) Кононов Б.С.
(прізвище, ініціали)
_____ курсу _____ групи

Керівник доцент Левінський В.М.
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти:
доц. каф. АТПіРС Світий І.М.
(посада, прізвище та ініціали)
доц. каф. АТПіРС Левінський В.М.
(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від «___» _____ 20__ р., протокол № ____

В.о. завідувача кафедри АТЕіРС _____ О.М. Жигайло
Підпис (ПБ)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	<u>Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування</u> .
Кафедра	<u>ім. П.М. Платонова</u> .
Ступінь вищої освіти	<u>Автоматизації технологічних електромеханічних і</u> .
Спеціальність	<u>робототехнічних систем</u> .
	<u>Магістр</u> .
	<u>174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології</u> .
	<u>та робототехніка</u> .
Освітньо-наукова програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в</u> . автоматизації
	<u>та робототехніці</u> .

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. зав. кафедри АТЕіРС

О.М. Жигайло

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач Кононов Богдан Сергійович

- Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом охолодження технологічної води»
- Керівник кваліфікаційної роботи Левінський Валерій Михайлович, к.т.н., доцент
Пункти 1 і 2 затверджені наказом ОНТУ № _____ від _____ р.
- Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи на кафедру «12» червня 2026 р.
- Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: матеріали виконаних індивідуальних завдань (ІЗ) виробничої практики, кваліфікаційної роботи бакалавра, дослідницької практики, курсових та самостійних робіт, виконаних відповідно до ІЗ.
- Зміст кваліфікаційної роботи (розділи, які потрібно розробити):
Вступ
Розділ 1. Технологічний процес охолодження технологічної води, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування
Розділ 2. Удосконалення САР на основі цілеспрямованого удосконалення її структури, висновки за розділом)
Розділ 3. Удосконалення САР на основі застосування штучних нейронних мереж (обґрунтування доцільності САР і ШНМ, розробка структури її нейрорегуляторів (НР); навчання ШНМ НР; висновки за розділом)
Розділ 4. Удосконалення САР на основі розширення складу функцій управління (актуальність включення до САР нових функцій: оптимізації, гарантування, активного або пасивного самоналаштування, розробка и моделювання САК, підтвердження ефективності її застосування, висновки за розділом).
Розділ 5. Реалізація алгоритмів керування розробленої САК на контролері, їх тестування та підготовка до впровадження (на підприємстві, де проходила практика, вказати)
Додатки (допоміжні матеріали, ксерокопії програм конференцій, статей, патентів).
- Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Назва розділу	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Удосконалення САР на основі розширення штучних нейронних мереж	Гурський О.О. к.т.н. доцент каф. АТЕіРС		
Удосконалення САР на основі розширення складу функцій управління	Жигайло О.М. к.т.н. доцент каф. АТЕіРС		
Удосконалення САР на основі цілеспрямованого удосконалення її структури	Степанов М.Т. к.т.н. доцент каф. АТЕіРС		

7. Дата видачі завдання «18» березня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Строк виконання етапів роботи	Прмітка
Вступ та загальна характеристика роботи	«24» березня 2026 р.	
Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування	«27» березня 2026 р.	
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП	«06» квітня 2026 р.	
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	«17» квітня 2026 р.	
Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	«20» травня 2026 р.	
Реалізація та підготовка до впровадження результатів роботи	«29» травня 2026 р.	
Оформлення додатків та роботи в цілому	«01» червня 2026 р.	
Здача роботи на перевірку керівникові, виправлення зауважень, підпис керівника	«05» червня 2026 р.	
Брошування роботи, представлення її завідувачу кафедри, підпис, направлення роботи на зовнішнє рецензування та захист у ЕК	«12» червня 2026 р.	

Здобувач Кононов Б.С. _____
ПІБ Підпис, дата

Керівник роботи Левінський В.М. _____
ПІБ Підпис, дата

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 Кононов Б.С. _____
Прізвище, ініціали Підпис

АНОТАЦІЯ

Кононов Б.С. «Підвищення ефективності автоматичного керування системою охолодження технологічної води».

Випускна робота магістра. – Одеса: ОНТУ, 2026. –184 с. Бібліогр.: 21. Іл.:139. Табл.: 22 .

У роботі розглянуто задачу підвищення ефективності автоматичного керування процесом охолодження технологічної води шляхом удосконалення структури та алгоритмів системи керування холодильним агрегатом.

Виконано аналіз технологічного процесу та існуючої системи автоматичного керування, проведено параметризацію об'єкта керування та розроблено його математичні моделі. На основі отриманих моделей досліджено характеристики базової системи та визначено основні напрями її вдосконалення.

Розроблено систему автоматичного регулювання підвищеної динамічної точності, виконано її структурний та параметричний синтез. Досліджено можливість застосування сучасних інтелектуальних методів керування. Для цього **розроблено моделі систем керування з нечіткими регуляторами та нейрорегуляторами**, проведено навчання штучних нейронних мереж і виконано порівняльний аналіз ефективності їх використання.

Для підвищення енергоефективності холодильного агрегату запропоновано систему автоматичної оптимізації режимів роботи, що забезпечує вибір раціонального значення температури гліколю та підтримання режиму з високим коефіцієнтом енергетичної ефективності.

Розроблено програмне забезпечення для реалізації запропонованих алгоритмів керування на базі промислового контролера Siemens, проведено його тестування та оцінено можливість практичного впровадження.

Отримані результати підтверджують можливість підвищення якості регулювання, покращення динамічних характеристик системи та зниження енергетичних витрат під час експлуатації систем охолодження технологічної води.

Ключові слова: система автоматичного керування, охолодження технологічної води, холодильний агрегат, ПІД-регулятор, нечіткий регулятор, нейрорегулятор, штучна нейронна мережа, енергоефективність, оптимізація.

ЗМІСТ

Стор.

Перелік умовних позначень, символів і одиниць.....	8
Вступ.....	9
Розділ 1 Технологічний процес керування холодильною установкою промислового підприємства і підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.....	10
1.1 Короткий опис технологічного процесу холодильною установкою промислового підприємства та основного обладнання.....	10
1.2 Аналіз впливу режимів ведення ТП і роботи обладнання на його технікоекономічні показники, аналіз відповідних регламентів і наслідків їх порушення.....	16
1.3 Аналіз існуючого рівня автоматизації ділянки ТП	18
1.4 Комплекс математичних моделей технологічного процесу керування холодильною установкою промислового підприємства	20
1.5 Типові структури і алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, результати їх параметричної оптимізації і перевірка на робастність (грубість).....	35
1.6 Недоліки відомих САУ ТП керування холодильною установкою промислового підприємства, обґрунтування напрямів удосконалення САУ як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу.....	50
1.7 Висновки за розділом.....	52
Розділ 2 удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП холодження технологічної води	53
2.1 Структурний синтез САК підвищеної динамічної точності.....	53
2.2 Оптимальний параметричний синтез САК підвищеної динамічної	

точності і аналіз результатів синтезу.....	56
2.3 Висновки за розділом.....	60
Розділ 3. Вдосконалення алгоритмів, які реалізують функції регулювання системою автоматичного керування технологічного процесу охолодження технологічної води, на основі використання штучних нейронних мереж.....	61
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління, побудованих на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого об'єкта керування.....	61
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійною статичною характеристикою.....	62
3.3 Параметричний синтез САУ з традиційним ПІД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	64
3.4 Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	69
3.5 Порівняльний аналіз функціонування САУ з традиційним ПІД регулятором і САУ з нечітким регулятором.....	78
3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління.....	86
3.7 Розробка моделі САУ з нейрорегулятором.....	88
3.8 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором.....	102
3.9 Аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання за умов впливів,що збурюють.....	107
3.10 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.....	110
3.11 Висновки за розділом.....	115

Розділ 4 Розробка та дослідження сак процесу охолодження технологічної води , що реалізує функцію мінімізації енерговитрат при гарантуванні дотримання обмежень.....	117
4.1 Обґрунтування актуальності додаткової функції САК для підвищення енергоефективності.....	117
4.2 Обґрунтування вибору критерію оптимальності та принципу його формування	118
4.3 Розробка схеми імітаційного моделювання САК і плану комп'ютерних експериментів з дослідження її ефективності, подання і аналіз результатів моделювання.....	120
4.4 Реалізація та дослідження САО процесу охолодження води	123
4.5 Висновки за розділом.....	136
Розділ 5. Реалізація і підготовка до впровадження результатів на підприємстві.....	141
5.1. Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом охолодження технологічної води і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.....	138
5.2. Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів управління.....	147
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	155
5.4. Висновки за розділом.....	156
Висновки	157
Список використаної літератури.....	159
Додаток А.....	161
Додаток Б.....	177

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

АК – алгоритм керування;

ВМ - виконавчий механізм;

ОК – об'єкт керування;

ОР – об'єкт регулювання;

ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом;

РО – регулюючий орган;

САК – система автоматичного керування;

САР – система автоматичного регулювання;

СКЗ – спрощений коригуючий зв'язок;

ТП - технологічний процес;

МОНЧ – модуль оцінки частоти порушень;

МОВХ – модуль оцінки ймовірносних характеристик; МРДНЧ

– модуль розрахунку допустимої частоти порушень;

СГК – система гарантуючого керування.

ОПС – оптимальний параметричний синтез;

ЗНВ – зона незначимих відхилень;

ПЛК – програмований логічний контролер;

ПК – персональний комп'ютер;

ОхВ-технологічна вода і

т.і.

ВСТУП

В умовах сучасного промислового виробництва важливого значення набуває підвищення ефективності технологічних процесів шляхом удосконалення систем автоматичного керування. Одним із найбільш енергоємних допоміжних процесів на багатьох підприємствах є охолодження технологічної води, від якого залежать стабільність роботи обладнання, якість продукції та енергетичні витрати виробництва.

Традиційні системи автоматичного керування холодильними установками, побудовані на основі ПІ- та ПІД-регуляторів, не завжди забезпечують необхідну якість регулювання в умовах нелінійності об'єкта, змінних навантажень та дії випадкових збурень. Тому актуальним є застосування сучасних методів автоматичного керування, зокрема нечіткої логіки, штучних нейронних мереж та алгоритмів автоматичної оптимізації режимів роботи обладнання.

Об'єктом дослідження є процес охолодження технологічної води.

Предметом дослідження є алгоритми та структури систем автоматичного керування процесом охолодження технологічної води.

Метою роботи є підвищення ефективності автоматичного керування процесом охолодження технологічної води шляхом удосконалення структури та алгоритмів системи керування, а також впровадження інтелектуальних методів управління.

Для досягнення поставленої мети в роботі виконано аналіз технологічного процесу та існуючої системи керування, розроблено математичні моделі об'єкта, проведено синтез системи регулювання підвищеної динамічної точності, досліджено можливості застосування нечітких та нейромережевих регуляторів, а також розроблено систему автоматичної оптимізації режимів роботи холодильної установки.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розроблених алгоритмів для модернізації існуючих систем охолодження технологічної води з метою підвищення якості керування та зниження енергетичних витрат.

РОЗДІЛ 1 Технологічний процес керування холодильною установкою промислового підприємства і підвищення його ефективності засобами автоматичного керування

1.1 Опис технологічного процесу охолодження технологічної води – розгорнута схема ТП для вибраної ділянки автоматизації

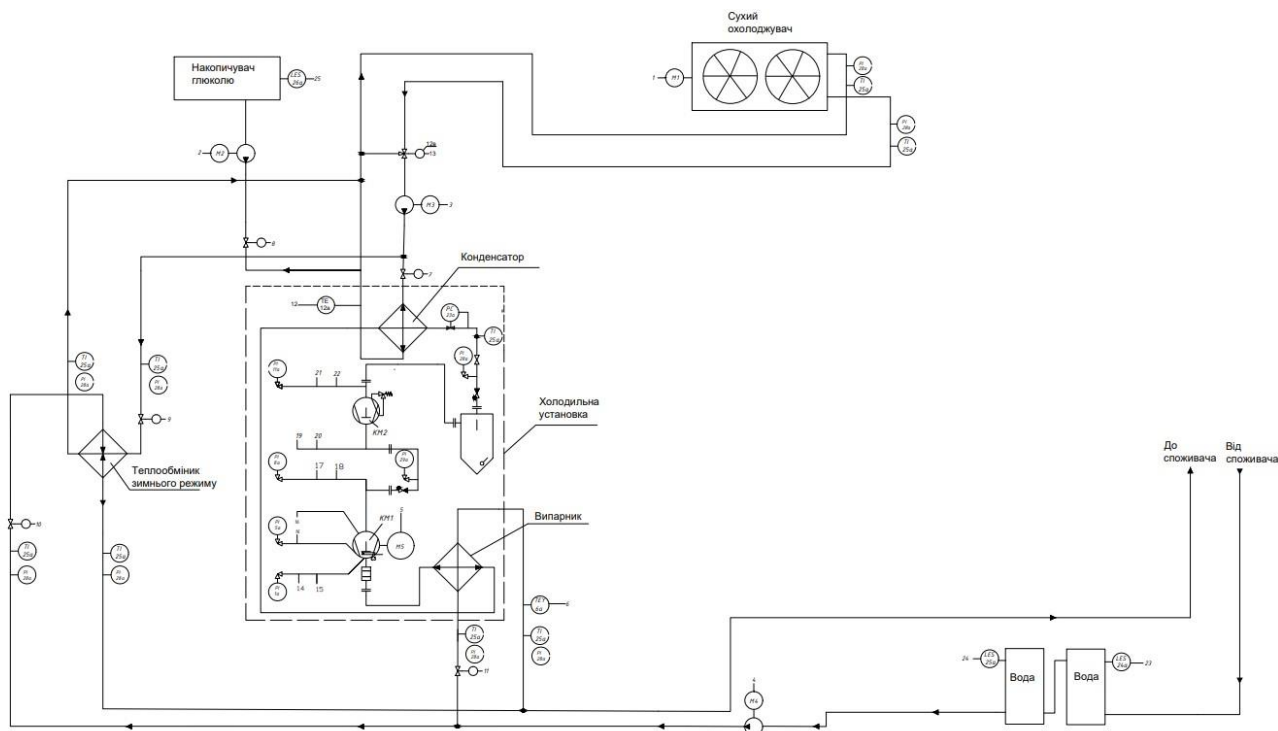


Рис. 1.1–Схема процесу охолодження технологічної води

Гаряча вода від споживача з температурою 12 градусів приходить на буферні накопичувачі, потім на випарник чиллера, який охолоджує її за допомогою випаровування фреону, який кипить у випарнику при температурі -35°C , тим самим охолоджуючи воду для споживача до 7°C . Холодопродуктивність холодильної машини, і, як наслідок, температура води регулюється шляхом зміни обертів двигуна М5 компресорної станції. Після охолодження води випаруваний холодоагент стискається двоступеневим поршневим компресором КМ1 та КМ2, а стислі пари хладагенту надходять до конденсатора, що охолоджується гліколем із температурою 40 градусів, об'єм гліколю дроселюється регулювальним органом в потрібних пропорціях для підтримання на виході конденсатора холодильної машини температури

гліколю в 45 градусів. Сам гліколь, надалі, охолоджується в сухих охолоджувачах на даху цеху.

Також у системі передбачено зимовий режим роботи, де вода безпосередньо охолоджується гліколем через теплообмінник. Залежно від температури навколишнього середовища система холодопостачання може працювати в режимі роботи чилера або в режимі "вільного охолодження".

У разі зниження температури зовнішнього повітря нижче 1,5° С, система холодопостачання автоматично перемикається в режим "вільного охолодження". Під час роботи в цьому режимі джерелом "холоду" служить навколишнє середовище.

При підвищенні температури зовнішнього повітря до 1,8° С, система автоматично перемикається в режим роботи чилера.

Опис конструкції ТА, яка може бути об'єднана або розподілена на декілька частин, а також особливості його експлуатації;

Чилер - блокова холодильна установка, що виконує роль генератора холоду.

Основні компоненти чилера:

- компресор забезпечує циркуляцію холодоагенту в охолоджувальному контурі. Стискає пари холодоагенту, що надходять з випарника, які потім охолоджуються і конденсуються в конденсаторі;
- конденсатор кожухотрубний теплообмінний апарат, у якому відбувається фазовий перехід холодоагенту з газоподібного стану в рідкий. Тепло, яке холодоагент отримує у випарнику і компресорі, передається розчину етиленгліколю, що протікає трубами, а пари холодоагенту, які циркулюють через кожух, конденсуються в рідину;
- фільтр-осушувач видаляє з холодоагенту вологу, завдяки чому не відбувається закупорка льодом розширювального клапана. Ступінь вологості холодоагенту контролюється індикатором вологості (6, рисунок 2);

- рідкий холодоагент, що виходить із конденсатора , надходить у випарник розширювальний клапан . Тиск холодоагенту в розширювальному клапані змінюється, і рідкий холодоагент надходить у випарник.
- випарник - кожухотрубний теплообмінний апарат, у якому рідкий фреон кипить у трубах, поглинаючи тепло з ОхВ нагрітої після споживачів холоду, що протікає через кожух випарника.

Триходовий клапан підтримує необхідну, задану температуру розчину етиленгліколю після сухих охолоджувачів за різних режимів роботи системи холодопостачання. Для кожного контуру циркуляції розчину етиленгліколю, контур А і контур Б, встановлений окремий регулювальний триходовий клапан

Циркуляційний насос гліколевого контуру забезпечує циркуляцію розчину етиленгліколю між конденсатором чиллера і сухими охолоджувачами під час роботи чиллера та між пластинчастим теплообмінником і сухими охолоджувачами під час роботи системи холодопостачання в режимі "вільного охолодження".

Циркуляційний насос ОхВ забезпечує циркуляцію ОхВ через випарник чиллера і розподільник ОхВ під час роботи чиллера і циркуляцію ОхВ через пластинчастий теплообмінник і розподільник ОхВ під час роботи системи холодопостачання в режимі "вільного охолодження". Контроль роботи циркуляційного насоса ОхВ здійснюється за допомогою манометра - тиск до насоса і манометра - тиск після насоса .

У розподільник надходить ОхВ після чилера або пластинчастого теплообмінника , залежно від режиму роботи системи холодопостачання, і лунає до споживачів холоду за допомогою насосів

У збірник ВхВ надходить отеплена ВхВ після споживачів холоду і надходить для охолодження в чиллер або в пластинчастий теплообмінник, залежно від режиму роботи системи холодопостачання.

Під час роботи системи холодопостачання в режимі "вільного охолодження" в пластинчастому теплообміннику холодний розчин етиленгліколю охолоджує теплоту після споживачів холоду ОхВ

Зрівняльний бак - теплоізована сталева ємність, служить для створення запасу ОхВ і згладжування піків теплового навантаження на систему холодопостачання під час роботи регулювальних пристроїв споживачів холоду. У контурі ОхВ передбачено два зрівняльні баки.

Автомат підживлення контуру ОхВ слугує для підтримання тиску в контурі ОхВ, забезпечує деаерацію контуру ОхВ і за потреби додає пом'якшену воду в контур ОхВ.

Вузол підживлення розчину етиленгліколю розчином етиленгліколю слугує для автоматичного підтримання робочого тиску розчину етиленгліколю в контурі А та в контурі Б під час різних режимів роботи системи холодопостачання і працює в автоматичному режимі.

Параметризація схеми технологічного процесу і загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.

Технологічний процес охолодження води є тепловим процесом, пов'язаним з Передачею тепла. Важливою умовою нормального функціонування технологічного

процесу є постійна підтримка заданої температури. Проведемо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на рис. 1.2

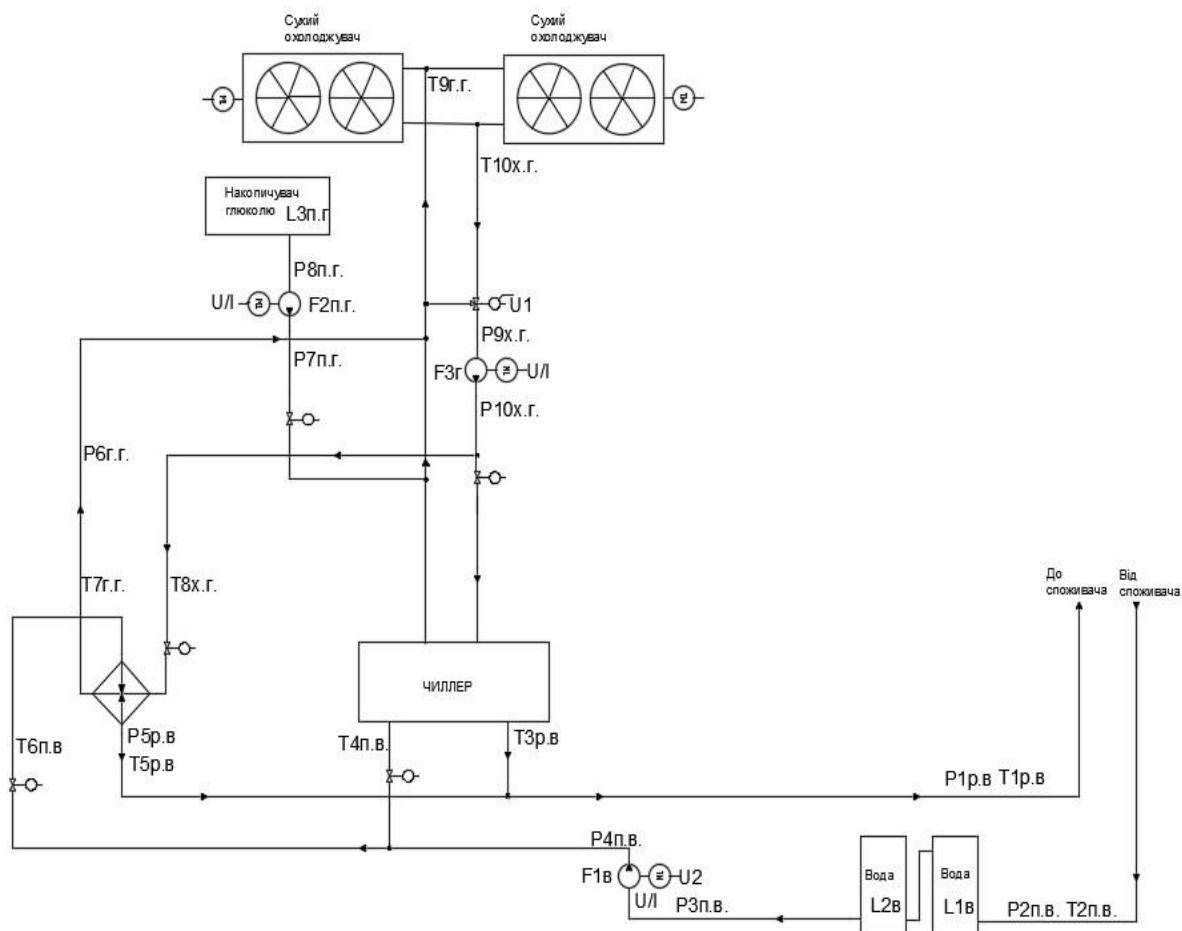


рис. 1.2– параметризована схема

$F_{п.в}$, $T_{п.в}$, $P_{п.в}$ – витрати, температури і тиск води від споживача;

$F_{р.в}$, $T_{р.в}$, $P_{р.в}$ – витрати, температури і тиск води до споживача;

$F_{х.г}$, $T_{х.г}$, $P_{х.г}$ – витрати, температури і тиск «холодного» гліколю;

$F_{г.г}$, $T_{г.г}$, $P_{г.г}$ – витрати, температури і тиск «гарячого» гліколю;

$P_{п.г}$, $F_{п.г}$ – тиск та витрати подпитки гліколя;

Q_T – теплопередача теплообмінника;

U , I - параметри двигунів електроприводу (ПЕД) насосів.

$L1в$, $L2в$ - рівень у проміжних баках з водою

Конкретизація регламентів і умов ведення процесу, його формалізоване представлення, первинний аналіз ТП та ТА

Виявлення нормативів ведення технологічного процесу і роботи технологічного агрегату.

У результаті декомпозиції загальної задачі виробництва одержуємо, що на рівні окремих одиниць технологічного устаткування повинні виконуватися технологічні, експлуатаційні, і техніко-економічні регламенти.

А уже виходячи з цього задачі керування можна визначити як задачі регулювання, тобто забезпечення вимог регламенту.

Виявлення параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та експлуатації технологічного агрегату.

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

Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. До цієї групи параметрів віднесемо: $F_{рв}$ – витрати води ; $T_{рв}$ – температура води ; $P_{рв}$ - тиск води .

Енергетичні параметри характеризують енергію, яка підводиться до технологічного устаткування ззовні і витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів віднесемо: F_p , T_p , P_p – витрати, температура і тиск гюоколю; U , I – напруга і струм живлення двигунів електроприводу.

Механічні параметри технологічного обладнання характеризують стан його робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо: Q_t – теплопередача теплообмінника.

Формалізація параметризованої схеми технологічного процесу і одержання його параметричної схеми.

Формалізація опису взаємозв'язків між параметрами ТП досягається за рахунок переходу від параметризованої до параметричної схеми ТП. При цьому ті параметри, які відображають цілі функціонування об'єкта

моделювання та додаткові вимоги до нього, тобто ті параметри, які регламентовані, будуть вихідними, а параметри, що відбивають умови функціонування об'єкта - вхідними.

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

При відхиленні параметрів процесу охолодження води від регламентованих значень, обумовлених зміною параметрів, що характеризують умови ведення процесу, навіть при досить ефективному керуванні ним, можуть перевищувати припустимі значення. Однак при виході за допуски технологічних регламентів технологічний процес не зупиняється, а вихід за допуски ліквідується із часом. Наслідком виходу технологічних параметрів за допуски є нестабільність температури води. Допуски на відхилення поточних значень регламентованих параметрів діляться на тривалі та короточасні. Припустимі відхилення визначають зону незначних відхилень, середнє значення параметру якої можна вважати близьким до нормативного, тому ці відхилення не ліквідують. Короточасні припустимі відхилення параметрів перевищують зону незначних відхилень і призводять до зниження ефективності процесу, тому вони припустимі тільки протягом обмеженого часу, що задається й входить у регламент. Вихід параметрів за зону короточасно припустимих відхилень свідчить про відхилення технологічного процесу або експлуатації обладнання, що можуть призвести до аварії. Для аналізу нормативів ведення процесу охолодження води складемо таблицю регламентів. (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

№ п/п	Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Номінальні значення	Допустимі відхилення від номіналу		
					Довготривалі	Короткочасні	
					Величина	Величина	Час
1	Температура гліколю на виході чиллера	Тгл.	°С	45	±0,5	±2	100 с
2	Температура води на виході чиллера	Твод	°С	7	±0,2	±1	200 с

Виявлення параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та експлуатації технологічного агрегату. Поточні значення нормативних параметрів завжди відрізняються від номінальних (і можуть виходити за межі допусків) внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються певними параметрами можуть бути (для зручності) згруповані за деякими ознаками. Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. До цієї групи параметрів віднесемо параметри сировини: P2п.в T2п.в.

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного встаткування ззовні й витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів віднесемо: P10х.г. T10х.г. T10г.г

Механічні (або інші специфічні) параметри технологічного обладнання характеризують стан їх робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо: U1, U2.

Формалізація параметризованої схеми технологічного процесу і отримання його параметричної схеми.

Параметризована схема ТП має змістовний характер. Формалізація опису взаємозв'язків між параметрами ТП досягається за рахунок переходу до формалізованої параметричної схеми ТП. При цьому ті параметри, які відображають цілі функціонування об'єкта моделювання та додаткових вимог до нього, тобто регламентовані параметри будуть вихідними, а параметри, що відображають умови функціонування об'єкта вхідними. Зв'язок між вхідними і вихідними параметрами – причинно-наслідковий. У рамках даної схеми ці зв'язки задаються тільки на якісному рівні, згодом деякими зв'язками можна буде знехтувати, деякі уявити опосередковано. Параметрична схема процесу охолодження води наведена на рис. 1.3.

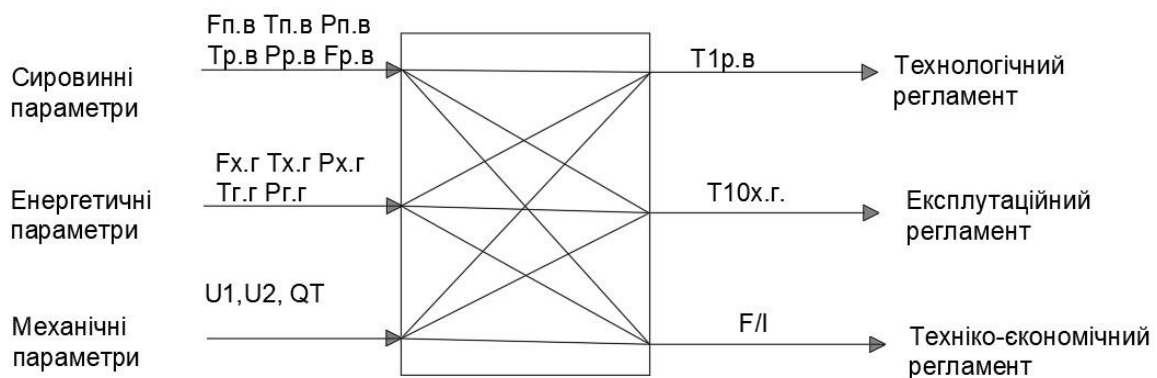


Рис. 1.3–Параметрична схема процесу охолодження води

1.3 Аналіз існуючого рівня автоматизації ділянки ТП

Датчик температури 4-20мА -2 шт.

Занурювальний датчик-реле рівня – 2 шт. (в резервуарі накопичувачі води)

Ультразвуковий датчик-реле рівня – 1 шт. (в кришці резервуара з гліколем

Реле тиску- 4 шт (перед та після 1 і 2 ступені компресора)

Термореле- 4 шт (перед та після 1 і 2 ступені компресора)

Диферинційне реле тиску мастила 1 шт (на першій ступені компресора КМ1)

Відсічні клапани 24В – 5 шт.

засоби безпосереднього впливу на процес

Регулюючий клапан Belimo 2-10B (на трубопроводі холодного гліколю) та блок ручного управління БРУ-7 на щиті. Частотний перетворювач (в щиті)

засоби обробки інформації і формування керуючих дій Контроллер Siemens S7-1500 (в щиті) **засоби представлення інформації технологічному персоналу і оператору процесу**

Система візуалізації Siemens TP1900 Comfort HMI Panel 12,1" (на щиті)

умови при яких можливий технологічний пуск, зупинка , аварійна зупинка та умови при яких необхідно блокувати предаварійну ситуацію.

Умови пуску ділянки: наявність води в проміжних накопичувачах та гліколю в накопичувачі гліколю.

Умови зупинки: ---

Умови аварійного останова : якщо спрацював будь-який захисний датчик реле компресорної установки або датчик-реле рівня.

Аналіз впливу функцій керування технологічним процесом на технікоекономічні та екологічні показники. Конкретизація економічної та інших цілей модернізації САК варіанти:

Зменшення енергоспоживання за рахунок оптимального режиму пуску і зупинки обладнання на 2%

Зменшення браку продукції на 5% за рахунок внерення другого контуру регулювання в чиллер холодильної установки

Зменшення часу, який необхідний для виходу холодильної установки на режим, за рахунок оптимального пуску, зупинки та впровадження 2 контуру регулювання.

Завдяки скороченню часу виходу холодильної установки на режим, та впровадженню другого контуру регулювання ми домоглися зменшення часу, необхідного для запуску обладнання виробництва таблеток. Що допомогло нам заощадити 5% прибутку.

1.4 Комплекс математичних моделей технологічного процесу керування холодильною установкою промислового підприємства

Для процесу охолодження води в якості регульованої координати доцільно обрати температуру гліколю на виході з теплообмінника ($T_{гл}$) та температуру води на виході з чиллера ($T_{вод}$). В якості регульованої координати доцільно віднести регулюючий клапан та обороти компресора чиллера. Які є регулюючими органами, що регулюють подачу гліколю та холодопродуктивність. Позначені вони як $U1$ та $U2$.

У процесі класифікації збурень не було виявлено таких, які доцільно віднести до контрольованих. Тому всі збурення було зведено до двох векторів неконтрольованих збурень $f1$ та $f2$

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

охолодження води наведена на рис. 1.4

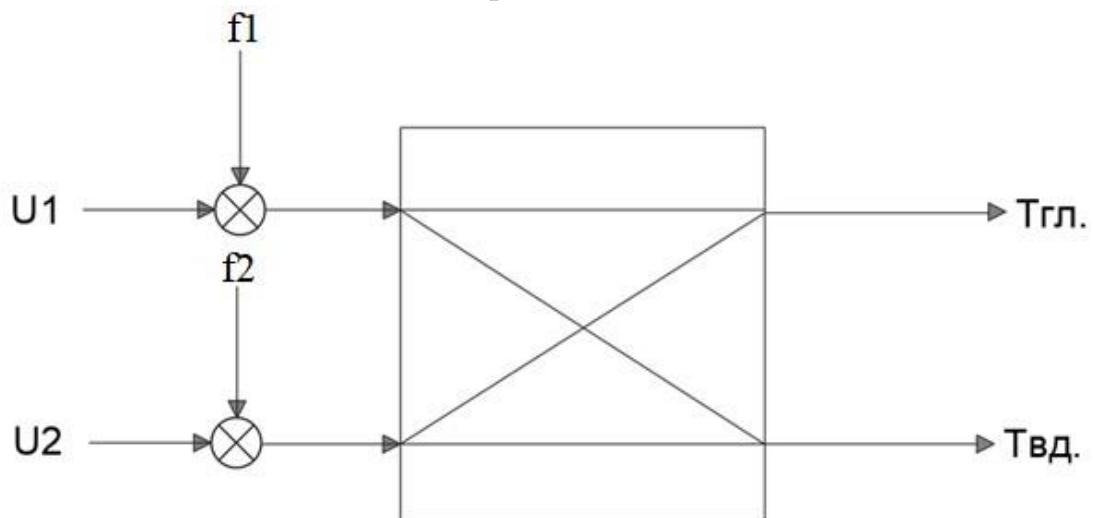


Рис. 1.4 – Структурна схема процесу охолодження води як об'єкту регулювання
 $U1$ - змінення положення регулюючого клапана який змінює витрати гліколю
 $U2$ – змінення частота обертів компресора холодильної машини, яка змінюється частотним перетворювачем $f1$ та $f2$ -вектор неконтрольованих збурень

$T_{гл}$ -температура гліколю

Твд-температура води

Ідентифікація (розробка моделей) каналів перетворення об'єкта регулювання

Проводимо апріорний аналіз динамічних властивостей каналів ОК. Слід за кожним каналом ОК відповісти на два запитання: чи має канал властивість самовирівнювання? Збільшення керуючої дії призведе до збільшення чи зменшення регульованої координати? Кожен канал ОК має властивість самовирівнювання.

Збільшення керуючої дії U_1 призведе до зменшення температури.

Збільшення керуючої дії U_2 призведе до збільшення температури. Плануємо та проводимо активні експерименти з ідентифікації моделей динаміки каналів ОК. Результати потрібно подати у вигляді перехідних характеристик.

План активного експерименту включає в себе:

1. За допомогою зміни управляючих дій домагаємося значень регульованих координат, що перебували б в околицях їх номінальних значень. Для нашого ОК значенням $U_1 = 60 \% \text{х.р.о.}$ та $U_2 = 60 \% \text{х.р.о.}$ будуть відповідати значення регульованих координат $T_{gl}=45^{\circ}\text{C}$ $T_{vod}=7^{\circ}\text{C}$
2. Чекаємо закінчення перехідних процесів в каналах та настання сталих режимів, при яких вихідні змінні перестануть змінюватися.
3. Змінимо управляючу дію U_1 ступінчастим чином на $10\% \text{х.р.о.}$, відзначивши при цьому момент початку його зміни.
4. Реєструємо зміну вихідних змінних до настання нових сталих режимів.
5. Повертаємо U_1 у вихідний стан, чекаємо закінчення перехідних процесів в каналах та настання сталих режимів.
6. Змінимо управляючу дію U_2 ступінчастим чином на $10\% \text{х.р.о.}$, відзначивши при цьому момент початку його зміни.
7. Реєструємо зміну вихідних змінних до настання нових сталих режимів.

Результати активного експерименту наведені нижче

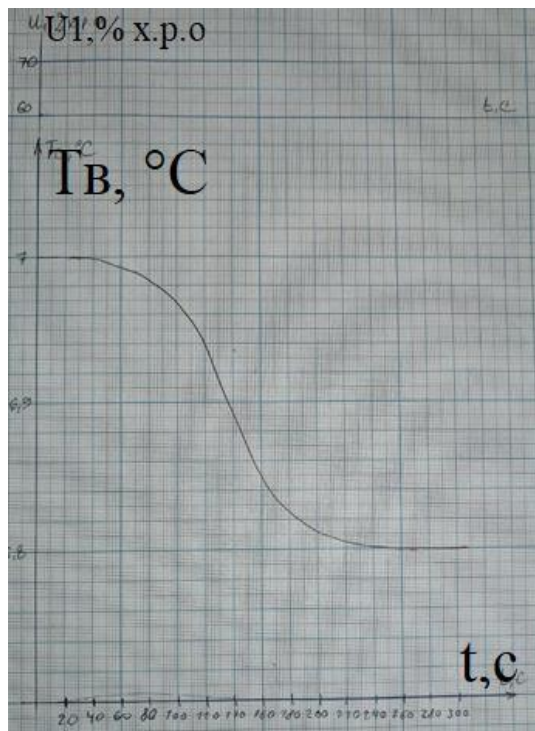


Рис. 1.5 Результати активного експерименту «U1-Tв»

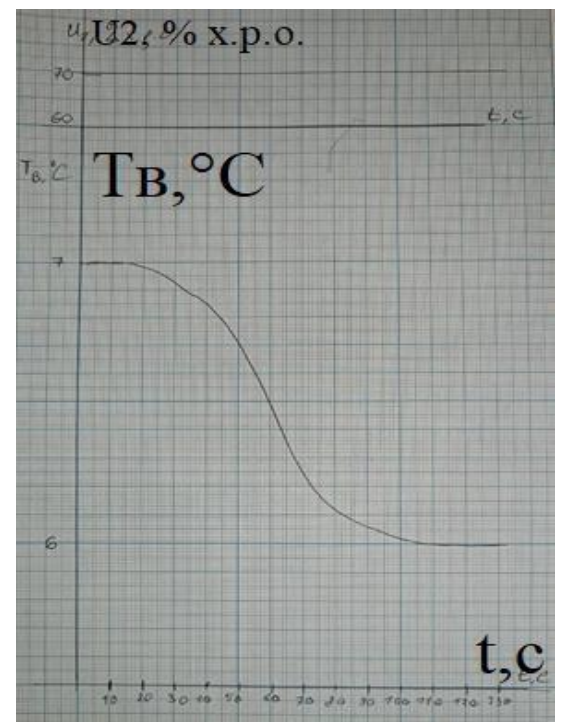


Рис. 1.6— результати активного експерименту «U2-Tв»

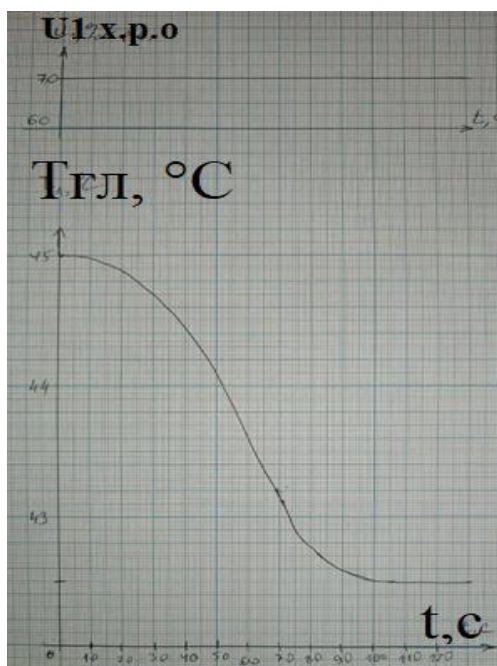


Рис.1.7 — результати активного експерименту «U1-TгЛ»

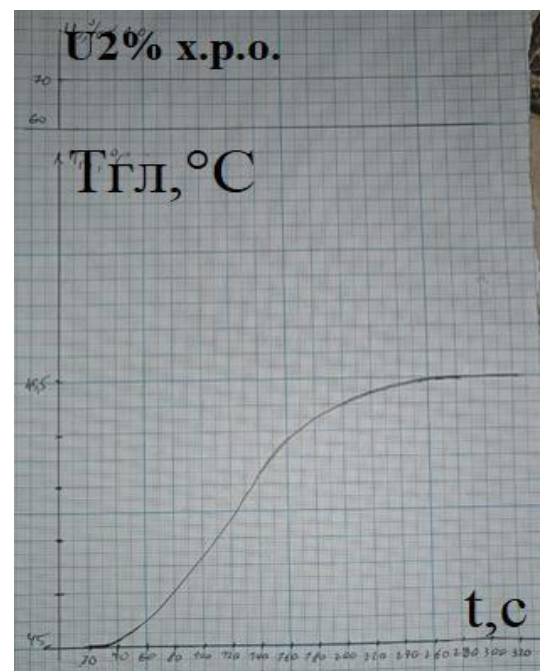


Рис. 1.8 — результати активного експерименту «U2-TгЛ»

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

$$W(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{Tp + 1}; \quad W(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{(Tp + 1)^2}$$

Проведемо структурну та параметричну ідентифікацію моделей динаміки каналів ОК.

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

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

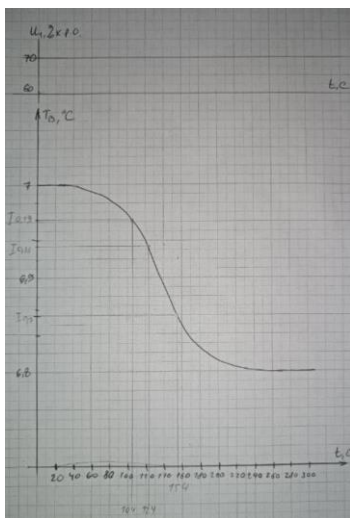


Рис. 1.9— Параметрична ідентифікація моделі ОК «U1-Tvod»

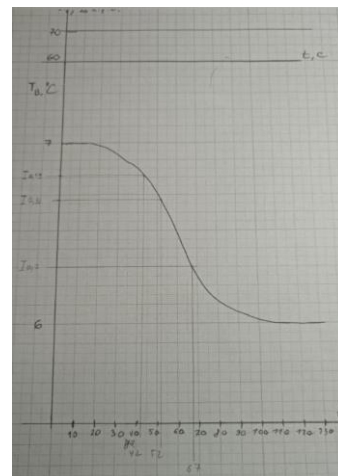


Рис. 1.10— параметрична ідентифікація моделі ОК «U2-Tvod»

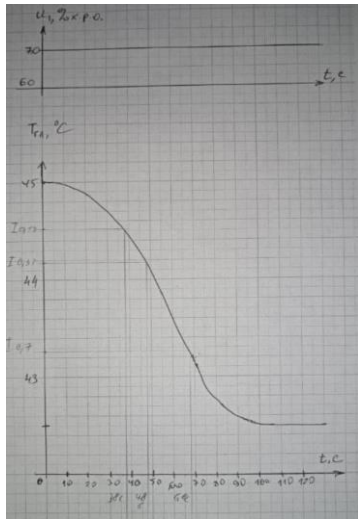


Рис.1.11-параметрична
ідентифікація моделі ОК «U1-Тгл»

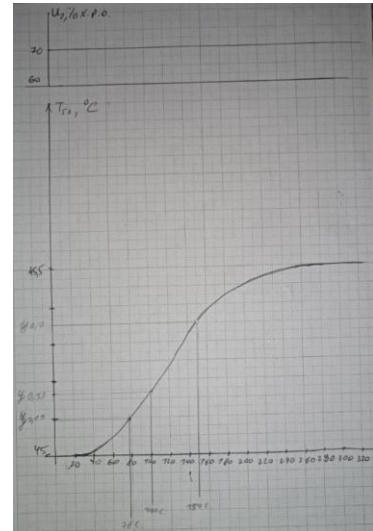


Рис.1.12–параметрична
ідентифікація моделі ОК «U2-Тгл»

Таблиця 1.2 -Експериментальні данні для відтворення апроксимацій

Канал U1-Tvod $W_{U1-Tvod}^O(p) = \frac{-0,02 \cdot e^{-109p}}{37,5p+1} - 1\text{й порядок}$ $W_{U1-Tvod}^O(p) = \frac{-0,02 \cdot e^{-79p}}{(31,25p+1)^2} - 2\text{й порядок}$	Канал U2-Tvod $W_{U2-Tvod}^O(p) = \frac{-0,1 \cdot e^{-44,5p}}{18,75p+1} - 1\text{й порядок}$ $W_{U2-Tvod}^O(p) = \frac{-0,1 \cdot e^{-29,5p}}{(15,62p+1)^2} - 2\text{й порядок}$
Канал U1-Tgl $W_{U1-Tgl}^O(p) = \frac{-0,25 \cdot e^{-38p}}{25p+1} - 1\text{й порядок}$ $W_{U1-Tgl}^O(p) = \frac{-0,25 \cdot e^{-23p}}{(18,75p+1)^2} - 2\text{й порядок}$	Канал U2-Tgl $W_{U2-Tgl}^O(p) = \frac{0,05 \cdot e^{-75p}}{62,5p+1} - 1\text{й порядок}$ $W_{U2-Tgl}^O(p) = \frac{0,05 \cdot e^{-42p}}{(45p+1)^2} - 2\text{й порядок}$

Ідентифікація математичних моделей збурень об'єкта регулювання
 Моделі неконтрольованих збурень доцільно представити як суму чотирьох складових. Причому, детерміновану складову доцільно привести до керуючої дії, а квазидетерміновану та стохастичну складові f2C доцільно привести до регульованої координати.

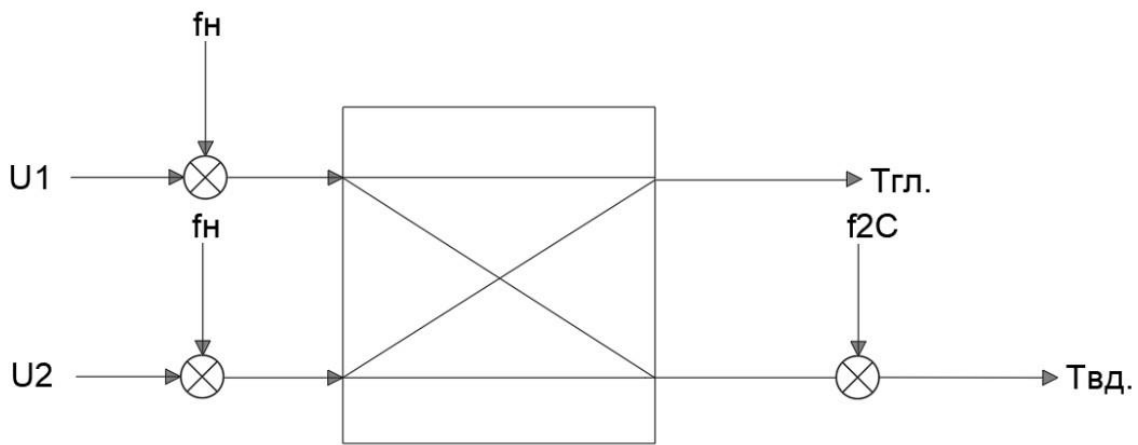


Рис. 1.13– Структурна схема додавання координатних збурень
Спланувати та провести пасивний експеримент для ідентифікації моделей збурень як випадкових процесів.

Номер в журналі викладача – 6

U2-Tvod $T_{vod}(u2 = 0\% \text{ x.p.o.}) = 13^\circ\text{C}$

$T_{вод} = 7^\circ\text{C}$ $\tau_{u2 - tvod} = 44.5 \text{ с.}$

Першим етапом ідентифікації моделі контрольованих і неконтрольованих збурень є оцінювання імовірнісних характеристик відповідних випадкових процесів

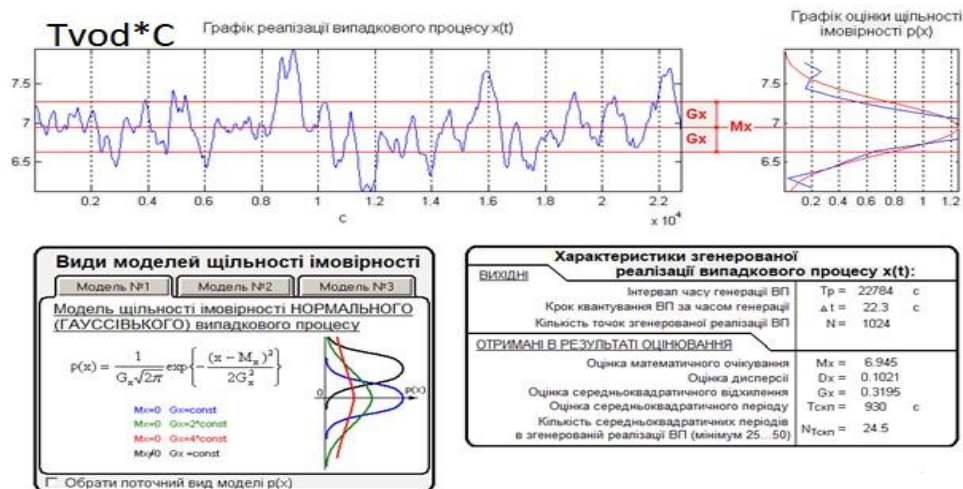


Рис.1.14–Результати оцінювання імовірнісних характеристик випадкового процесу, відповідно неконтрольованим збуренням

За результатами оцінювання нормованих кореляційних функцій з набору типових декілька варіантів моделей кореляційних функцій і спектральних

щільностей. Найбільш схожі моделі №1 та №2. Для моделі №2 маємо дані розрахункові формули:

$$R_x(\tau_k) = D_x \exp\{-\alpha |\tau_k|\} (1 - \alpha |\tau_k|)$$

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

Обираємо модель збурень.

Таблиця результатів ідентифікації							
Номер моделі	α	β	A	C	γ	Значення критерію оптимізації	
✓ 1	0.002775	-	-	-	-	-	2.9322
✓ 5	0.0019854	0.0014977	-	-	-	-	2.5553
✓ 6	0.0055148	0.0013323	-	-	-	-	2.4477
✓ 2	0.000975	-	-	-	-	-	1.727

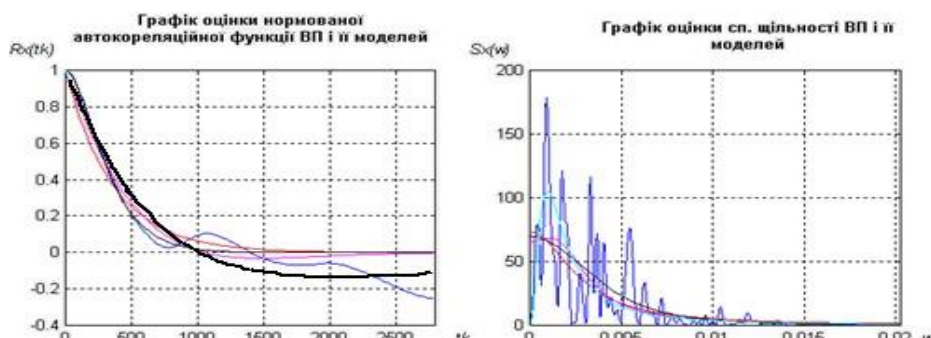


Рис. 1.15–Підсумкові результати ідентифікації моделі контрольованого збурення

Аналіз характеру збурень показав, що в якості збурень випадкового характеру достатньо буде розглядати збурення, приведені до температури води на виході. Ідентифікація моделей випадкових складових неконтрольованих збурень показала, що за квадратом відхилення моделі автокореляційної функції від її оцінки, кращою виявилася модель №2.

Реалізація моделей у середовищі імітаційного моделювання і підтвердження їх відповідності експериментальним даним

Відтворимо моделі каналів ОК в середовищі імітаційного моделювання.

Експериментальні дані зведемо в таблицю Таблиця 1.3

U1-Tgl		U2-Tgl		U2-Tvod		U1-Tvod	
t,c	Tgl,*C	t,c	Tgl,*C	t,c	Tvod,*C	t,c	Tvod,*C
0	45	0	45	0	7	0	7
5	45	10	45	5	7	10	7
10	44,98	20	45	10	7	20	7
15	44,94	30	45,005	15	7	30	7
20	44,88	40	45,015	20	6,98	40	6,998
25	44,8	50	45,03	25	6,96	50	6,996
30	44,7	60	45,045	30	6,93	60	6,992
35	44,59	70	45,07	35	6,89	70	6,989
40	44,44	80	45,1	40	6,85	80	6,984
45	44,3	90	45,135	45	6,79	90	6,976
50	44,1	100	45,165	50	6,71	100	6,968
55	43,86	110	45,2	55	6,6	110	6,956
60	43,6	120	45,235	60	6,49	120	6,94
65	43,3	130	45,275	65	6,37	130	6,916
70	43,12	140	45,32	70	6,25	140	6,892
75	42,95	150	45,35	75	6,17	150	6,87
80	42,76	160	45,38	80	6,12	160	6,85
85	42,66	170	45,405	85	6,08	170	6,835
90	42,58	180	45,425	90	6,06	180	6,826
95	42,52	190	45,44	95	6,04	190	6,818
100	42,5	200	45,455	100	6,02	200	6,812
105	42,5	210	45,467	105	6,01	210	6,808
110	42,5	220	45,475	110	6	220	6,804
115	42,5	230	45,485	115	6	230	6,802
120	42,5	240	45,49	120	6	240	6,8
		250	45,495	125	6	250	6,8
		260	45,495	130	6	260	6,8
		270	45,495			270	6,8
		280	45,5			280	6,8
		290	45,5			290	6,8
		300	45,5			300	6,8
		310	45,5				
		320	45,5				

Канал «U1-Tvod»

Побудуємо схеми моделювання ОК за кожним каналом

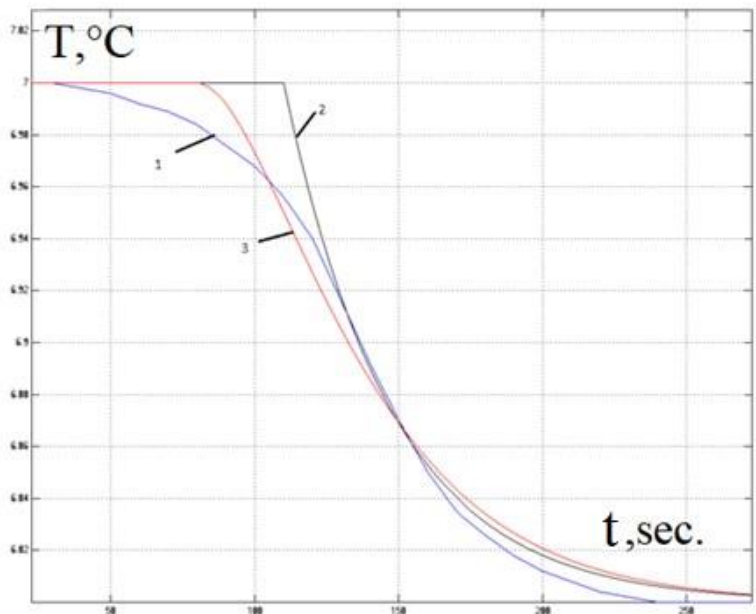


Рис.1.16– результати моделювання за каналом «U1-Tvod»

1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

Канал «U2-Tvod»

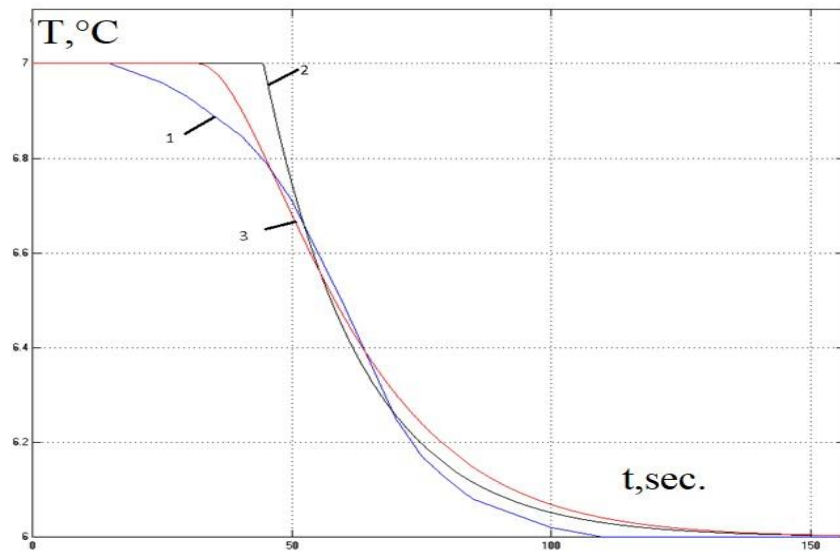


Рис.1.17–результати моделювання за каналом «U2-Tvod»

1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних ; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

Канал «U1-Tgl»

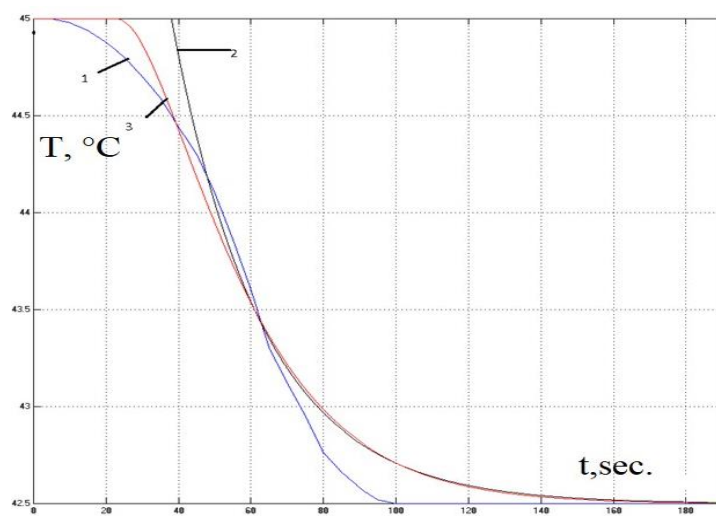


Рис1.18- результати моделювання за каналом «U1-Tgl»

1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 2 – модель 1-го порядку; 3 – модель 2-го порядку

Канал «U2-Tgl»

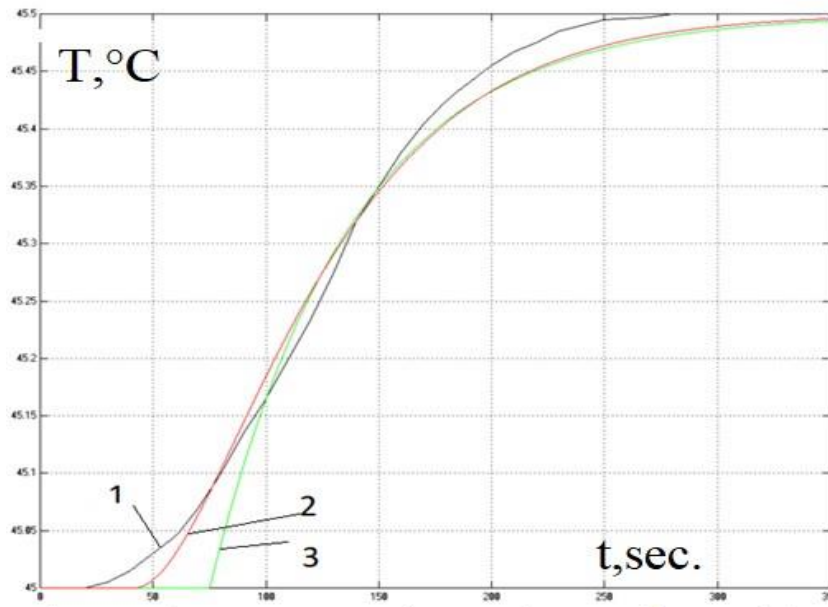


Рис. 1.19- результати моделювання за каналом «U1-Tgl»

1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних; 3 – модель 1-го порядку; 2 – модель 2-го порядку

При виконанні даного підрозділу провели синтез імітаційні моделі каналів ОК в абсолютних значеннях. Основою імітаційною моделі склали моделі каналів ОК другого порядку та моделей статички.

Відтворимо моделі неконтрольованих збурень як випадкових процесів Базова модель неконтрольованих збурень у відповідності до методу формуючого фільтра матиме вигляд .

Відтворимо моделі неконтрольованих збурень як випадкових процесів Базова модель неконтрольованих збурень у відповідності до методу формуючого фільтра матиме вигляд .

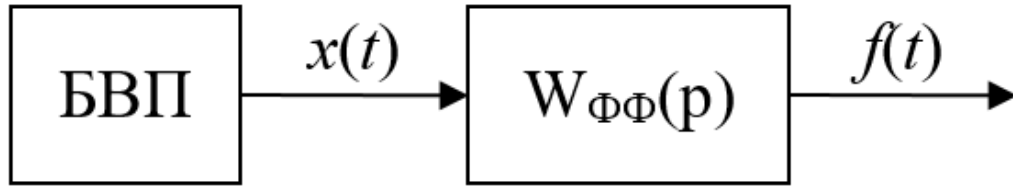


Рис.1.20–Базова модель випадкового процесу

Для моделювання використовується метод формуючого фільтру, суть якого полягає в пропусканні базового випадкового процесу з властивостями «білого шуму» через спеціально розрахований формуючий фільтр з метою отримати параметри моделі випадкового процесу, що максимально відтворюють оціночні параметри

Розраховуємо параметри формуючого фільтра та попередні розрахунки для відтворення моделі збурення.

$$|W_{\Phi\Phi}(j\omega)|^2 = \frac{S_f(\omega)}{S_x(\omega)} = W_{\Phi\Phi}(j\omega) \cdot W_{\Phi\Phi}(-j\omega)$$

$$S_x(\omega) = \sigma_x^2 \cdot \frac{2 \cdot \Delta t_{\Gamma}}{3}$$

$$R_f(\tau_k) = D_f e^{-\alpha|\tau_k|} \cdot (1 - \alpha|\tau_k|); \quad S_f(\omega) = \frac{D_f 4\alpha\omega^2}{(\omega^2 + \alpha^2)^2}.$$

$$\begin{aligned} S_f(j\omega) &= \frac{-D_f 4\alpha j^2 \omega^2}{(-(j)^2 \omega^2 + \alpha^2)^2} = \frac{-D_f 4\alpha j^2 \omega^2}{(\alpha + j\omega)^2 (\alpha - j\omega)^2} = \\ &= \frac{2j\omega\sqrt{D_f\alpha}}{(\alpha + j\omega)^2} \cdot \frac{-2j\omega\sqrt{D_f\alpha}}{(\alpha - j\omega)^2}. \end{aligned}$$

Бачимо, що $W_{\Phi\Phi}(j\omega) = \frac{2j\omega\sqrt{D_f\alpha}}{(\alpha + j\omega)^2}.$

А після заміни $W_{\Phi\Phi}(p) = \frac{2\sqrt{D_f\alpha}p}{(\alpha + p)^2} = \frac{2\sqrt{D_f\alpha}p}{\alpha^2\left(\frac{1}{\alpha}p + 1\right)^2}.$

Далі маємо $W_{\Phi\Phi}(p) = \frac{kp}{(Tp+1)^2},$

де $k = \frac{1}{S_x(\omega)} \cdot \frac{\sqrt{D_f\alpha}}{\alpha^2}, \quad T = 1 / \alpha$

$$\sigma_x = \sigma_f / 2 = 0,3195 / 2 = 0,15975$$

$$\Delta t_{\Gamma} = \frac{1}{(2 \dots 3)\alpha} = \frac{1}{3 \cdot 0,000975} \dots \frac{1}{2 \cdot 0,000975} = 342 \dots 513 \approx 500c$$

$$S_x(\omega) = \sigma_x^2 \cdot \frac{2 \cdot \Delta t_{\Gamma}}{3} = 0,15975^2 \cdot \frac{2 \cdot 500}{3} = 8.5$$

$$k = \frac{1}{S_x(\omega)} \cdot \frac{\sqrt{D_f \cdot \alpha}}{\alpha^2} = \frac{1}{8.5} \cdot \frac{\sqrt{0,1021 \cdot 0,000975}}{0,000975^2} = 1234.7 \quad T = 1 / \alpha = 1 / 0,000975 = 1025 \text{ c}$$

$$W_{\Phi\Phi}(p) = \frac{kp}{(Tp+1)^2},$$

$$W_{\Phi\Phi}(p) = \frac{1234.7p}{(1025p + 1)^2}$$

Налаштування елемента Band-Limited White Noise:

$$\text{Noise power} = S_x(\omega) = 8.5;$$

$$\text{Sample time} = \Delta t_{\Gamma} = 500 \text{ c};$$

$$\text{Seed} = 1.$$

Кількість точок моделювання $N = 1024$

$$T_p = N \cdot \Delta t_{\Gamma} = 1024 \cdot 500 = 512\,000 \text{ c}$$

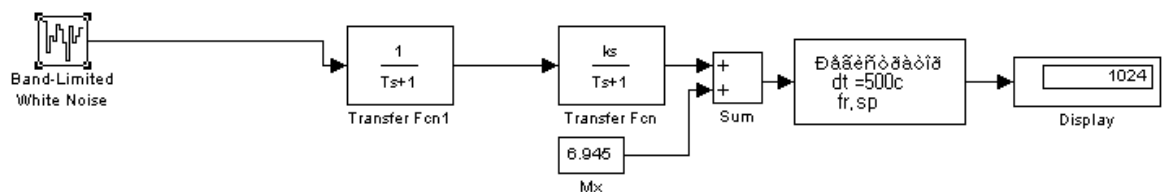


Рис.1.21- Схема моделювання стохастичної складової із розрахунковими параметрами формуючого фільтра.

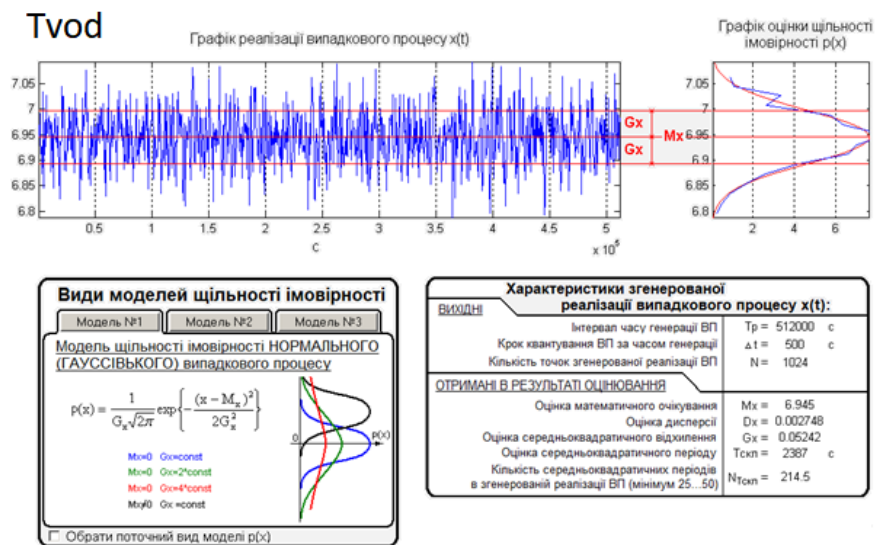


Рис 1.22–Результат моделювання неконтрольованих збурень із розрахунковими параметрами формуючого фільтра.

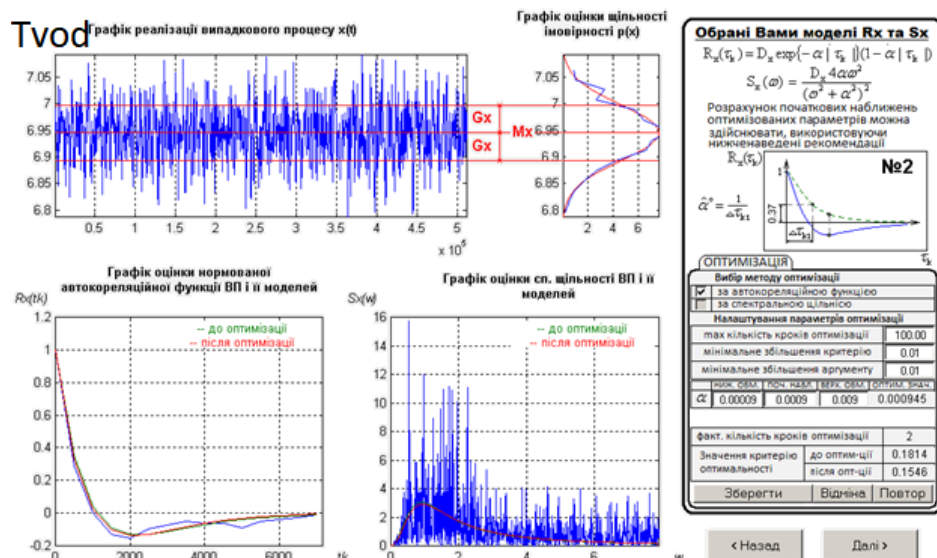


Рис.1.23– Результат моделювання неконтрольованих збурень із розрахунковими параметрами формуючого фільтра.

Оцінимо точність відтворення параметрів у моделі.

$$\Delta M = \frac{|M - \hat{M}|}{M} \cdot 100 = \frac{|6.945 - 6.945|}{6.945} \cdot 100 = 0\%$$

$$\Delta \sigma = \frac{|\sigma - \hat{\sigma}|}{\sigma} \cdot 100 = \frac{|0.05242 - 0.3195|}{0.05242} \cdot 100 = 509\%$$

$$\Delta \alpha = \frac{|\alpha - \hat{\alpha}|}{\alpha} \cdot 100 = \frac{|0.000945 - 0.000975|}{0.000945} \cdot 100 = 3.17\%$$

За необхідності скоригувати параметри формуючого фільтра. Навести кінцеве моделювання збурення, оцінити похибку відтворення моделі.

Похибка відтворення σ суттєво перевищує 5%, тому проведемо коригування коефіцієнту передачі формуючого фільтра:

$$k = \frac{\hat{\sigma}}{\sigma} \cdot k_{\Pi} = \frac{0,3195}{0,05242} \cdot 1234.7 = 7521.2$$

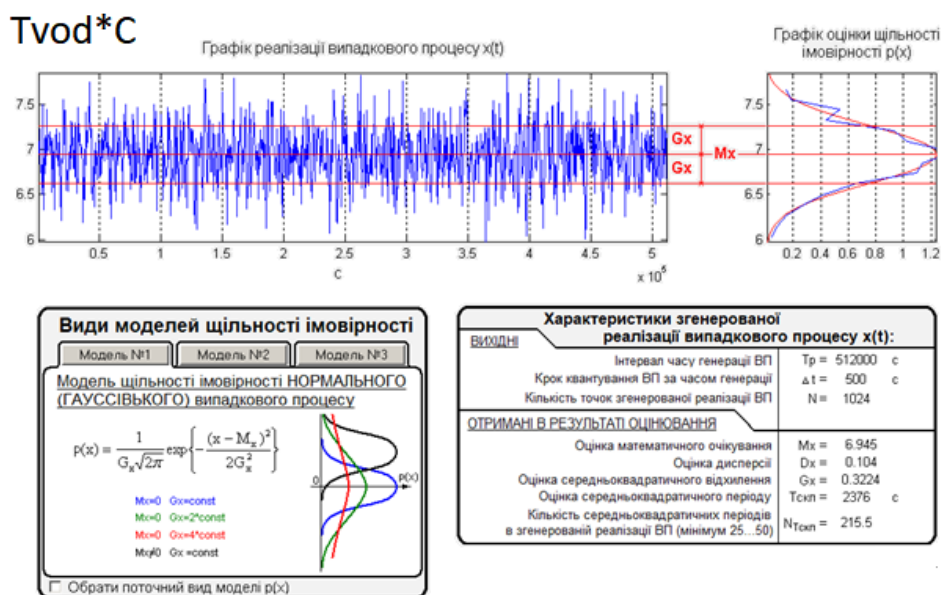


Рис.1.24–Результат моделювання неконтрольованих збурень із корегованими параметрами формуючого фільтра.

Крок 3: Параметрична ідентифікація моделей автокореляційної функції і спектральної щільності ВП

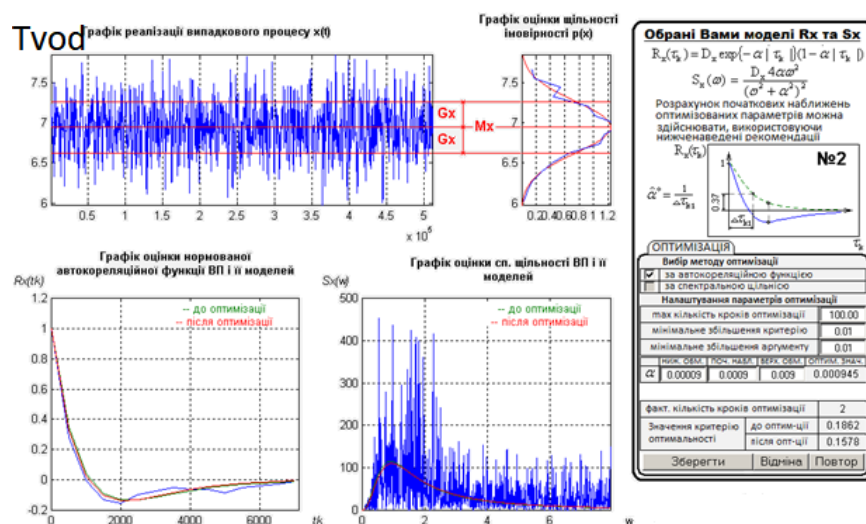


Рис.1.25–Результат моделювання неконтрольованих збурень із корегованими параметрами формуючого фільтра.

$$\Delta M = \frac{|M - \hat{M}|}{M} \cdot 100 = \frac{|6.945 - 6.945|}{6.945} \cdot 100 = 0\%$$

$$\Delta \sigma = \frac{|\sigma - \hat{\sigma}|}{\sigma} \cdot 100 = \frac{|0,3224 - 0,3195|}{0,3224} \cdot 100 = 0.8\%$$

$$\Delta \alpha = \frac{|\alpha - \hat{\alpha}|}{\alpha} \cdot 100 = \frac{|0,000945 - 0,000975|}{0,000945} \cdot 100 = 3.17\%$$

кінцеву передаточну функцію формуючого фільтра

$$W_{\Phi\Phi}(p) = \frac{7521.2p}{(1018p + 1)^2}$$

Висновки

якості базової моделі відтворення неконтрольованого збурення, як випадкового процесу, прикладеного до Tvod, було обрано метод формуючого фільтра. За яким базовий випадковий процес з властивостями «білого шуму» пропущено через спеціально розрахований та скоригований формуючий фільтр. Як показали розрахунки, за математичним очікуванням, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнтом спаду α і коефіцієнтом коливальності похибка відтворення моделей випадкового процесу не перевищує 5%, тобто є достатнім.

Отже, було виконано структурну та параметричну ідентифікацію моделей динаміки каналів ОК та перевірено відповідності їх експериментальним даним. Виходячи з експериментальних даних, математичні моделі каналів об'єкту керування можуть бути представлені статичною аперіодичною ланкою 1-го або 2-го порядку і ланкою запізнення. Параметрична ідентифікація проводилася за методиками двох загальних точок для першого і другого порядку. Порівняння кусочно лінійних апроксимацій експериментальних даних з результатами моделювання показали, що параметрична ідентифікація математичних моделей була проведена з прийнятною точністю.

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

Загальною метою керування є керування матеріальними та енергетичними потоками для отримання властивостей продукту необхідного виду і якості.

Із загальної мети керування можна виділити окремі задачі:

- підтримання вихідної змінної об'єкту керування ($T_{г\lambda}$) на її заданому значенні ($T_{вод}$)
 - задача регулювання.
- пристосування в процесі роботи об'єкту управління до його змінних властивостей - завдання адаптації;
- забезпечення ефективних режимів роботи об'єкту керування - завдання оптимізації;
- забезпечити ввімкнення і вимкнення при пусках, зупинках, аварійних ситуаціях - завдання логічного керування.

Для якісної і економічно доцільної реалізації технологічного процесу охолодження води необхідно регулювати температуру гліколю $T_{г\lambda}$ на виході з теплообмінника, та температуру води на виході з чиллера $T_{вод}$.

Для завдання адаптації необхідна автоматизація пристосування в процесі роботи об'єкта управління до його змінних властивостей, заданих. Розглянутий технологічний процес є об'єктом неперервної дії. Властивості продукту істотно впливають на динамічні властивості об'єкта. Але ці властивості в процесі роботи установки на тривалому часу змінюються мало. Цю задачу можна вирішити, змінюючи (коригуючи) настройки регуляторів в процесі роботи установки.

Для задачі оптимізації слід автоматизувати пошук оптимального протікання процесу, мінімізувати витрати енергії, брак готової продукції, збільшити продуктивність обладнання. Для процесу охолодження води цю задачу можна вирішити, підвищивши вимоги до розв'язання задачі регулювання. Головним

джерелом підвищення економічної ефективності процесу охолодження води є зменшення часу на реалізацію технологічного процесу.

Процес охолодження води є об'єктом неперервної дії. Для нього є характерним тривалий робочий режим, на який об'єкт виводять в дистанційному режимі. Режими пуску і зупинки є неекономічними режимами роботи установки. Підвищення економічної ефективності роботи цього процесу в режимах пуску і зупинки можна досягти, автоматизувавши ці завдання. Тому для даного технологічного процесу актуальна автоматизація задачі логічного керування.

Потрібно розробити структурну схему САР базової (найпростішої структури, обрати типові алгоритми регулювання, записати критерій, за яким проводитиметься оптимальний параметричний синтез САР, зобразити регламентні зони ОК.

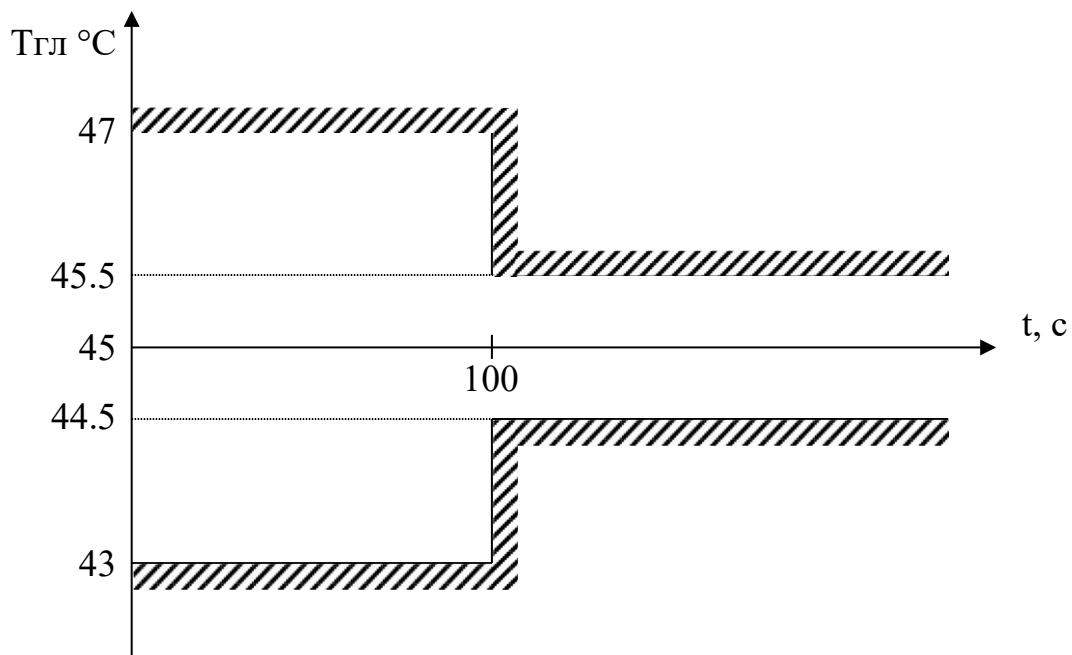


Рис.1.26 –Регламентована зона для температури гліюколю

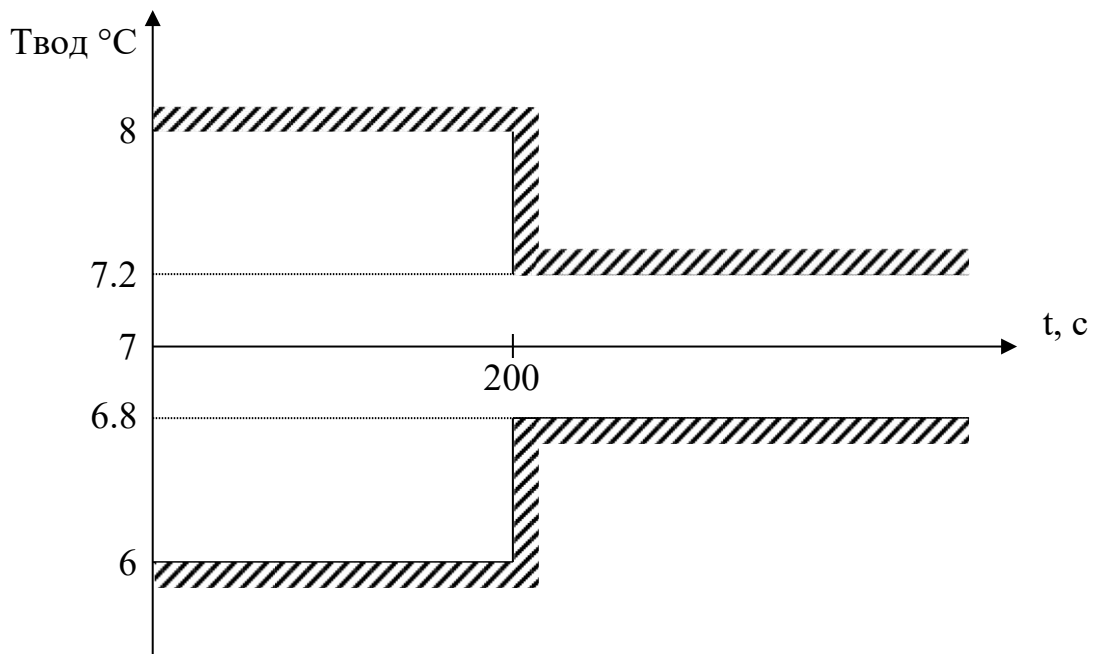


Рис.1.27 –Регламентована зона для температури води

Потрібно розробити структурну схему САР базової (найпростішої структури, обрати типові алгоритми регулювання, записати критерій, за яким проводитиметься оптимальний параметричний синтез САР, зобразити регламентні зони ОК.

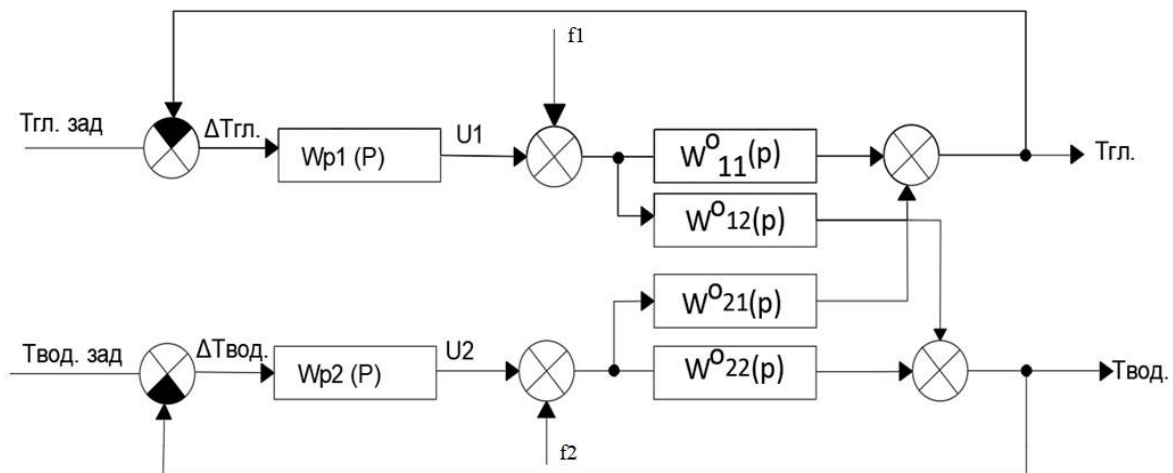


Рис.1.28–Структурна схема САР базової (найпростішої) структури

Розрахунок налаштувань ПІ-регуляторів

Регулятор $W_{P1}(p)$

$$K_{P1} = \frac{1,1 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1,1 \cdot 25}{-0,25 \cdot 38} = -2.89\% \text{х.р.о.} / ^\circ\text{C}$$

$$T_{I31} = 2,0 \cdot \tau_O = 2,0 \cdot 38 = 76 \text{ с}$$

Регулятор $W_{P2}(p)$

$$K_{P2} = \frac{1,1 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1,1 \cdot 18,75}{-0,1 \cdot 44,5} = -4,6\% \text{х.р.о. } /^{\circ}\text{C}$$

$$T_{I32} = 2,0 \cdot \tau_O = 2,0 \cdot 44,5 = 89 \text{ с}$$

Розрахунок налаштувань ПІД-регуляторів

Регулятор $W_{P1}(p)$

$$K_{P1} = \frac{1,2 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1,2 \cdot 25}{-0,25 \cdot 38} = -3,15\% \text{х.р.о. } /^{\circ}\text{C}$$

$$T_{I31} = 1,4 \cdot \tau_O = 1,4 \cdot 38 = 53,2 \text{ с}$$

$$T_{y\Pi 1} = 1,0 \cdot \tau_O = 1,0 \cdot 38 = 38 \text{ с}$$

Регулятор $W_{P2}(p)$

$$K_{P2} = \frac{1,2 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1,2 \cdot 18,75}{-0,1 \cdot 44,5} = -5\% \text{х.р.о. } /^{\circ}\text{C}$$

$$T_{I32} = 1,4 \cdot \tau_O = 1,4 \cdot 44,5 = 62,3 \text{ с}$$

$$T_{y\Pi 2} = 1,0 \cdot \tau_O = 1,0 \cdot 44,5 = 44,5 \text{ с}$$

Проводимо розробку та налаштування схеми моделювання САР з ПІ- та ПІД-регуляторами.

Проводимо розробку та налаштування схеми моделювання САР з ПІ- та ПІДрегуляторами.

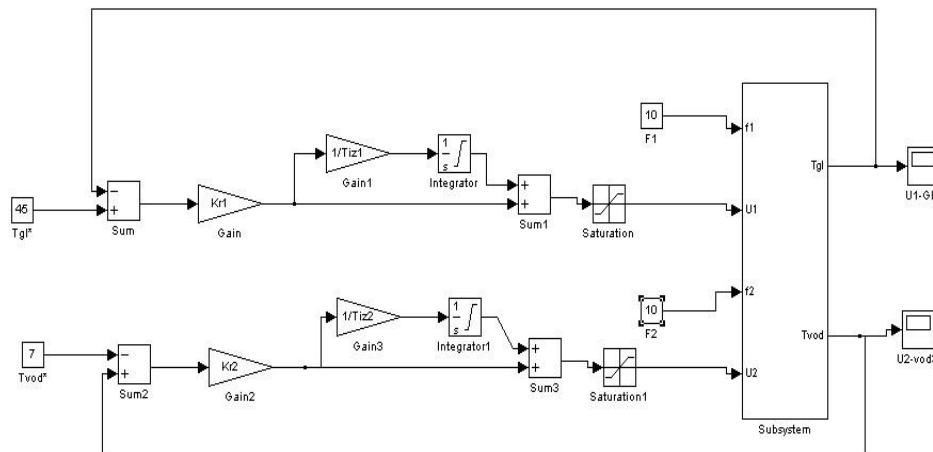


Рис.1.29 – Структурна схема моделювання одноканальної САР з ПІ- регулятором

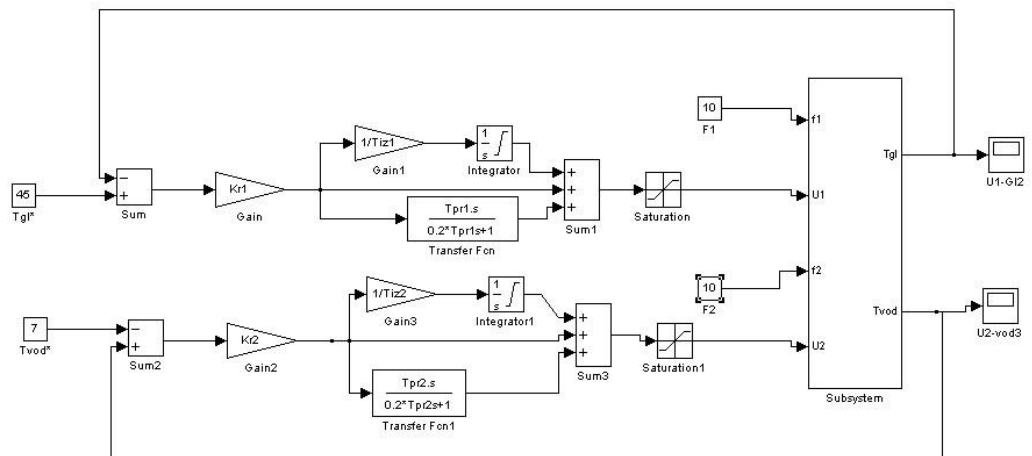


Рис. 1.30– Структурна схема моделювання одноканальної САР з ПДрегулятором

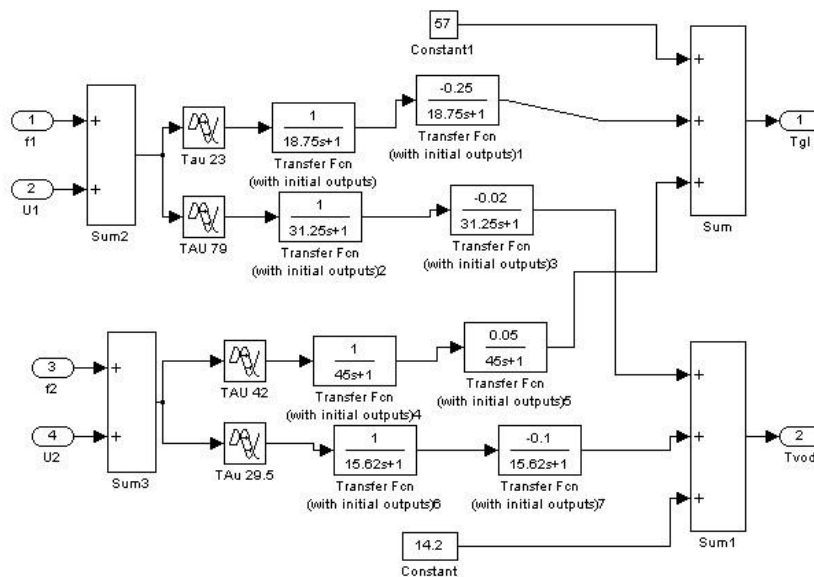


Рис.1.31 – Структурна схема моделювання ОК
Розробка структурної схеми САР і проведення оптимального параметричного синтезу САР з ПІ- та ПД-регуляторами.

Для оптимального параметричного синтезу САР з ПД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рис. 1. 32

Результати оптимізації налаштувань ПД-регулятора наведені на рис. 1.33

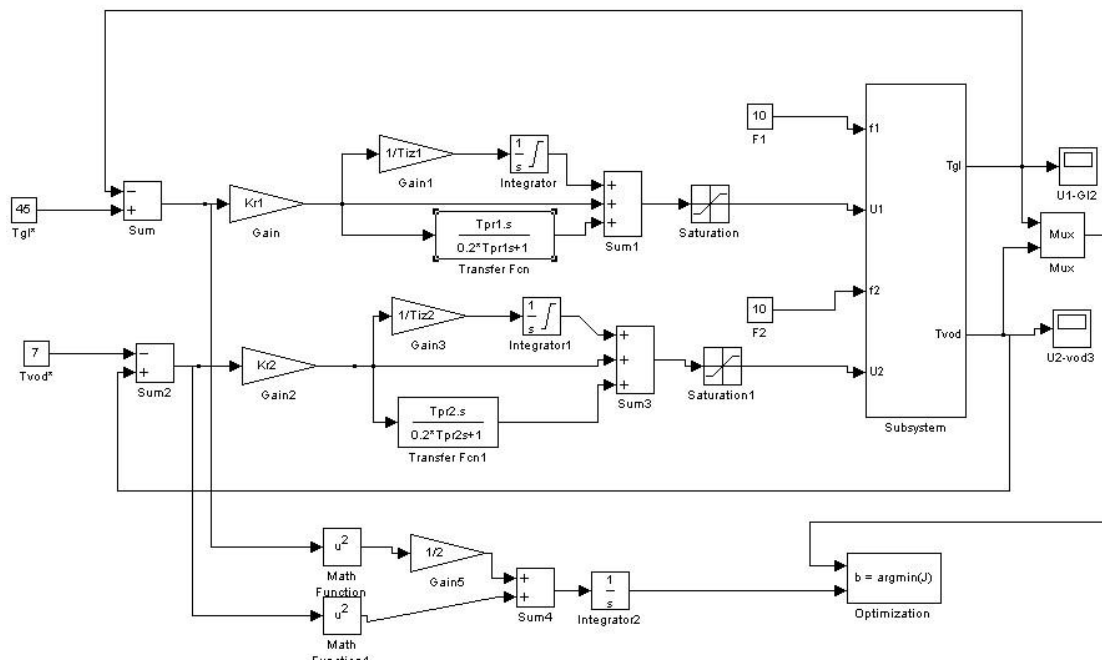
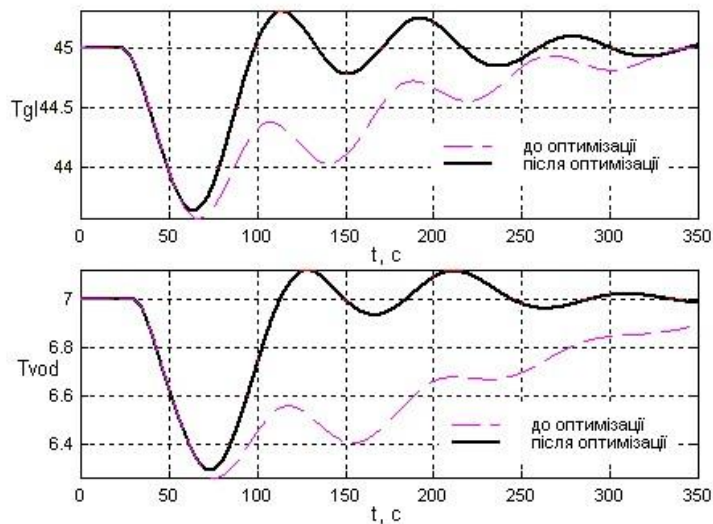


Рис. 1.32- Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kr1	-5.8445	-30	-3.15	0	до - 121.8558
Tiz1	29.3827	1	53.2	200	після - 50.4334
Tpr1	17.7885	0	38	300	оптимізації.
Kr2	-11.703	-30	-5	0	Кількість кроків процедури оптимізації:
Tiz2	32.7484	1	62.5	200	максимальна - 1000
Tpr2	17.3813	0	44.5	300	фактична - 461

Рис. 1.33 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

Проводимо порівняльний аналіз САР з ПІД-регуляторами до і після оптимізації.

Таблиця 1.4 - Результати порівняння САР з ПІД-регуляторами до і після оптимізації

САР з ПІД-регулятором	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_{gl}^{MAKC}, ^\circ C$	$T_{пп1}, c$	ΔT_{vod}^{MA} кС, $^\circ C$	$T_{пп2}, c$	
до оптимізації	1.44	169	0.75	277	121
після оптимізації	1.37	88	0.7	103	50.4

Проводимо порівняльний аналіз САР з ПІ- і ПІД-регуляторами

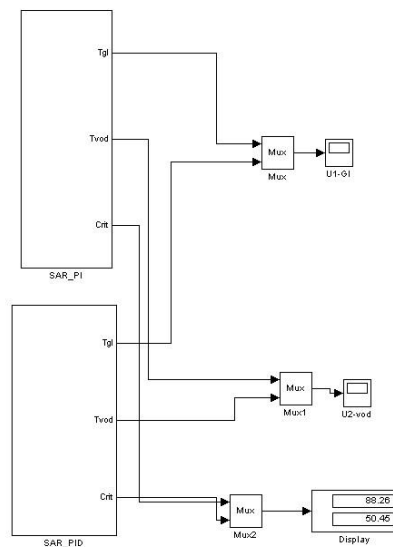


Рис.1.34 - Структурна схема моделювання для порівняльного аналізу варіантів САР

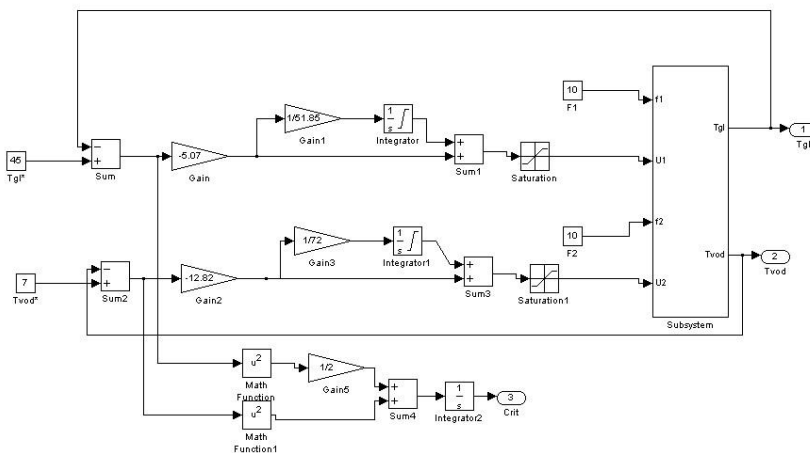


Рис. 1.35– Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором

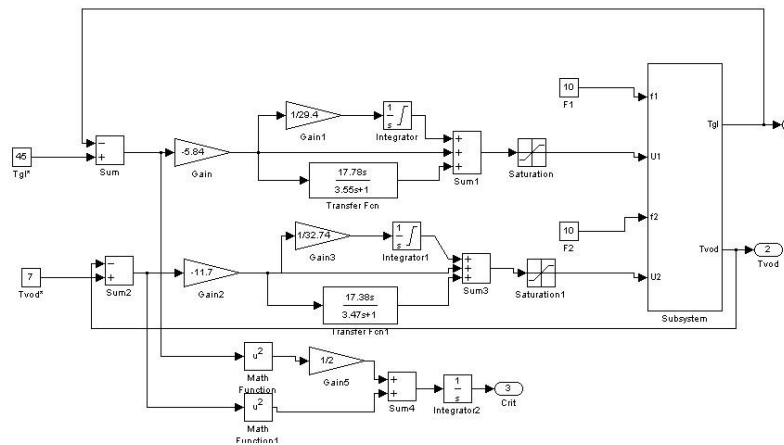


Рис. 1.36– Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

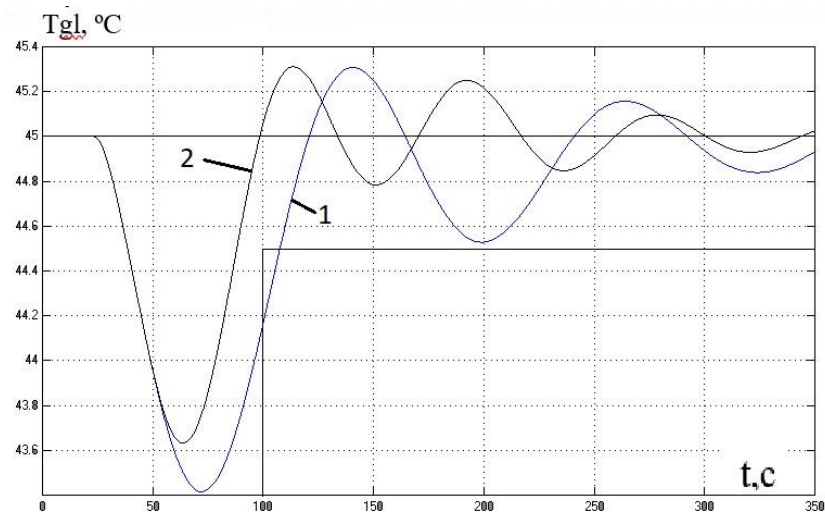


Рис. 1.37 Результати порівняння САР з ПІ- та ПІД-регуляторами:

1 – САР з ПІ-регулятором; 2 – САР з ПІД-регулятором

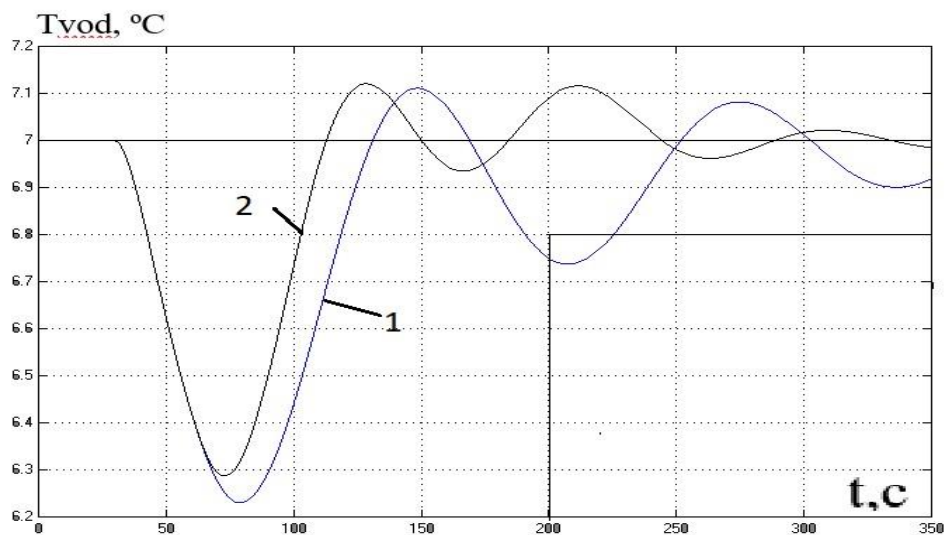


Рис. 1.38 Результати порівняння САР з ПІ- та ПІД-регуляторами: 1 – САР з ПІ-регулятором; 2 – САР з ПІД-регулятором

Таблиця 1.5 – Результати порівняння варіантів САР

САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_{gl}^{МАКС}, ^\circ\text{C}$	$T_{пп1}, \text{с}$	$\Delta T_{vod}^{МАКС}, ^\circ\text{C}$	$T_{пп2}, \text{с}$	
ПІ	1.6	107.5	0.77	225	88.25
ПІД	1.37	88	0.7	103	50.45

Робимо висновок за результатами роботи в даному підрозділі.

1.САР з ПІ-регулятором відповідає гранично припустимим вимогам по T_{gl} , T_{vod} та не за відповідає часом перехідного процесу

САР з ПІД-регулятором по T_{gl} , T_{vod} відповідає гранично припустимим вимогам

2.Для ПІ-регуляторів коефіцієнт передачі K_{p1} зменшився на 75.5 %, час ізодрому T_{I31} зменшився на 31.8%, коефіцієнт передачі K_{p2} збільшився на 179%, час ізодрому T_{I32} зменшився на 19.1% , максимальне динамічне відхилення $\Delta T_{gl}^{МАКС}$ зменшилося на 6.25%, час перехідного процесу за T_{gl} зменшився на 106%, максимальне динамічне відхилення $\Delta T_{vod}^{МАКС}$ зменшилося на 4%, час перехідного процесу за T_{vod} зменшився на 62%, інтегральний показник якості зменшився на = 112%.

Для ПІД-регуляторів коефіцієнт передачі K_{p1} зменшився на 85%, час ізодрому T_{I31} зменшився на 76%, час випередження зменшився на 113% коефіцієнт передачі K_{p2} зменшився на 134%, час ізодрому T_{I32} зменшився на 91% час випередження зменшився на 156%. Максимальне динамічне відхилення $\Delta T_{gl}^{МАКС}$ зменшилося на 5.1%, час перехідного процесу за T_{gl} зменшився на 92%, максимальне динамічне відхилення $\Delta T_{vod}^{МАКС}$ зменшилося на 7%, час перехідного процесу за T_{vod} зменшився на 102%, інтегральний показник якості зменшився на = 142%.

3. Оскільки САР з налаштуваннями регуляторів за інженерними методиками дають перехідні процеси, що сходяться, то їх можна використовувати на практиці за умови не занадто короткого часу перехідного процесу. Але такі САР потребують оптимального параметричного синтезу.

4. В результаті введення до регулятора Д-складової САР за T_{gl} T_{vod} почала відповідати часу перехідного процесу. Максимальне динамічне відхилення ΔT_{gl}^{MAKS} зменшилося на 15%; час перехідного процесу за T_{gl} зменшився на 19%; Максимальне динамічне відхилення ΔT_{vod}^{MAKS} зменшилося на 9%; час перехідного процесу за T_{vod} зменшився на 54.22%, інтегральний показник якості зменшився на 43%.

З використанням розроблених раніше моделей параметричних збурень проводимо машинні експерименти з перевірки САР на грубість. Скоригуємо схеми моделювання САР з ПІ- та ПІД-регуляторами, щоб провести аналіз означених САР на грубість. Зробити висновки про грубість САР.

Дослідження САР на грубість будемо проводити в умовах варіації часів запізнення в каналах ОК на 20%.

Проведемо аналіз САР з ПІ- та ПІД-регуляторами на грубість. Результати перевірки наведено на рис. 1.41 та 1.42

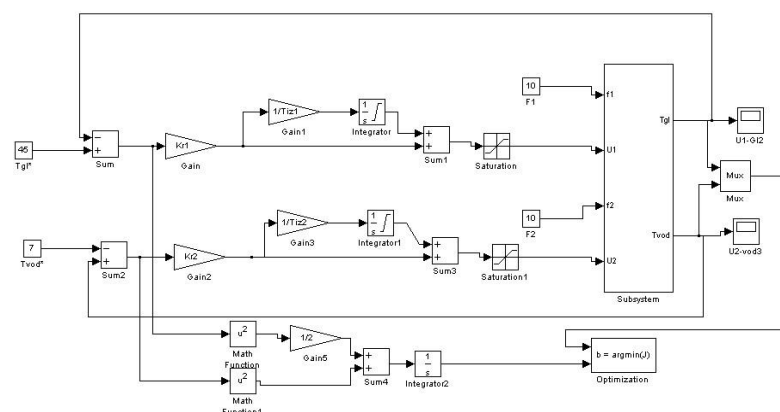


Рис. 1.39 - Структурна схема моделювання для аналізу САР з ПІ-регулятором на грубість

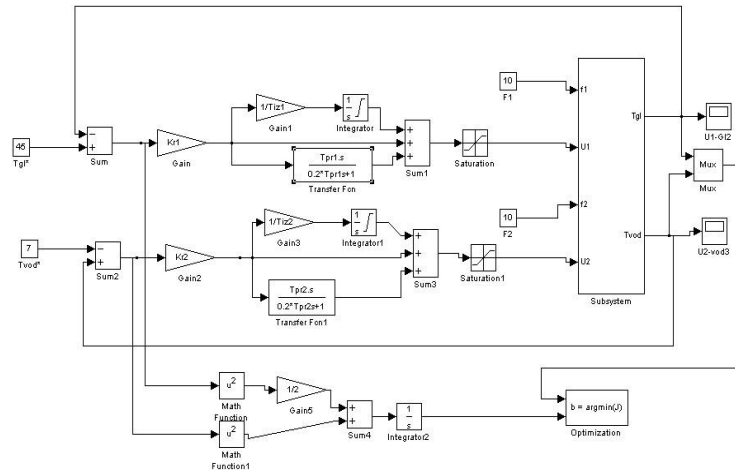


Рис. 1.40- Структурна схема моделювання для аналізу САР з ПІД-регулятором на грубість

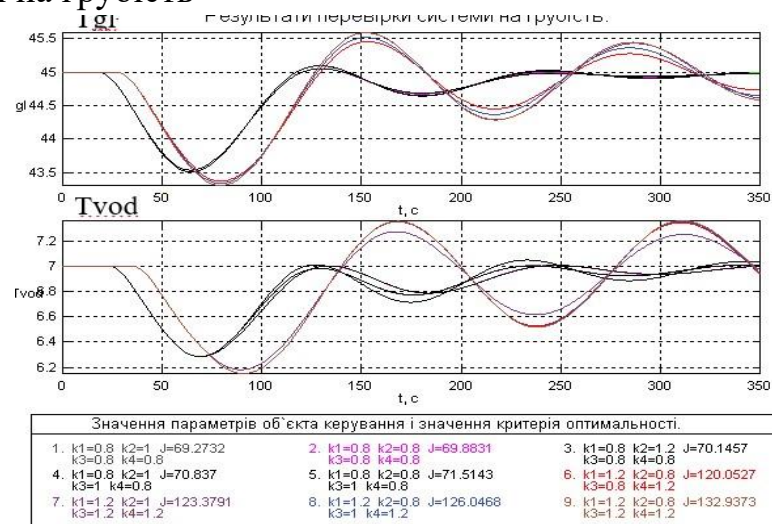


Рис. 1.41 – Результати перевірки на грубість САР з ПІ-регуляторами

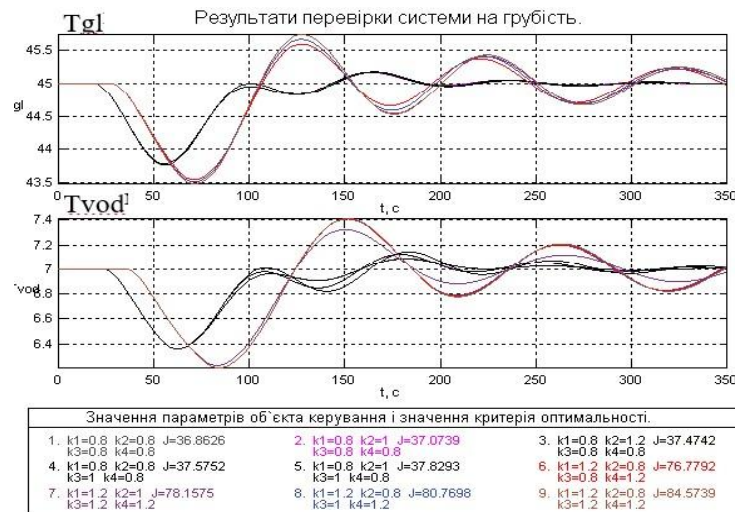


Рис. 1.42– Результати перевірки на грубість САР з ПІД-регуляторами САР з ПІ- та ПІД-регуляторами є грубою. Так як САР виявилася грубою, то

провести оптимальний параметричний синтез САР при найнесприятливішій для керування варіації параметрів ОК не потрібно.

Проведемо порівняльний аналіз САР при номінальних параметрах ОК, при параметрах ОК, «найсприятливіших» та «найнесприятливіших» для керування.

«Найсприятливішою» для керування є САР з ПІ-регулятором з часами запізнення в каналах ОК, меншими на 20% від номінальних значень, за винятком перехресного каналу k_{21} , який дорівнює ном. знач.

«Найнесприятливішою» для керування є САР з ПІ-регулятором з часами запізнення в прямих каналах ОК, на 20% більших від номінальних значень, і в перехресному каналі k_{21} ОК на 20% меншим від номінального а в каналу k_{31} на 20% більших від номінальних значень.

«Найсприятливішою» для керування є САР з ПІД-регулятором з часами запізнення в каналах ОК, меншими на 20% від номінальних значень.

«Найнесприятливішою» для керування є САР з ПІД-регулятором з часами запізнення в прямих каналах ОК, на 20% більших від номінальних значень, і в перехресних каналах k_{21} ОК на 20% меншим від номінального а в каналу k_{31} на 20% більших від номінальних значень.

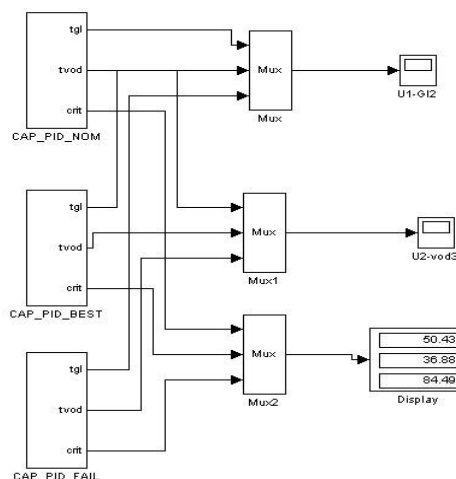


Рис. 1.43 – Схема моделювання САР базової структури з ПІД-регулятором для порівняння варіантів з номінальними, "найсприятливішими" та "найнесприятливішими" для керування параметрами ОК

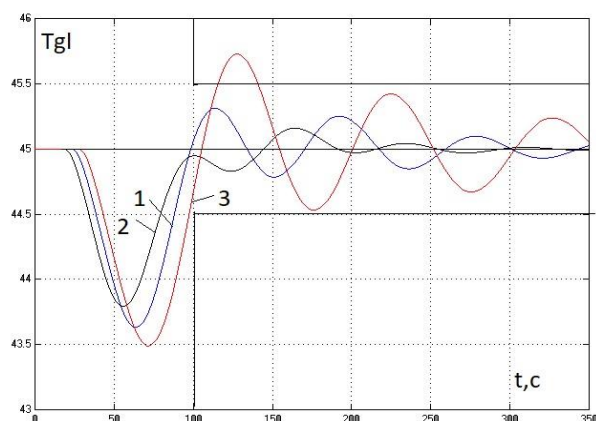


Рис. 1.44 Порівняльний аналіз САР з ПІД-регуляторами . 1 – номінальні значення. 2 – найсприятливіші значення. 3 – найнесприятливіші значення

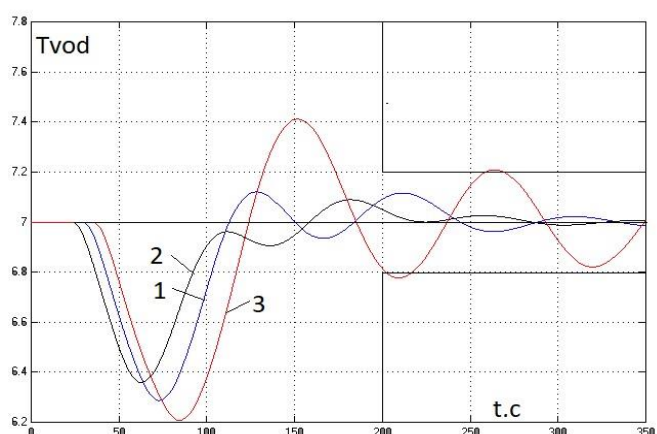


Рис. 1.45 Порівняльний аналіз САР з ПІД-регуляторами (Θ зв1). 1 – номінальні значення. 2 – найсприятливіші значення. 3 – найнесприятливіші значення

Таблиця 1.6 - Порівняльний аналіз САР з ПІД-регуляторами

Варіант САР (параметри ОК)	Прямі показники якості				Кри тері й
	$\Delta T_{\text{гл}}^{\text{М}}$ АКС, °С	Т пп 1, с	$\Delta T_{\text{вод}}$ МАКС, °С	Т п п2 , с	
номінальні	1.37	88	0.7	103	50.4

«насприятливіші»	1.21	79.28	0.64	92	36.8
«найнесприятливіші»	1.51	96.5	0.8	269	84.49

За результатами попереднього аналізу робимо висновки.

1. САР з ПІ- та ПІД-регуляторами є грубими, тому що в умовах 20%-ї варіації параметрів ОК ці САР дають перехідні процеси, що сходяться.

2. Для САР з ПІ-регуляторами різниця між «найсприятливішими» та «найнесприятливішими» для керування параметрами ОК за максимальним динамічним відхиленням $\Delta T_{\text{гп}}^{\text{МАКС}}$ складає 14%; за часом перехідного процесу $T_{\text{гп}}$ 14%, за максимальним динамічним відхиленням $\Delta T_{\text{вод}}^{\text{МАКС}}$ складає 15%; за часом перехідного процесу $T_{\text{вод}} > 80\%$, за критерієм 48%.

Для САР з ПІД-регуляторами різниця між «найсприятливішими» та «найнесприятливішими» для керування параметрами ОК за максимальним динамічним відхиленням $\Delta T_{\text{гп}}^{\text{МАКС}}$ складає 20%; за часом перехідного процесу $T_{\text{гп}}$ 18%, за максимальним динамічним відхиленням $\Delta T_{\text{вод}}^{\text{МАКС}}$ складає 20%; за часом перехідного процесу $T_{\text{вод}}$ 65%, за критерієм 56%. Оскільки за більшістю показників різниця між «найсприятливішими» та «найнесприятливішими» умовами керування для САР з ПІ-регуляторами є меншою, то САР з ПІ-регуляторами є «грубішою», а САР з ПІД-регуляторами – «чутливішою».

Аналіз сталих процесів у САР при стохастичних вхідних діях

Скоригуємо імітаційні моделі САР з ПІ- та ПІД-регуляторами для проведення аналізу САР на грубість в сталих процесах з параметрами ОК номінальними, «найсприятливіших» та «найнесприятливіших» для керування.

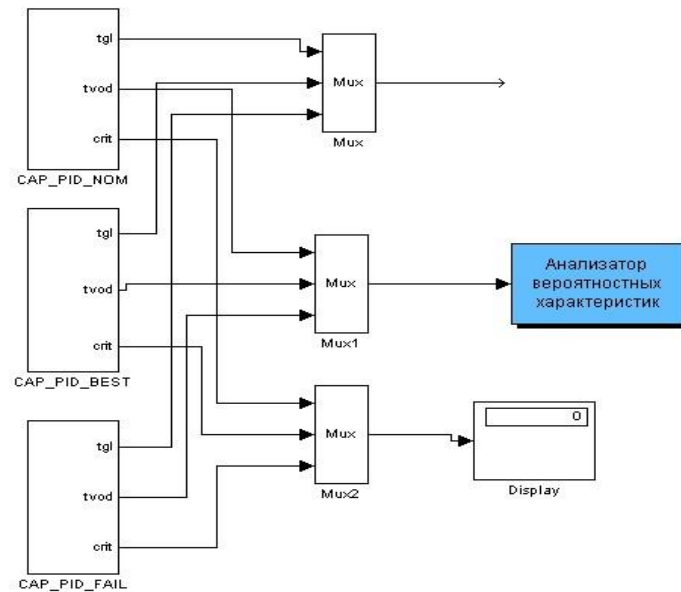


Рис. 1.46 – Структурна схема моделювання САР з регулятором для оцінки грубості у сталих режимах

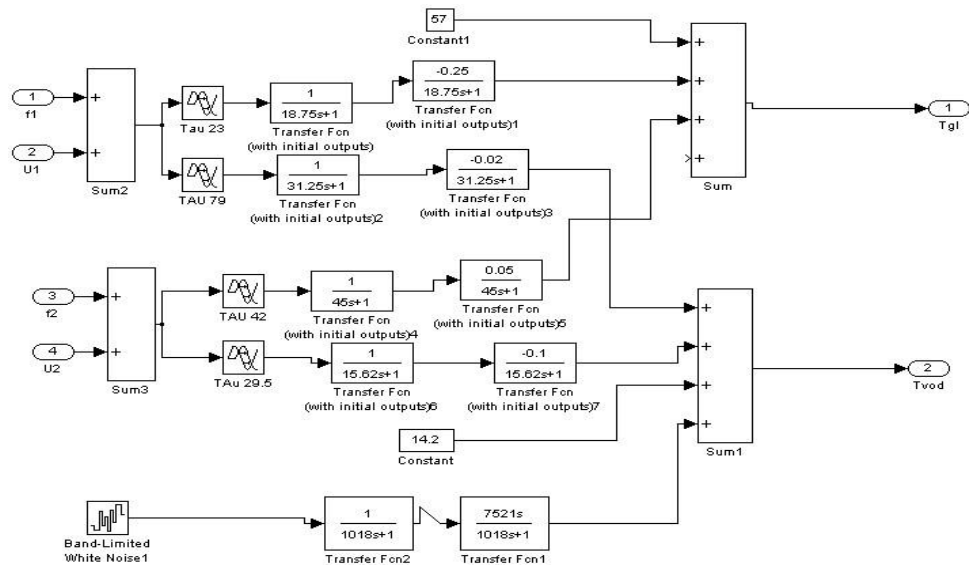


Рис. 1.47– Структурна схема моделювання ОК для оцінки грубості САР у сталих режимах

Порівняння результатів моделювання проведемо за математичним очікуванням, середньоквадратичним відхиленням, середньоквадратичним періодом та інтегральним критерієм. Порівняльні результати оцінки САР на грубість з ПІ-регулятором зведено в таблицю 6.6, а САР з ПІД-регулятором – в таблицю 1.8

Таблиця 1.7 – Результати оцінки САР з ПІ-регулятором на грубість у сталих режимах

Показники якості	Значення параметрів ОК		
	номінальний	«найсприятливіші»	«найнесприятливіші»
Математичне очікування	7	7	7
Середньоквадратичне відхилення	0,042	0,04	0,05
Середньоквадратичний період	684,7	1227	731
Інтегральний критерій	145	130	183

Таблиця 1.8 – Результати оцінки САР з ПІД-регулятором на грубість у сталих режимах

Показники якості	Значення параметрів ОК		
	номінальні	«найсприятливіші»	«найнесприятливіші»
Математичне очікування	7	7	7
Середньоквадратичне відхилення	0.026	0.025	0.03
Середньоквадратичний період	1105	1290	754
Інтегральний критерій	104	87	147

1.6. Недоліки відомих САУ ТП керування холодильною установкою промислового підприємства, обґрунтування напрямів удосконалення САУ як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу. Розглянуті у підрозділі 1.3 системи керування температурою води переважно передбачають регулювання температури теплоносія за допомогою

традиційних ПІ- та ПІД-регуляторів. Такі системи забезпечують прийнятну якість регулювання лише за умов незначних змін навантаження та параметрів технологічного процесу. Особливо негативно вплив координатних збурень проявляється в перехідних режимах роботи холодильної установки. У таких умовах виникають значні відхилення температури теплоносія від заданого значення, збільшується тривалість перехідних процесів та спостерігається перерегулювання. Наслідком цього є погіршення якості холодопостачання, що безпосередньо впливає на економічні показники роботи підприємства. Сучасні розробки в галузі автоматизації холодильних установок значною мірою спрямовані на підвищення енергоефективності обладнання, оптимізацію циклів роботи холодильної установки. Водночас питання підвищення динамічної точності регулювання температури теплоносія та компенсації впливу контрольованих збурень часто залишаються недостатньо дослідженими.

Розглянуті в підрозділі 1.5 варіанти систем автоматичного керування спрямовані на підвищення статичної та динамічної точності стабілізації температури води шляхом використання комбінованого принципу керування та забезпечення інваріантності відносно контрольованих збурень, насамперед змін температури води на виході. За таких умов температура на виході підтримується із значно вищою точністю навіть при істотних змінах режимів роботи об'єкта керування.

Проте навіть системи підвищеної динамічної точності не забезпечують цілеспрямованого покращення техніко-економічних показників роботи холодильної установки. В існуючих системах відсутні функції, які дозволяють автоматично підтримувати найбільш енергоефективний режим роботи обладнання та мінімізувати витрати електроенергії з урахуванням поточних умов функціонування технологічного процесу.

В умовах дії нестационарних координатних та параметричних збурень існуючі системи автоматичного керування не здатні ефективно забезпечувати мінімізацію питомих витрат енергії за рахунок підтримання технологічного процесу поблизу оптимальних режимів роботи без порушення встановлених технологічних обмежень.

Тому основним напрямком удосконалення системи автоматичного керування холодильною установкою є підвищення її функціональних можливостей шляхом впровадження системи гарантуючого керування, яка дозволить забезпечити мінімізацію витрат природного газу при одночасному дотриманні вимог до якості регулювання температури теплоносія та безпечної експлуатації обладнання.

Реалізація системи гарантуючого керування вимагатиме доповнення існуючої структури САУ холодильного агрегату новою функцією – функцією гарантуючого керування, яка забезпечуватиме автоматичний пошук та підтримання найбільш економічно вигідного режиму роботи за умови виконання всіх технологічних обмежень.

Етапи розробки модернізованої системи автоматичного керування будуть розглянуті в наступних розділах роботи.

1.7. Висновки за розділом

Виходячи з вищевказаних обґрунтувань, доцільно розробити для даного процесу абсолютно нову систему, яка забезпечить високу ефективність.

Однією з таких систем є система гарантуючого керування.

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДИ

2.1 Структурний і параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності і її аналіз

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

Основним шляхом підвищення динамічної точності розглянутої САР є побудова автономної САР. Відповідно до цього структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 2.1

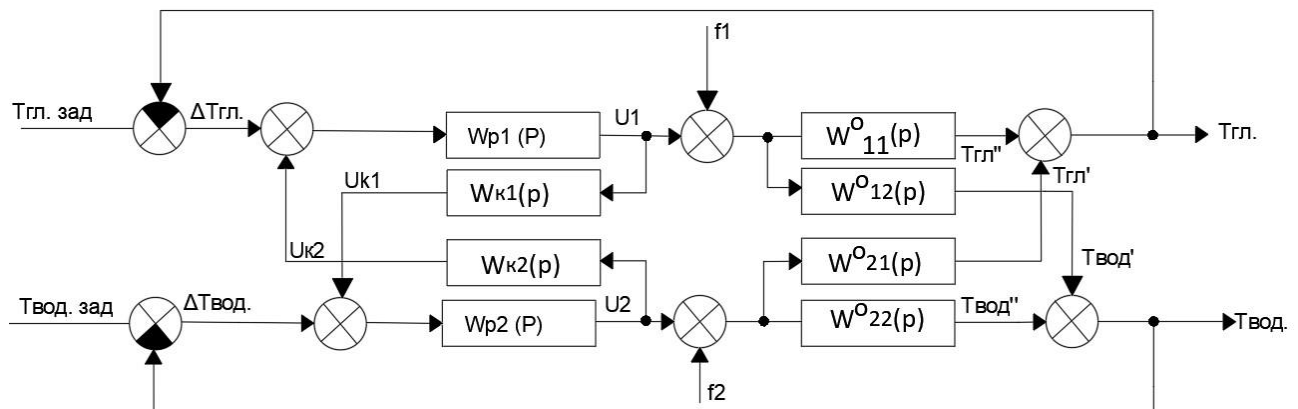


Рис. 2.1 - Структурна схема раціональної САР підвищеної динамічної точності -розробляємо , реалізуємо і налагоджуємо імітаційні моделі коригуючих зв'язків і САР в цілому

Прийmemo спрощену передоточну функцію ПІД регулятора

$$W_p^1(p) = -5.84 \cdot \left(1 + \frac{1}{29.38} + 17.78p\right)$$

$$W_p^2(p) = -11.7 \cdot \left(1 + \frac{1}{32.74} + 17.38p\right)$$

Проводимо розрахунок передаточної функції коригуючого зв'язку. Твод'

$$+ \text{Твод}'' = \text{Твод} = 0$$

$$\text{Твод}' = u_1 \cdot W_{12}^0(p); \quad \text{Твод}'' = u_1 \cdot W_{K1}(p) \cdot W_{P2}(p) \cdot W_{22}^0(p)$$

$$\text{Тгл}' + \text{Тгл}'' = \text{Тгл} = 0$$

$$\text{Тгл}' = u_2 \cdot W_{21}^0(p); \quad \text{Тгл}'' = u_2 \cdot W_{K2}(p) \cdot W_{P1}(p) \cdot W_{11}^0(p)$$

$$u_1 \cdot W_{12}^0(p) + u_1 \cdot W_{K1}(p) \cdot W_{P2}(p) \cdot W_{22}^0(p) = 0$$

$$u_2 \cdot W_{21}^0(p) + u_2 \cdot W_{K2}(p) \cdot W_{P1}(p) \cdot W_{11}^0(p) = 0$$

$$u_1 \cdot W_{K1}(p) \cdot W_{P2}(p) \cdot W_{22}^0(p) = -u_1 \cdot W_{12}^0(p)$$

$$u_2 \cdot W_{K2}(p) \cdot W_{P1}(p) \cdot W_{11}^0(p) = -u_2 \cdot W_{21}^0(p)$$

$$W_{K1}(p) = -\frac{W_{12}^0(p)}{W_{P2}(p) \cdot W_{22}^0(p)}$$

$$W_{U_1-\text{Твод}12}^0(p) = \frac{-0,02 \cdot e^{-109p}}{37,5p+1}; W_{U_2-\text{Твод}22}^0(p) = \frac{-0,1 \cdot e^{-44,5p}}{18,75p+1}$$

$$\begin{aligned} W_{P2}(p) &= -11,7 \cdot \left(1 + \frac{1}{32,74} + 17,38p\right) \\ &= -11,7 \cdot \left(\frac{32,74 \cdot 17,38 \cdot p^2 + 32,74p + 1}{32,74}\right) \\ &= -11,7 \cdot \frac{569p^2 + 32,74p + 1}{32,74p} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{K1}(p) &= -\frac{W_{12}^0(p)}{W_{P2}(p) \cdot W_{22}^0(p)} = -\frac{\frac{-0,02 \cdot e^{-109p}}{37,5p+1}}{-11,7 \cdot \frac{569p^2 + 32,74p + 1}{32,74p} \cdot \frac{-0,1 \cdot e^{-44,5p}}{18,75p+1}} \\ &= -\frac{-0,02}{-11,7 \cdot -0,1} \cdot \frac{e^{-109p}}{e^{-44,5p}} \cdot \frac{32,74p \cdot (18,75p+1)}{(37,5p+1) \cdot (569p^2 + 32,74p + 1)} \\ &= 0,017 \cdot e^{-109p-(-44,5p)} \cdot \frac{32,74p \cdot (18,75p+1)}{(37,5p+1) \cdot (569p^2 + 32,74p + 1)} \\ &= 0,017 \cdot e^{-64,5p} \cdot \frac{32,74p \cdot (18,75p+1)}{(37,5p+1) \cdot (569p^2 + 32,74p + 1)} \end{aligned}$$

Подальші розрахунки доцільно проводити тільки для одного коригувального зв'язку, оскільки основною регульованою змінною є температура води, на яку більшою мірою впливає перехресний зв'язок від температури гліколю.

Передаточна функція коригуючого зв'язку ідеальних диференціаторів та ланок чистого випередження (фізично нереалізованих ланок) не містить. Тому ця передаточна функція є фізично реалізованою.

Розкладаємо передаточну функцію коригуючого зв'язку на типові ланки, складаємо схему моделювання, отримуємо перехідну характеристику розрахункового фізично реалізованого коригуючого зв'язку.

$$W_K(p) = 0,017 \cdot e^{-64.5p} \cdot \frac{32.74p \cdot (18.75p + 1)}{(37.5p + 1) \cdot (569p^2 + 32.74p + 1)}$$

$$= 0,017 \cdot e^{-64.5p} \cdot \frac{32.74p}{(37.5p + 1)} * \frac{18.75p + 1}{(569p^2 + 32.74p + 1)}$$

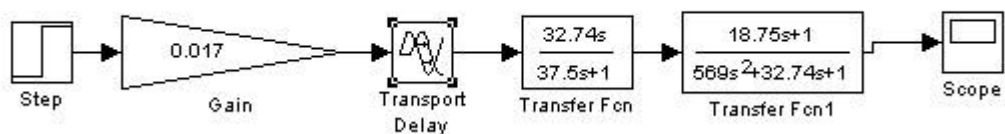


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку

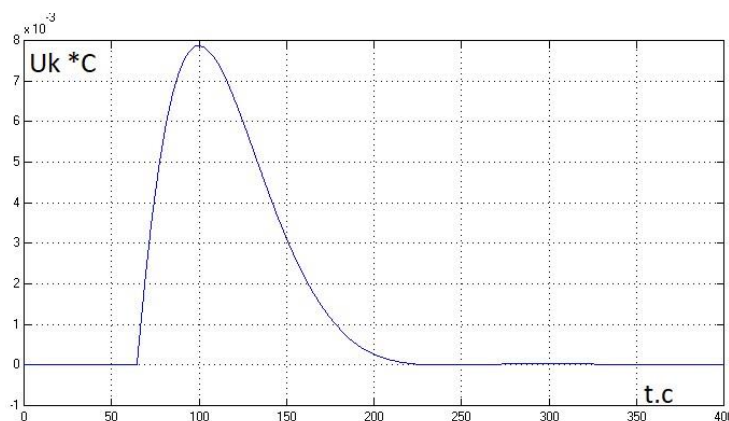


Рис. 2.3 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку

Спрощення коригувальних зв'язків з урахуванням особливостей їх технічної реалізації та параметричний синтез САР при детермінованих вхідних впливах. Спрощуємо передаточну функцію коригуючого зв'язку.

$$W_{K1}(p) = 0,017 \cdot e^{-64.5p} \cdot \frac{32.74p \cdot (18.75p + 1)}{(37.5p + 1) \cdot (569p^2 + 32.74p + 1)}$$

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

Отримаємо параметри спрощеного коригуючого зв'язку K_K
 $= 0,017$; $T_{K1} = 64.5$; $T_{K2} = 32,74$.

2.2 Оптимальний параметричний синтез САК підвищеної динамічної точності і аналіз результатів синтезу.

Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання.

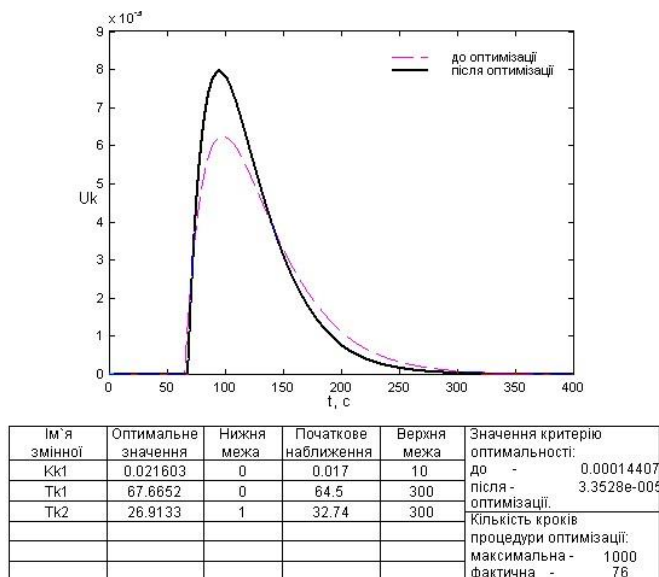


Рис. 2.4 – Результати оптимізації параметрів коригуючого зв'язку

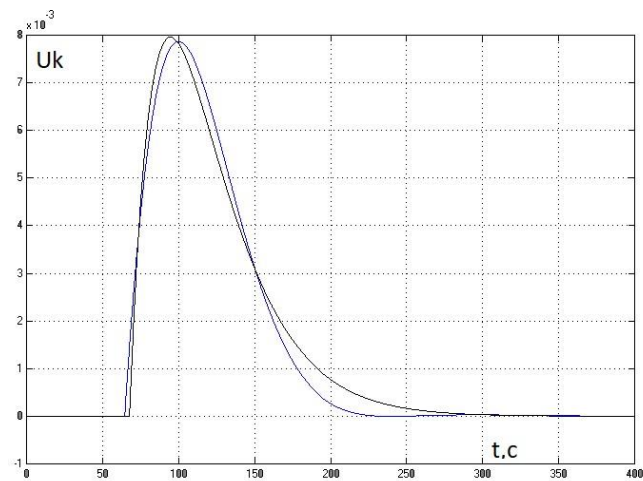


Рис.2.5 – Перехідні характеристики розрахункового та спрощеного коригуючого зв'язку

Як можемо побачити, розрахункова та спрощена перехідні характеристики з мінімальними відхиленнями.

Інтегруємо спрощену передаточну функцію коригуючого зв'язку до структурної схеми САР підвищеної динамічної точності. Проведемо оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності.

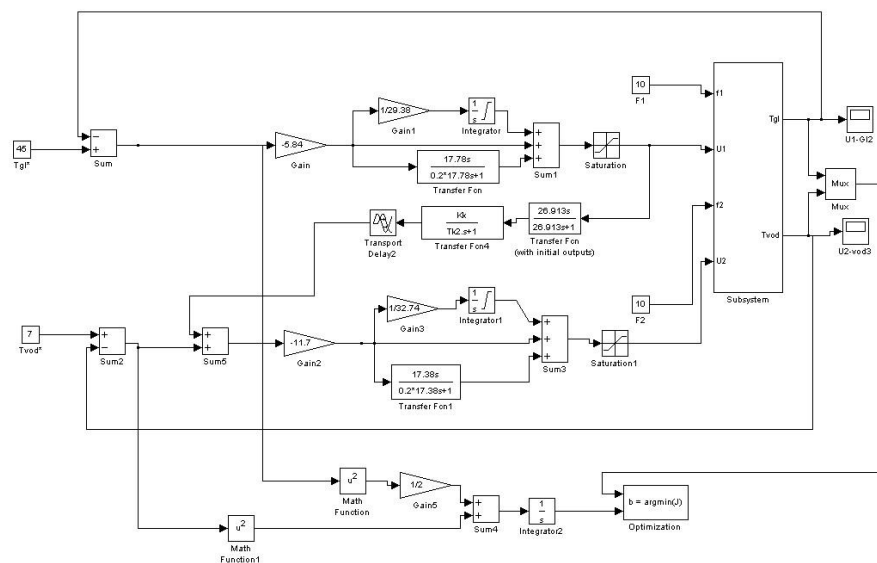


Рис. 2.6 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригувального зв'язку

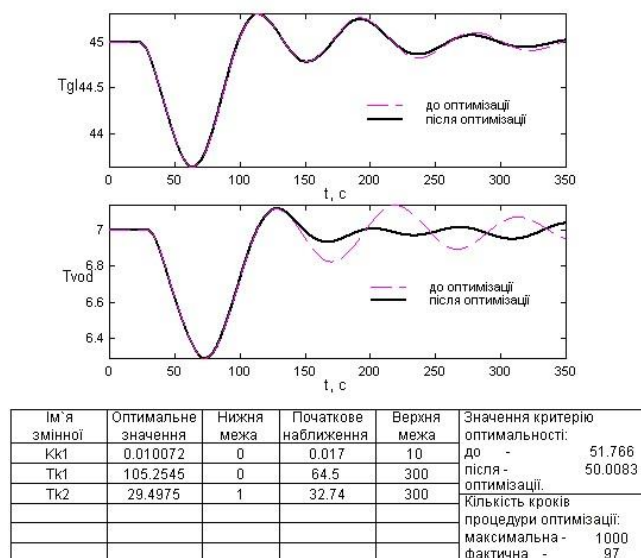


Рис. 2.7 – Результати оптимізації параметрів коригувального зв'язку з додатковими параметрами оптимізації

З використанням моделей параметричних збурень проводимо машинні експерименти з перевірки САР на грубість

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

Проаналізуємо САР підвищеної динамічної точності на грубість.

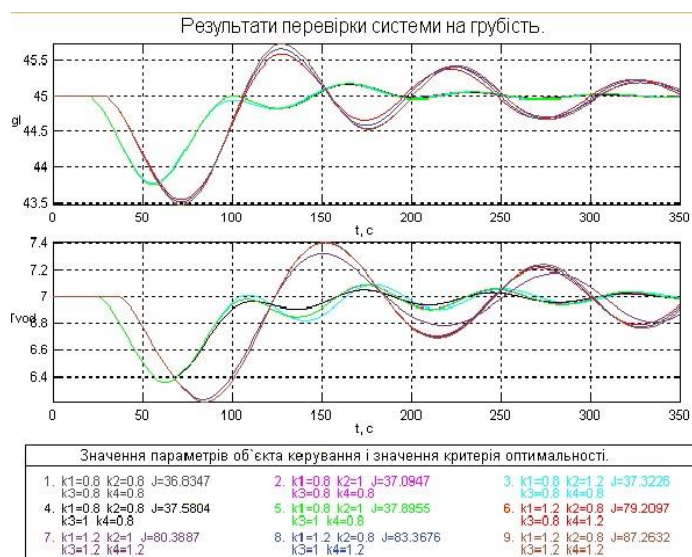


Рис. 2.8 – Аналіз САР підвищеної динамічної точності на грубість за умов варіації параметрів ОК

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК наведено на рис. 7.10. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР дає перехідні процеси, що сходяться, а значить, САР є грубою.

Проведемо порівняльний аналіз САР при номінальних параметрах ОК, при параметрах ОК, «найсприятливіших» та «найнесприятливіших» для керування, в умовах дії стохастичних збурень.

«Найсприятливішою» для керування є САР з ПІД-регулятором з часами запізнення в каналах ОК, меншими на 20% від номінальних значень. «Найнесприятливішою» для керування є САР з ПІД-регулятором з часами запізнення в прямих каналах ОК, на 20% більших від номінальних значень, і в перехресних каналах к2 ОК на 20% меншим від номінального а в каналу к3 на 20% більших від номінальних значень

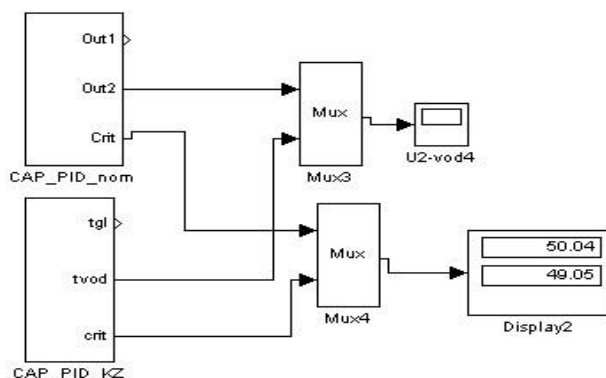


Рис. 2.9 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

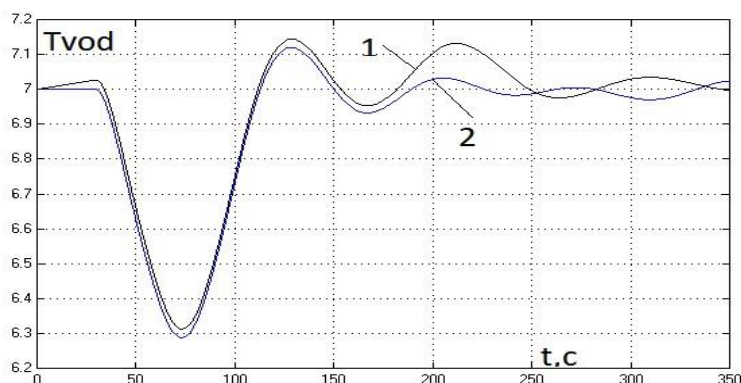


Рис. 2.10 – Результати порівняння САР з ПІД-регуляторами:

1 – САР базової структури;

2 – САР з підвищеною динамічною точністю

2.2. висновок за результатом даного розділу

САР підвищеної динамічної точності задовольняють гранично припустимими вимоги.

Після підвищення динамічної точності САР максимальне динамічне відхилення $\Delta T_{гл}$ не змінилося; час перехідного процесу за $\Delta T_{гл}$ не змінився; протектильність системи по $T_{вод}$ зменшилося, час перехідного процесу за $\Delta T_{вод}$ не зменшився, інтегральний показник якості зменшився на 10%. САР підвищеної динамічної точності є грубою. За більшістю показників відносна різниця показників якості перехідних процесів при "найсприятливіших" і "найнесприятливіших" для керування параметрах ОК для САР з ПД-регулятором більша ніж для автономної САР.

Це може означати, що САР з автономної структури "грубіша", тобто менш чутлива до варіації параметрів ОК. Оскільки для САР підвищення динамічної точності дає суттєве покращення показників якості регулювання у порівнянні з САР базової структури, тому САР підвищеної динамічної точності використовувати доцільно. З усього вище сказаного можна зробити висновок, що за більшості показників якості САР з ПД регулятором є кращою, ніж САР з ПІ регулятором. Тому в подальшому дослідженні в якості базового алгоритму регулювання будемо застосовувати ПД-регулятор. За результатом проведення аналізу можемо сказати, що динамічні процеси в САР за умови дії збурень випадкового характеру, не виходять за рамки зони незначних відхилень. Отже, в сталих режимах САР працює

РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДИ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

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

Нечітка логіка, на якій засноване нечітке управління, ближче до людського мислення та природних мов, ніж традиційні логічні системи. При цьому, область ефективного застосування традиційних систем управління на основі стандартних ПД-регуляторів обмежена. Якщо складність об'єкта невелика але нема відповідного математичного опису каналів регулювання і при цьому є досвід управління то можливо побудувати нечітку систему. Нечітке управління виявляється особливо корисним, коли технологічні процеси надто складні для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів, або коли доступні джерела інформації інтерпретуються якісно, не точно, невизначено. Для технічних систем з випадковим характером впливу, що збурює, складністю розробки динамічної моделі, її високим порядком, нелінійним характером можна говорити про проблему управління в умовах невизначеності. Використання нечітких регуляторів забезпечує грубість і стабільну збіжність процесів, тому такий підхід слід вважати доцільним. Основна перевага нечіткого підходу – можливість формування числа правил управління залежно від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурювань. Також особливою проблемою в сфері автоматизації є управління об'єктами, функції

яких описуються нелінійними залежностями. При проектуванні систем управління для нелінійних об'єктів зазвичай використовуються такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація. Однак застосування цих методів у реальних технічних пристроях не завжди дозволяє досягнути бажаного ефекту. У цьому випадку для забезпечення збільшення ефективності можна використовувати систему управління з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Таким чином, якщо статична характеристика об'єкта управління має деяку невизначену нелінійності але є досвід управління в окремому випадку це процесом охолодження води то можливо синтезувати нечітку системи управління. У якості переваги нечіткого регулювання можна також відзначити наявність сучасних систем програмування контролерів з вбудованими бібліотеками нечіткого управління, що мають добрий графічний інтерфейс, у якому достатньо добре представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку. Отже, спрощується і налаштування системи автоматичного регулювання.

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

Якщо при розробки моделі процесу охолодження води як об'єкту регулювання визначити нелінійний характер статичних характеристик за різними каналами регулювання, то для такого процесу доцільно виконати синтез системи управління на базі апарата нечіткої логіки.

Для представлення нелінійної моделі об'єкта управління, до відповідних моделей каналів регулювання були визначені відповідні нелінійні ланки. Нелінійність було реалізовано за допомогою включення блоку Look up Table

у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта управління з додатковими блоками Look up Table, що визначають нелінійність статичних характеристик, представлена на рисунку 3.1. На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкта управління, яка є більш розширеною моделлю, завдяки включення додаткових нелінійних ланок. У блоці Look up Table у табличній формі задається нелінійний зв'язок (залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

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

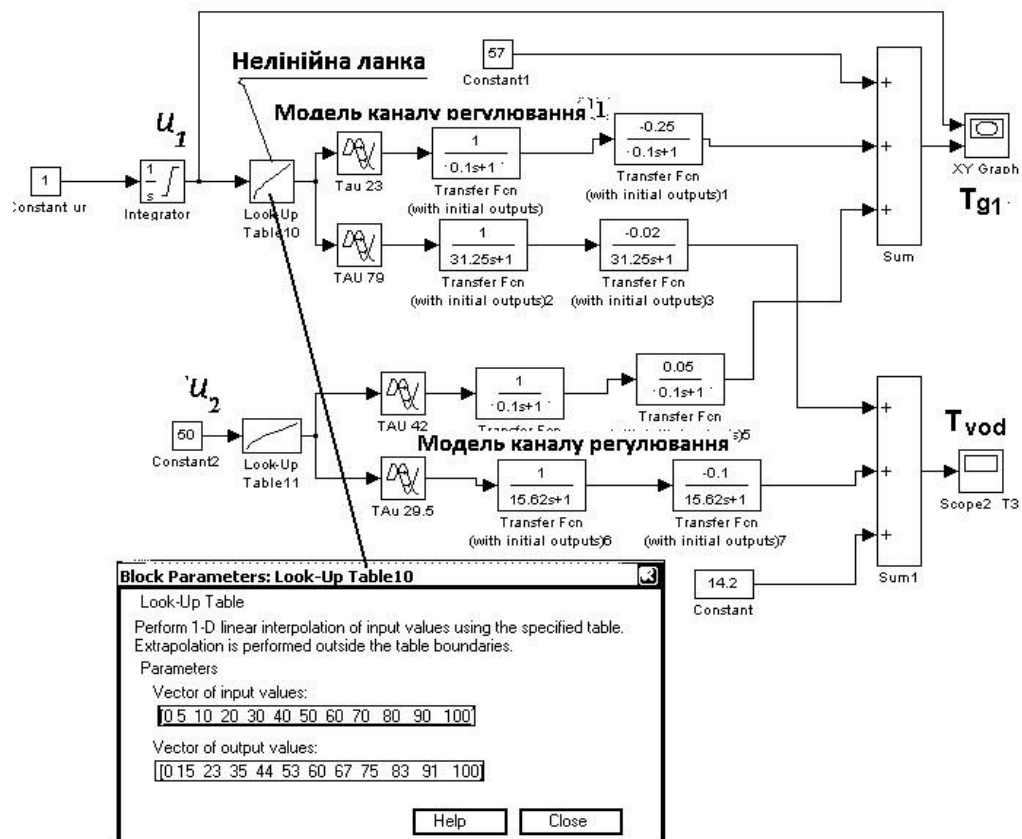


Рисунок 3.1. Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

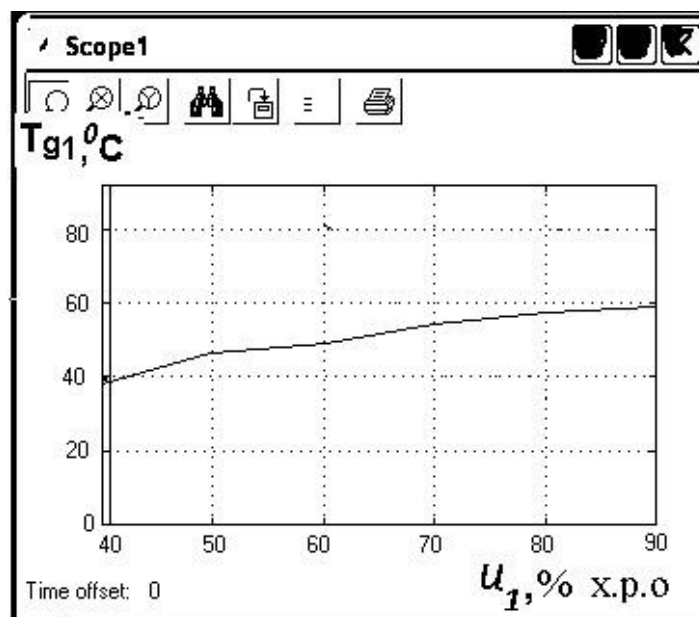


Рисунок 3.2. Нелінійна статична характеристика моделі за каналом регулювання $u_1 - T_{gl}$

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

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

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

Для реалізації параметричної оптимізації регуляторів системи управління в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором, що

забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів при мінімізації за наступним критерієм якості роботи системи:

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

$e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини

і заданим значенням гліколю на виході з теплообмінника Tg_1 ; $e_2(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини

і заданим значенням температура води на виході з чиллера T_{Vod} .

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

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

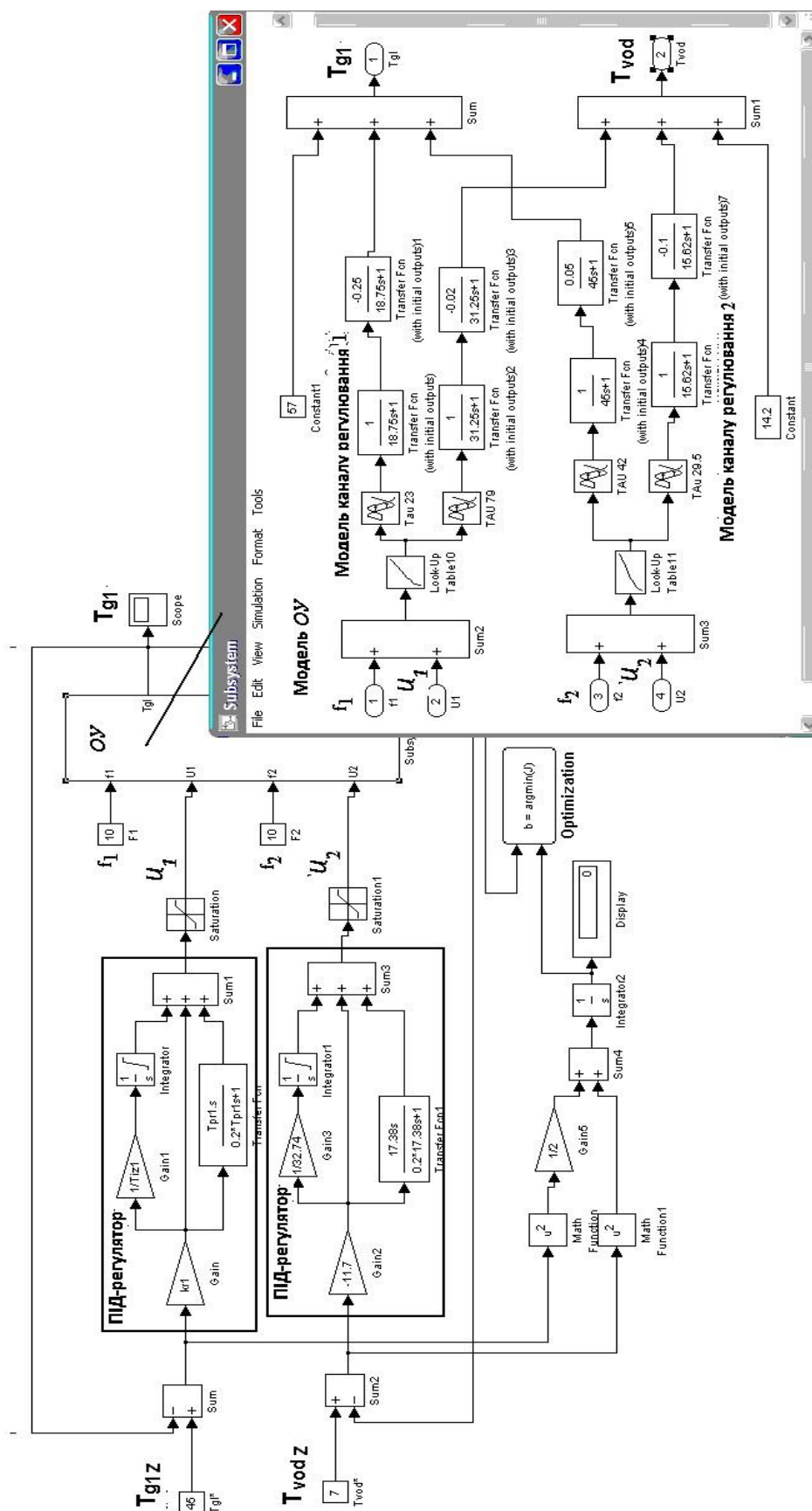


Рисунок 3.3. Структурна схема моделі САУ з традиційними ПІД-регуляторами і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів було встановлено задане значення регульованої зміни і визначені допустимі короткочасні відхилення протягом часу не більше 5 хвилин. 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 300 кроків оптимізації, достатньо великий діапазон пошуку значень оптимізуючи параметрів. Параметри канали регулювання були визначені при умові розгляду лінійний моделі отриманою в результаті відповідної ідентифікації.

Оптимізація

Конкретизація задачі оптимального параметричного синтезу (ОПС)

☐ ОПС в умовах параметричної невизначеності ОК.
☒ ОПС при фіксованих параметрах ОК.

Параметри об'єкту керування (ОК)

Імена параметрів: k tau T
 Номінальні значення: 1 18.4 18.75
 Нижні значення діапазонів:
 Верхні значення діапазонів:

Параметри що оптимізуються (аргументи)

Імена параметрів: kr1 Tiz1 Tpr1
 Початкові наближення: -5.84 29.38 17.78
 Нижні обмеження: -30 10 5
 Верхні обмеження: 0 60 60

Умови оптимізації (Симплекс метод Нелдера-Міда)

Максимальна кількість кроків процедури оптимізації: 100
 Мінімальне прирощення аргументів: 0.01
 Мінімально значуще прирощення критерію: 0.001

Візуалізація результатів

Кількість графіків: 2
 Імена змінних що відображаються на графіках: y, x

Старт Відміна

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 як за відповідним інтегральним критерієм якості роботи системи.

На рисунку 3.5 представлена вікно результату оптимізації за відповідним критерієм на 200 кроків. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання, не помітно покращилася після оптимізації САУ. Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи управління. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

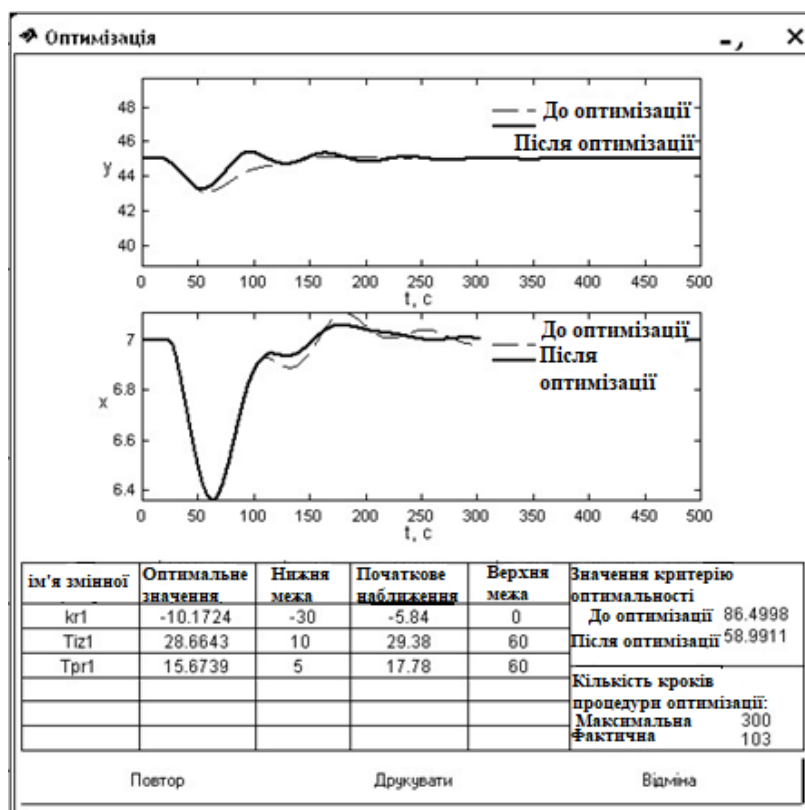


Рисунок 3.5 Вікно результату оптимізації САР з традиційними ПД регуляторами

Також біла проведена перевірка на грубість САР з каналом регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою. САР була відповідно з оптимізованим ПД-регулятором 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.

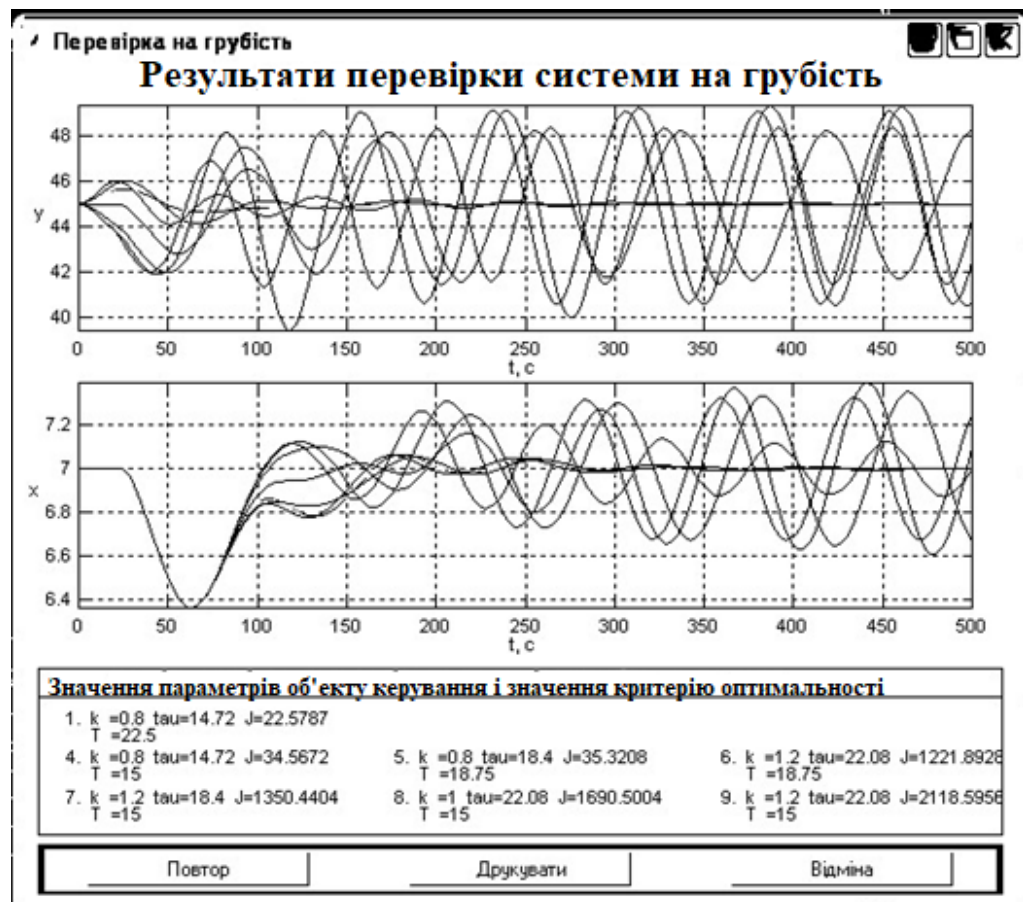


Рис. 3.6 – Результати перевірки САР на грубість

Згідно з результатами, що представлені на рисунку 3.6, можна зробити висновок що система не 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. Обидва шляхи можуть використовуватися в ПД-

контролері одночасно. В нашому випадку нечітка логіка використовується для побудови самого регулятора за відомими схемами. Складність опису статичних режимів роботи об'єкта приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними. Таким чином, у справжній роботі була реалізована модель САР 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 ПРегулятор і його застосування для керування парогенератором. З того часу область застосування нечітких регуляторів постійно розширюється, збільшується різноманітність їх структур і виконавчих функцій.

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

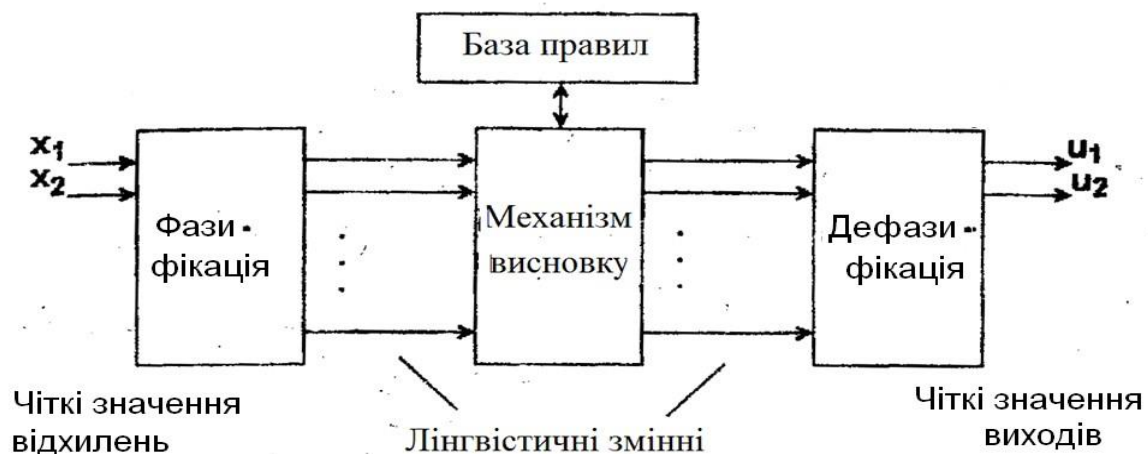


Рисунок 3.7. Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками. Всі визначені блоки (фазіфікація, блок логічного розв'язку, дефазіфікація), що представлені на рисунку 3.7, редагуються у відповідному редакторі FIS Editor

середовища MATLAB. Для запуску вікна fіs-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 fіs-файлу для нечіткого регулятора температури глюколю T_{gl} з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

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

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

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

ПРАВИЛО <1>: ЯКЩО $(x \in A_1 \mid y \in B_1)$, ТО, $z_1 = f(x_1, \dots, x_n)$.

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

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

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

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

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

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

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

де C_1, C_2 — звичайні (чіткі) числа.

Далі алгоритм виконується за наступними етапами:

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

A_1, A_2, B_1, B_2 .

2. Агрегування передумови в нечітких правилах продукцій. Для знаходження ступеня істинності умов всіх правил нечітких продукцій, як правило, використовується логічна операція 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 управління, можна визначити наступні п'ять правил функціонування НЛР у форматі «if – then», як показано вище у форматі (1):

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

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

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

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

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

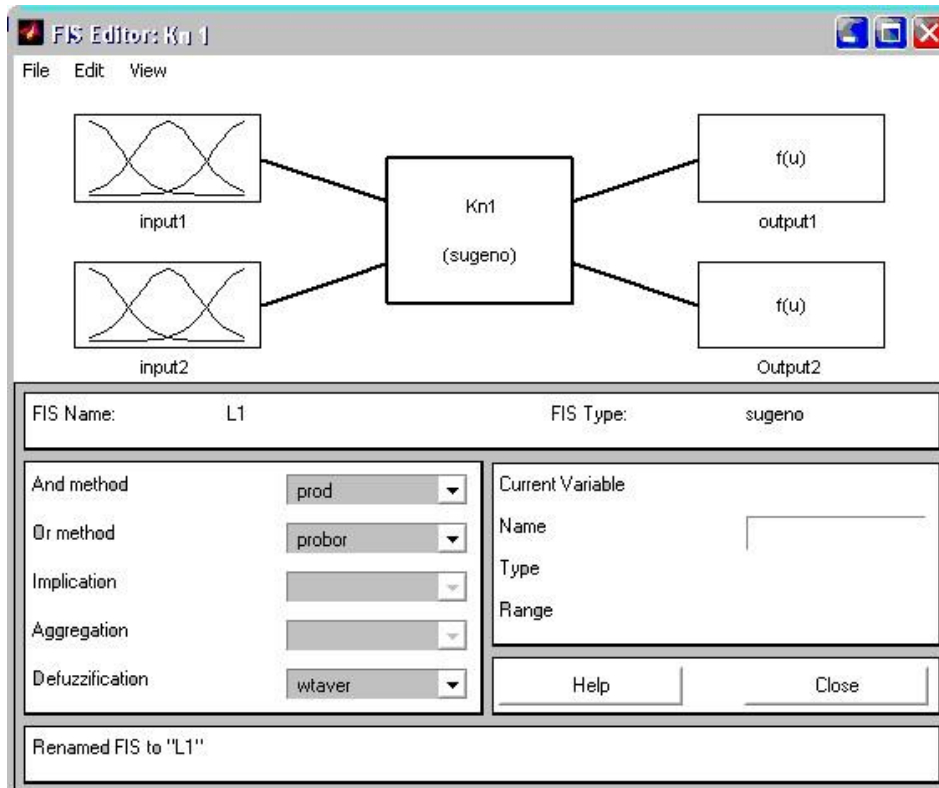


Рисунок 3.8. Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

Відповідно вище представленим правилам складемо таблицю баз знань для НЛР температури глюколю T_{gl} .

Як видно з рисунку 3.8, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки регулювання (input2). Для змінної input1 задаємо три трикутні функції приналежності «trimf». Це проста функція приналежності і найбільш часто застосовується. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

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

[a, c] – діапазон зміни змінної, для справжнього випадку $a = -50$, $c = 50$; b - найбільш можливе значення змінної

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.9 зображено вікно налаштування функцій приналежності mf1, mf2, mf3 до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна», «приблизно нульова», «велика позитивна» відповідно. Також були визначені функції 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 3.1 бази правил функціонування регулятора, були прописані відповідні правила у вікні редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink. Це вікно з відповідними правилами зображено на рисунку 3.11.

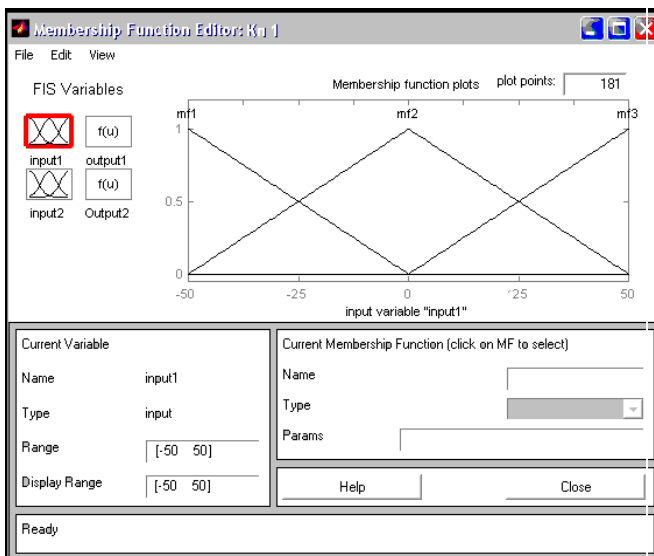


Рисунок 3.9. Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

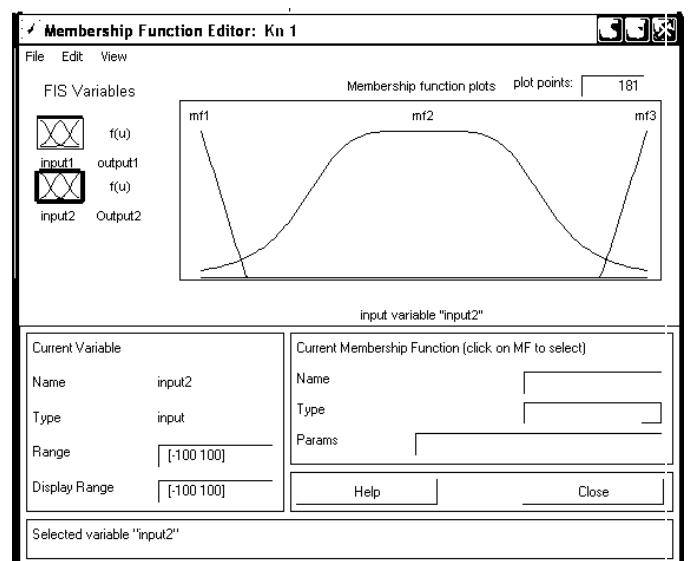


Рисунок 3.10. Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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 глюколю Tgl

$e_l \backslash \Delta e_l$	NE (Велика негативна Δe_l)	Z (приблизно нульова Δe_l)	PE (Велика позитивна Δe_l)
NE	–	$u_l = 51;$ $\Delta u_l = 0,64;$	–
Z	$u_l = 51;$ $\Delta u_l = 0,64;$	$u_l = 0;$ $\Delta u_l = 0;$	$u_l = -52;$ $\Delta u_l = -0,64;$
PE	–	$u_l = -52;$ $\Delta u_l = -0.64;$	–

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 fisфайлу було вибрано File / Save to Workspace для завантаження у робочій простір середовища MATLAB нечіткого алгоритму управління.

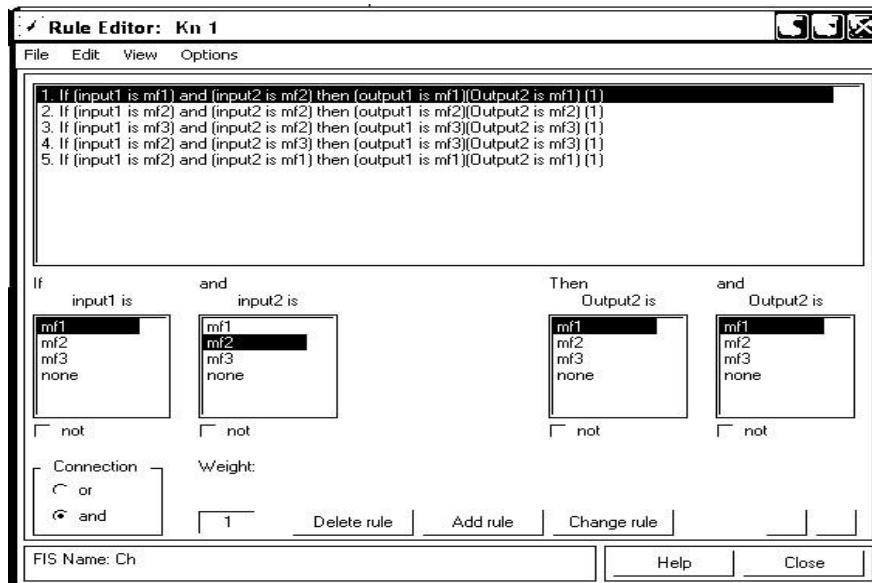


Рисунок 3.11. Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

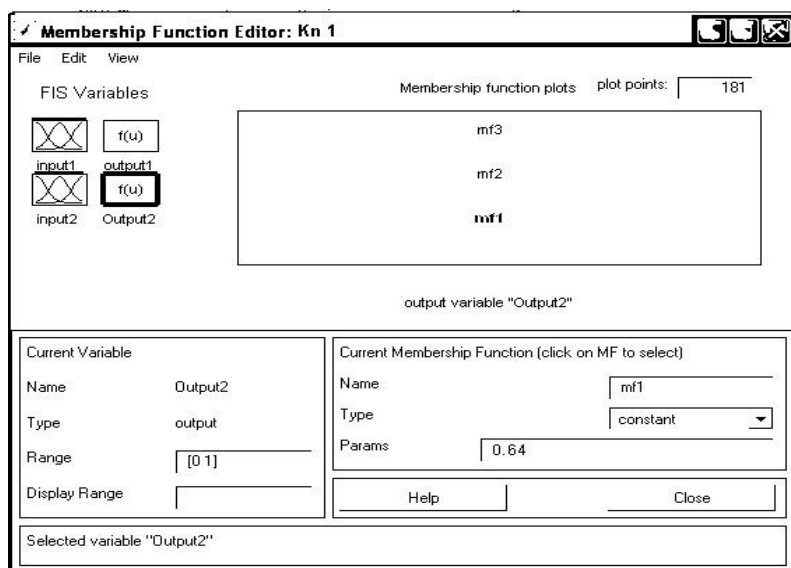


Рисунок 3.12. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з нечітким регулятором, яка представлена на рисунку 3.14. З рисунку 3.14 видно, що управляюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

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

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

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

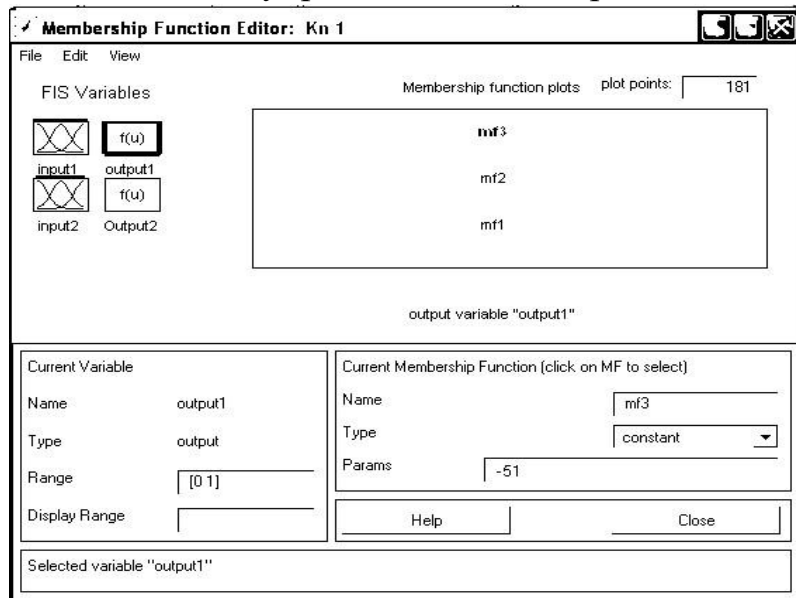


Рисунок 3.13. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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

Аналогічним чином можливо синтезувати нечіткий регулятор для регулювання температури води T_{Vod} . 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 Tg_1 але вихідні лінгвістичні зміни мають інші значення.

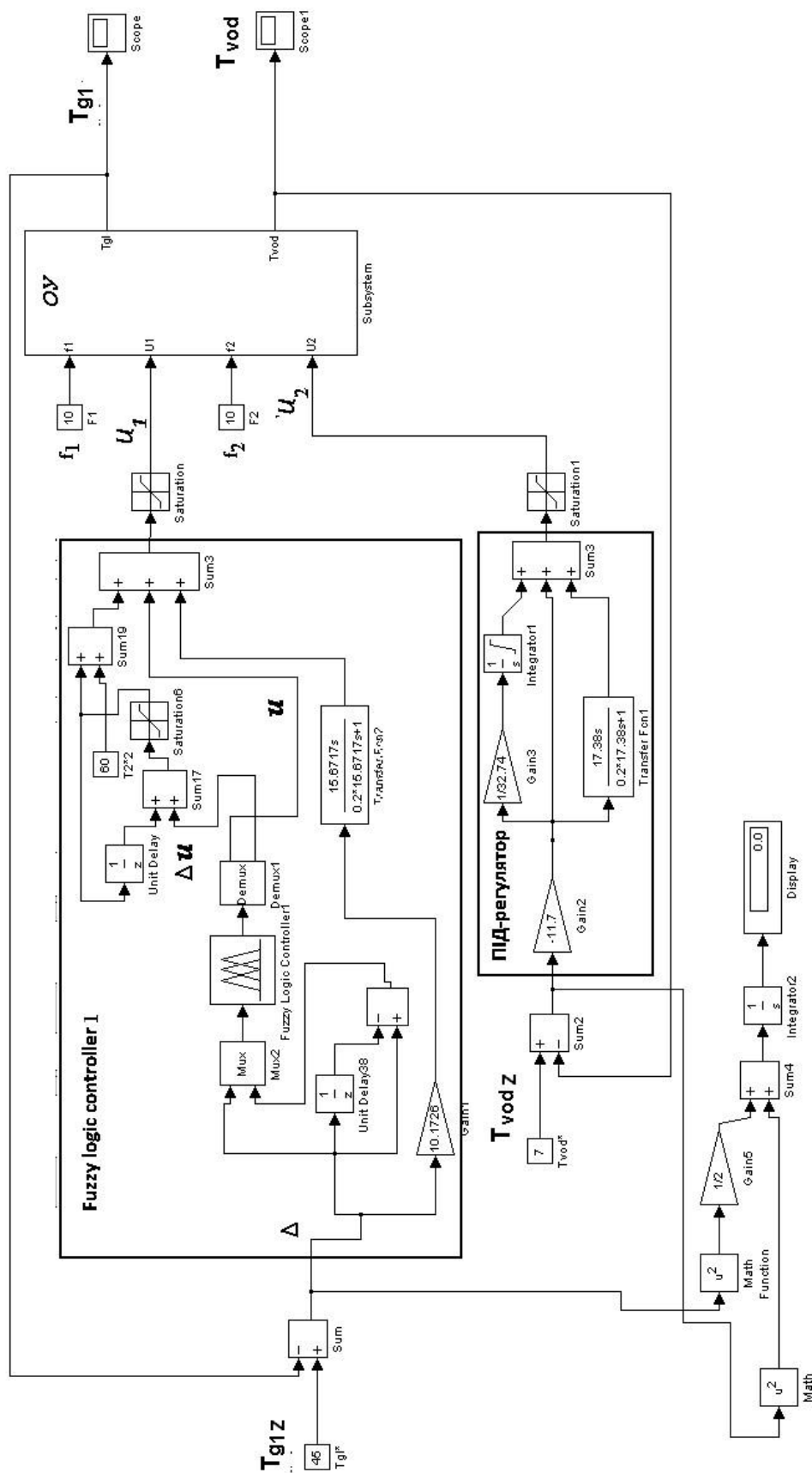


Рисунок 3.14 – Структурна схема моделі САУ з нечітким регулятором температури T_{g1} і ПД регулятором температури води, T_{vod} що реалізована засобами середовища MATLAB\Simulink

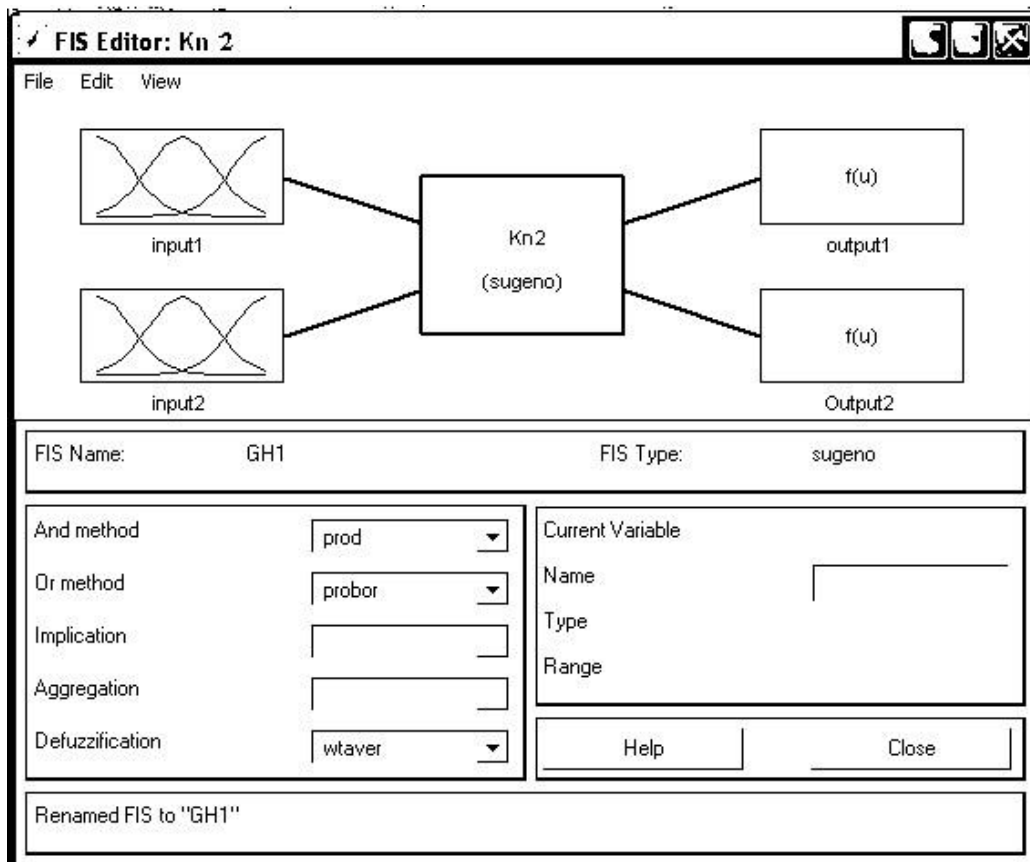


Рисунок 3.15. Вікно редактора нечіткого регулятора температури води T_{vod} з двома входами і двома виходами сигналів

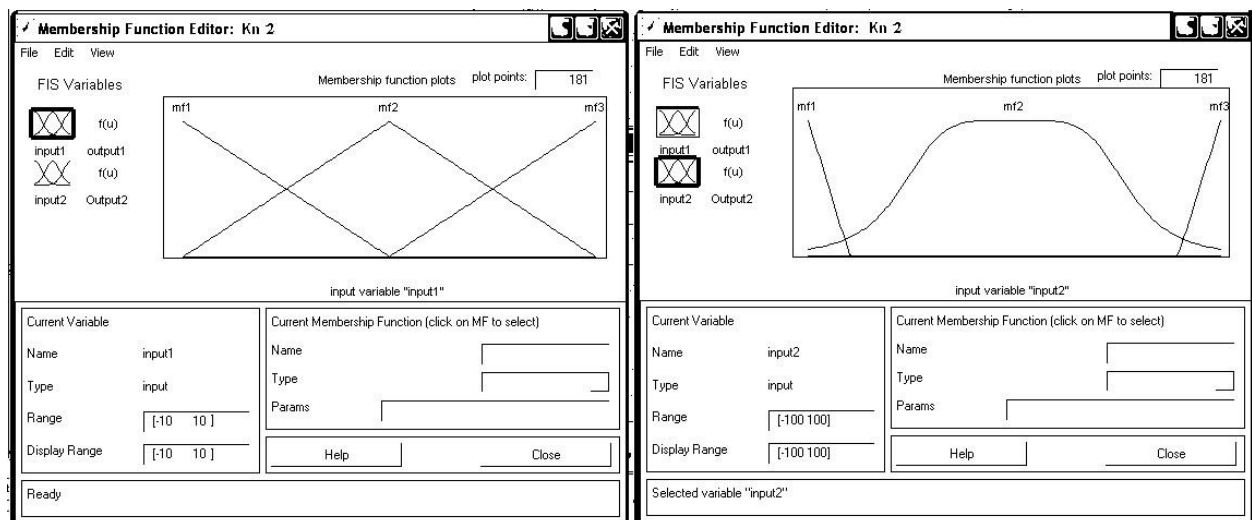


Рисунок 3.16. Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

Так на рисунку 3.18 . представлені вікна редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink на основі яких можливо сформуванати таблицю бази правил нечіткого регулятора температури води $T_{вод}$. 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.

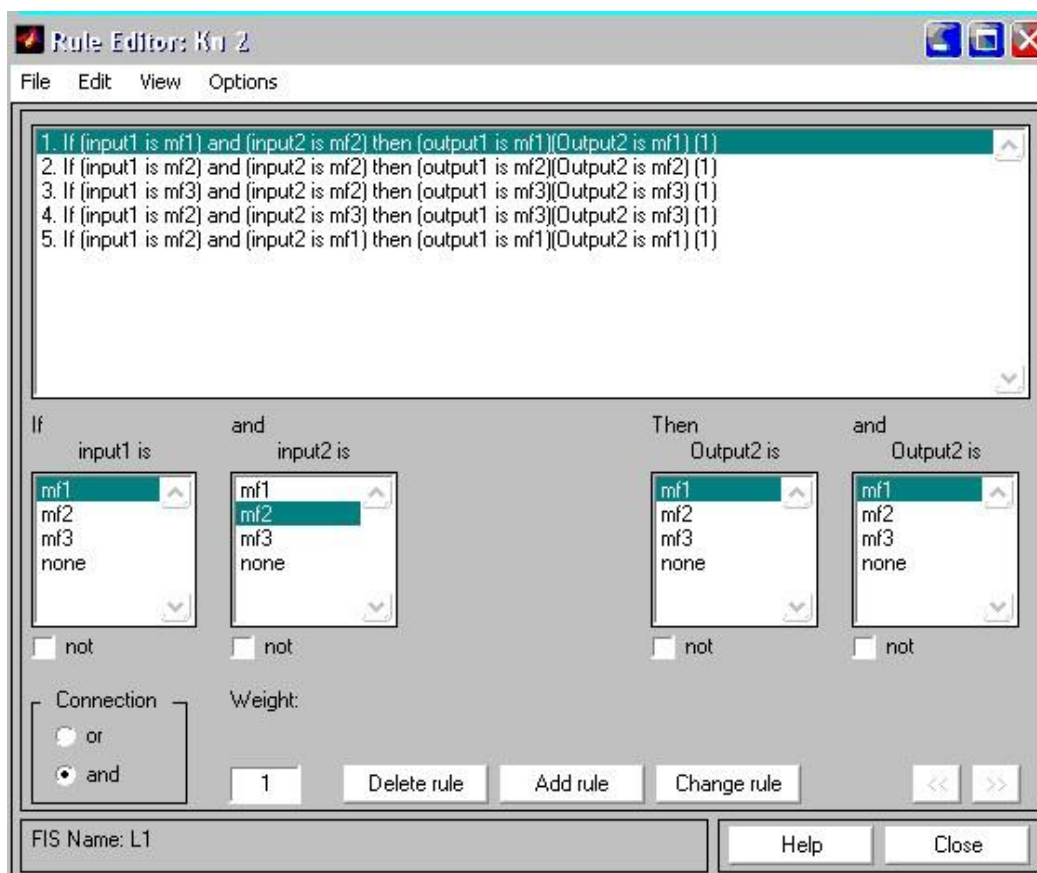


Рисунок 3.17. Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

Таблиця 3.2 – Таблиця бази знань для нечіткого регулятора температури води T_{vod}

e_I \ Δe_I	NE	Z	PE
	(Велика негативна Δe_I)	(приблизно нульова Δe_I)	(Велика позитивна Δe_I)
NE	–	$u_I = -35;$ $\Delta u_I = -1.1;$	–
Z	$u_I = -35;$ $\Delta u_I = -1.1;$	$u_I = 0;$ $\Delta u_I = 0;$	$u_I = 35;$ $\Delta u_I = 1.1;$
PE	–	$u_I = 35;$ $\Delta u_I = 1.1;$	–

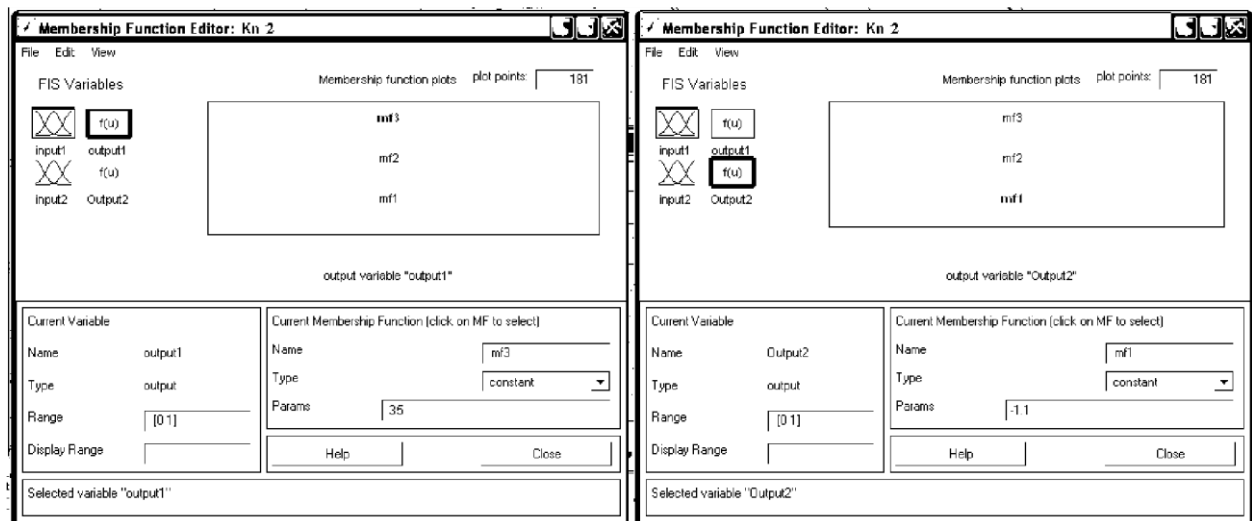


Рисунок 3.18. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB/Simulink

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 глюколю Tg_l при використанні нечіткого і традиційного ПІД регулятора і графіки перехідних процесів в САУ з нечітким регулятором температури води $Tvod$. 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 ПІД-регулятором. З графіків перехідних процесів що представлені на рисунках 3.20 та 3.21 можливо побачити що САУ з нечітким регулятором за температурою Tg_l та за температурою $Tvod$ функціонує за якістю регулювання також само як САУ з традиційними ПІД регуляторами.

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

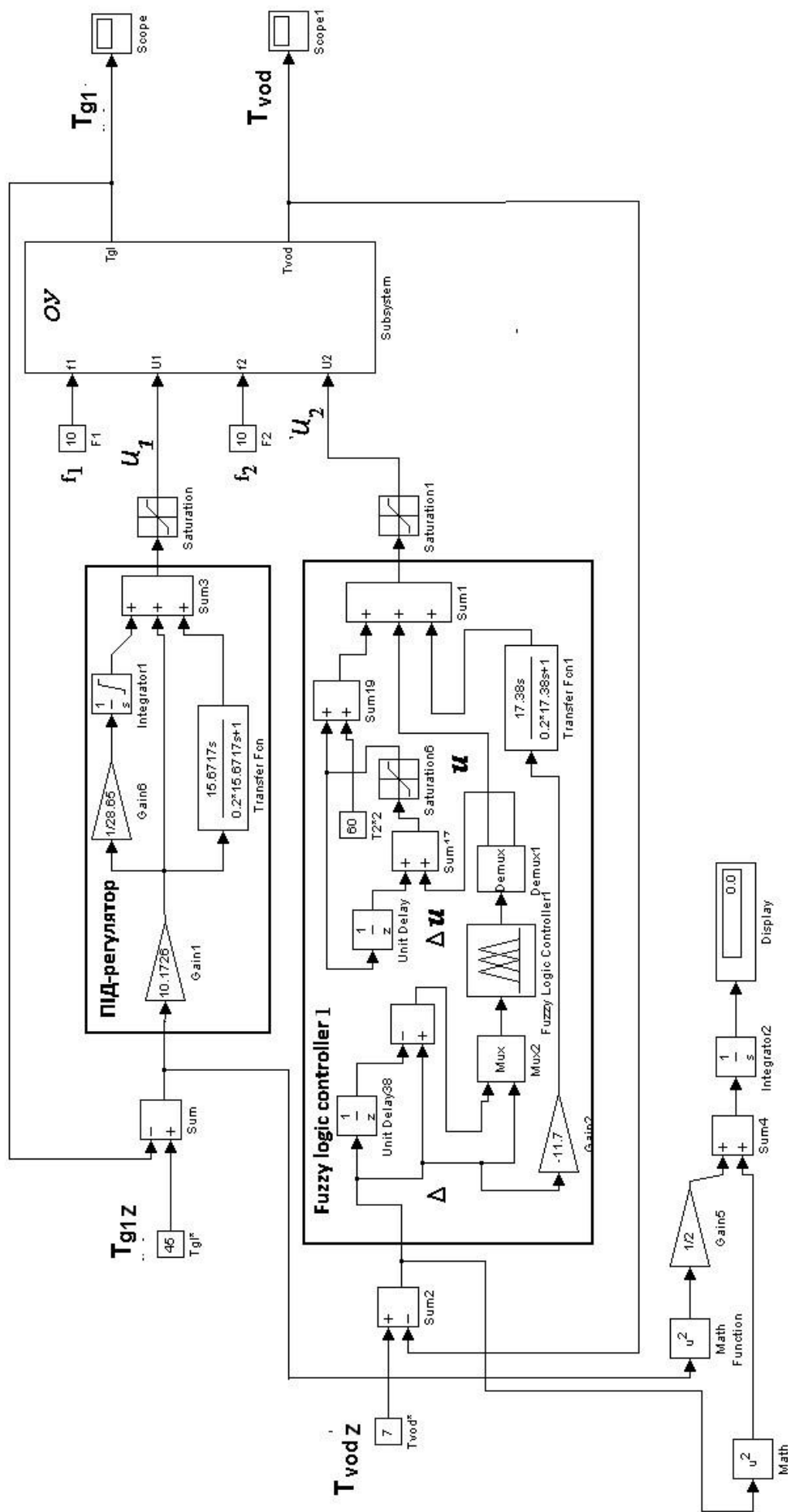


Рисунок 3.19 –Структурна схема моделі САУ з нечіткими регуляторами за температурою води T_{vod} і ПІД-регулятором температури T_{g1} , що реалізована засобами середовища MATLAB\Simulink

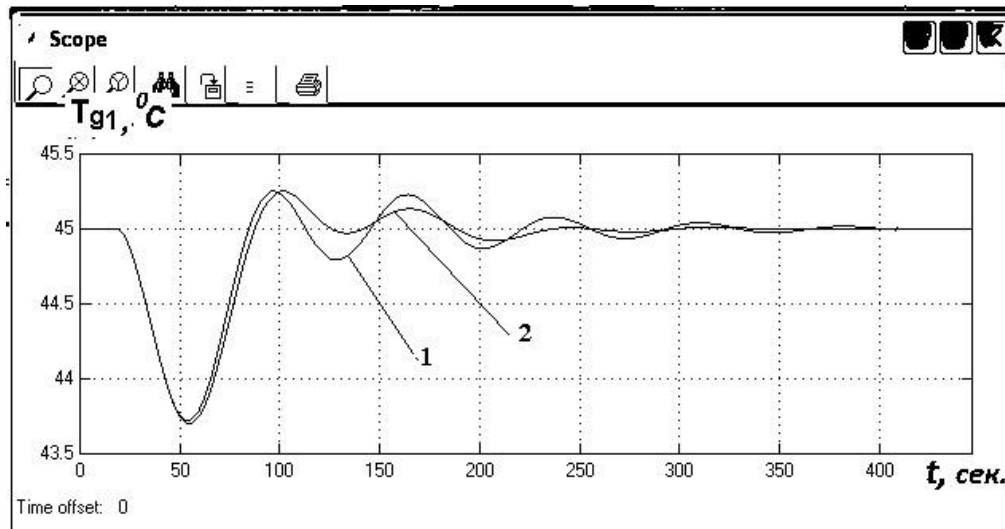


Рисунок 3.20. Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1– перехідний процес у САУ з ПД регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором температури T_{g1} ;

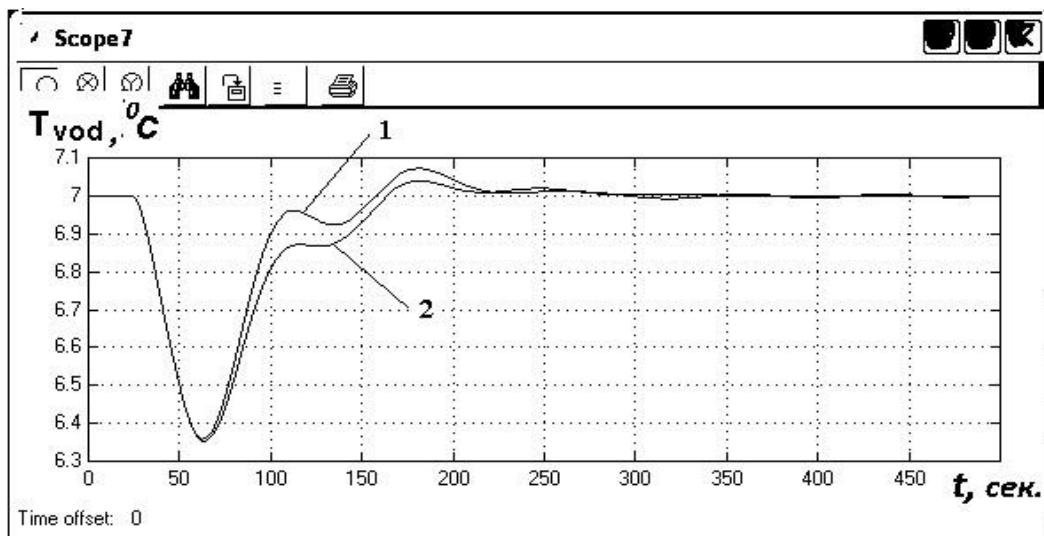


Рисунок 3.21. Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графіки 1– перехідний процес у САУ з ПД регулятором; Графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором температури води T_{vod}

3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління

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

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

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 — нейроуправління (neurocontrol).

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

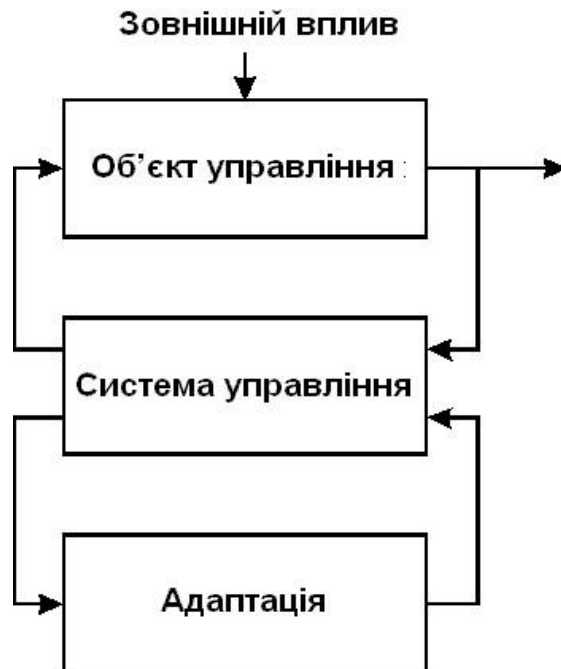


Рисунок 3.22. Загальна схема адаптивної системи керування

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.

3.7 Розробка моделі САР з нейрорегулятором

Штучна нейронна мережа, що характеризується нелінійними характеристиками може виступати як нейрорегулятор. 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 – багатошарова, застосовується в якості регуляторів нейромережевих алгоритмів управління.

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятор визначає приріст управляючої дії як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейронрегулятора необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку буде використано гіперболічну тангенціальну функцію (tansig). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі управління. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.23.

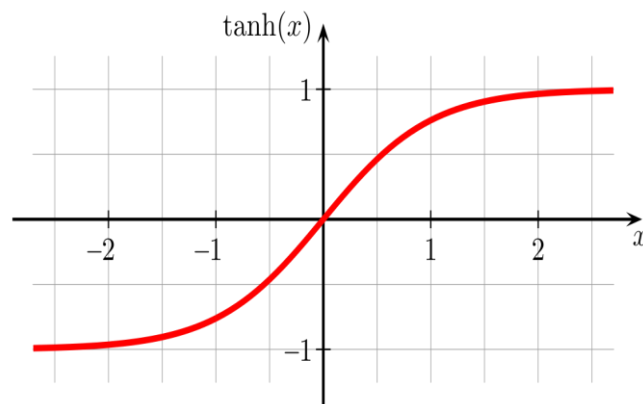


Рисунок 3.23. Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейронрегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

В одній з перших робіт з нейроуправління представляється дискретна СУ із НК, що одержує на вхід сигнал керування системою $u_r(k)$ і затримані в кілька разів сигнали з виходу об'єкта керування. У загальному випадку НК такого типу може одержувати і затримані сигнали зі свого виходу (рисунок 3.24). 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.

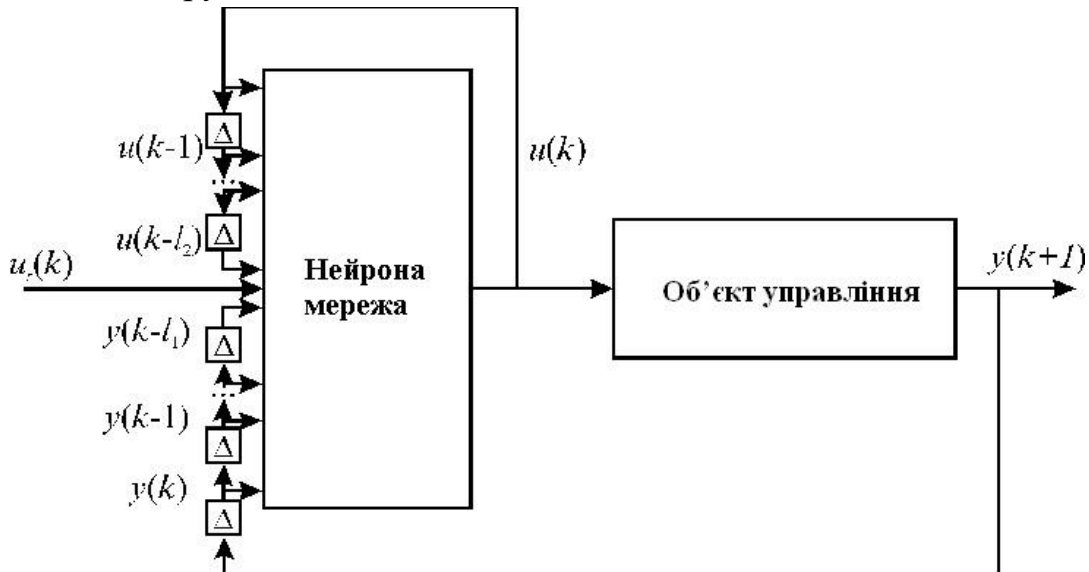


Рисунок 3.24 Система керування з нейроконтролером

В системах може бути присутній комбінований регулятор — це традиційний ПД регулятор з нелінійними перетворювачами на базі ШНМ. Якщо перший тип САУ з комбінованим регулятором є компромісним розв'язком у рамках класичного підходу, то другий тип що представлений на рисунку 3.36 побудований тільки на ШНМ.

В цьому другому випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.25.

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

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

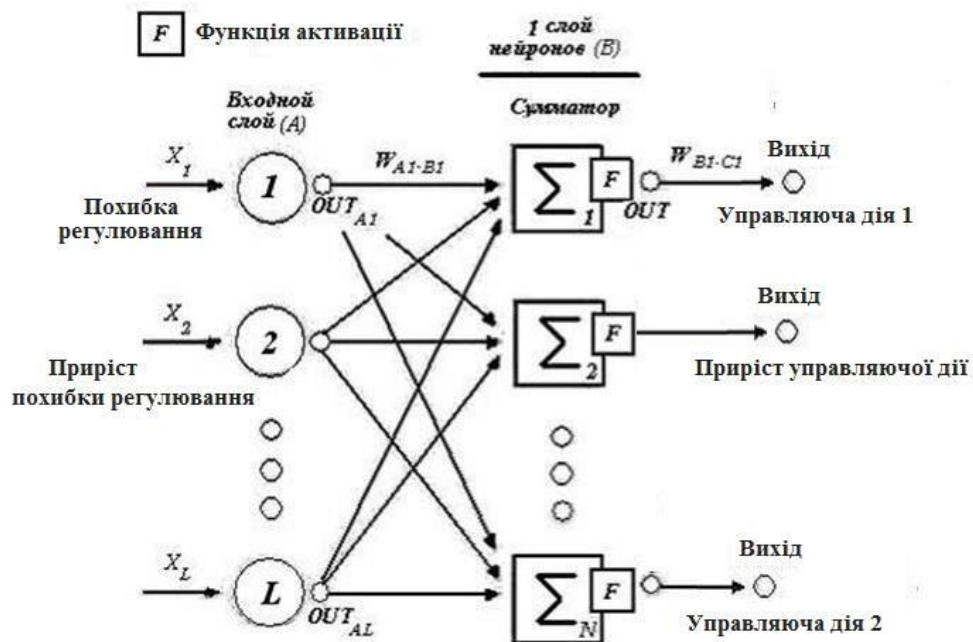


Рис. 3.25– Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

Такий функціонал відповідає за поточний станом системи як показано на рисунку 3.26.

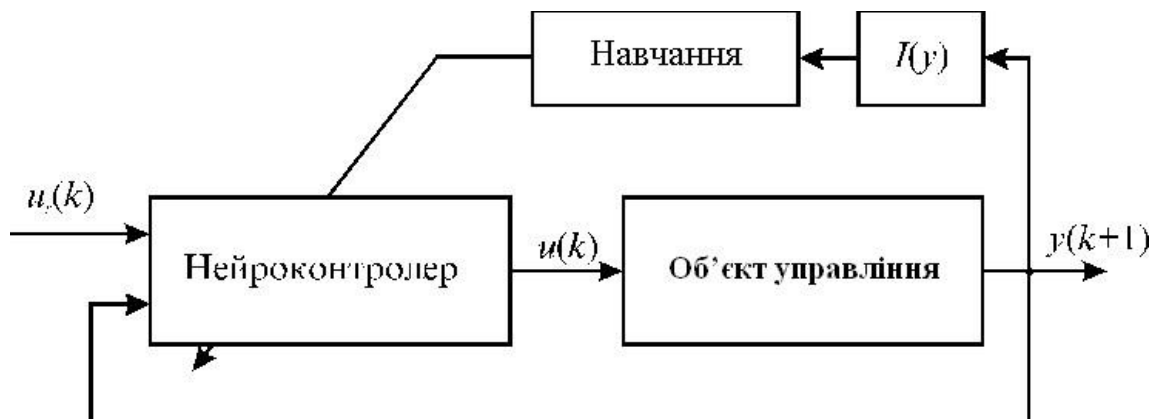


Рисунок 3. 26 Нейромережева система керування з показником якості регулювання

Якщо розглядати другий варіант нейромережевого алгоритму управління то нейрорегулятор можливо спочатку налаштувати також за методом зворотного поширення. В цьому випадку треба визначити кількість визначених похибок

регулювання для тренування нейронної мережі. На рисунку 3.27 також зображені похибки на кожному нейроні для коректування ваг за методом зворотного поширення. Якщо така структура буде недостатня, то необхідно буде збільшити кількість нейронів в вхідному шарі мережі та збільшити кількість шарів до трьох.

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

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

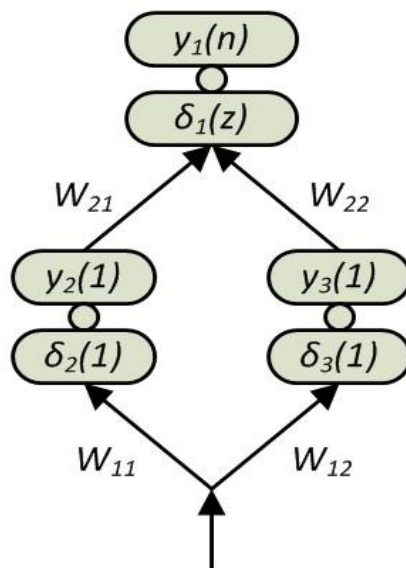


Рисунок 3.27 Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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 3.28.

Таблиця 3.3 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	l	u	Δu
1	-50	508,6	1.775
2	-10	101,7	0.355
3	-1	10,17	0.0355
4	0	0	0
5	1	-10,17	-0.0355
6	10	-101,7	-0.355
7	50	-508,6	-1.775
8			

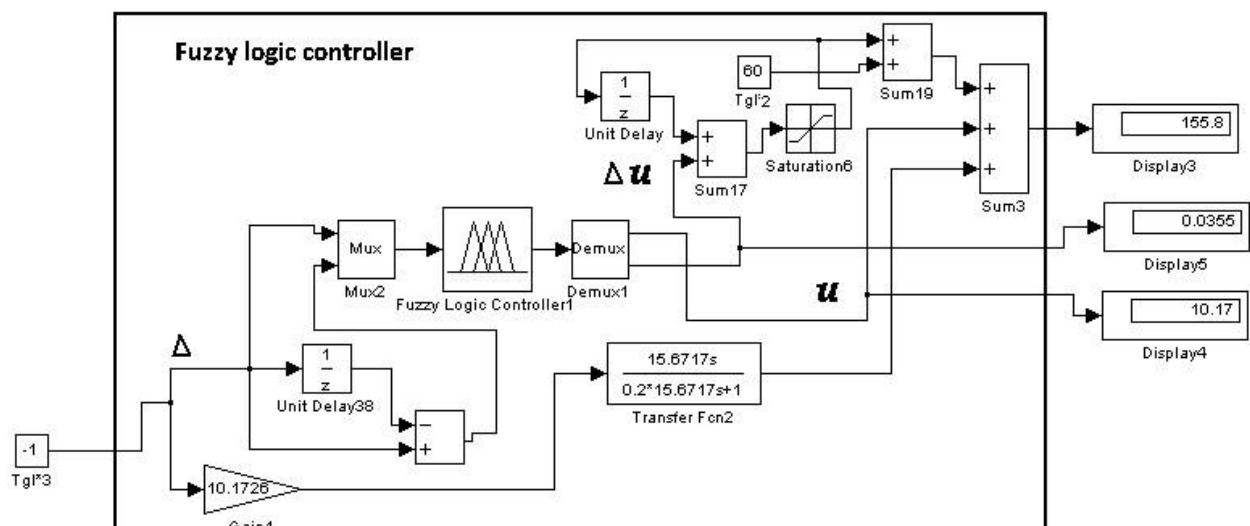


Рисунок. 3.28 – Схема моделювання для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.29 і 3.30 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у

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

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

```
» P=[-50 -10 -1 0 1 10 50];
» T=[0.5086 0.1017 0.01017 0 -0.010 -0.101 -0.509];
» net = newff([-100 100],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.992267/0, Gradient 1.62443/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 6.59833e-008/0, Gradient 0.00134231/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 6.71669e-009/0, Gradient 0.0002395/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 2.93055e-009/0, Gradient 6.89241e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 1.91898e-009/0, Gradient 2.81133e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 1.48757e-009/0, Gradient 1.43032e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 1.25622e-009/0, Gradient 8.37288e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 1.11443e-009/0, Gradient 5.38472e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 1.01966e-009/0, Gradient 3.70124e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 9.52363e-010/0, Gradient 2.67239e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 9.02406e-010/0, Gradient 2.00369e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 7.23047e-010/0, Gradient 3.36516e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 6.76754e-010/0, Gradient 1.09966e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P) a
=
0.5086 0.1017 0.0101 0.0001 -0.0100 -0.1010 -0.5090 »
gensim(net)
```

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help

>> P=[-50 -10 -1 0 1 10 50];
>> T=[0.5086 0.1017 0.0101 0 -0.010 -0.101 -0.509];
>> net = newff([-100 100],[2 1],{'tansig','tansig'});
>> net.trainParam.epochs=300;
>> net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.992267/0, Gradient 1.62443/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 6.59833e-008/0, Gradient 0.00134231/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 6.71669e-009/0, Gradient 0.0002395/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 2.93055e-009/0, Gradient 6.89241e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 1.91898e-009/0, Gradient 2.81133e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 1.48757e-009/0, Gradient 1.43032e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 1.25622e-009/0, Gradient 8.37288e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 1.11443e-009/0, Gradient 5.38472e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 1.01966e-009/0, Gradient 3.70124e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 9.52363e-010/0, Gradient 2.67239e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 9.02406e-010/0, Gradient 2.00369e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 7.23047e-010/0, Gradient 3.36516e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 6.76754e-010/0, Gradient 1.09966e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

>> a = sim(net,P)

a =

    0.5086    0.1017    0.0101    0.0001   -0.0100   -0.1010   -0.5090

>> gensim(net)

```

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

```

>> P=[-50 -10 -1 0 1 10 50];
>> T=[0.1775 0.0355 0.00355 0 -0.00355 -0.0355 -0.1775];
>> net = newff([-100 100],[2 1],{'tansig','tansig'});
>> net.trainParam.epochs=300;
>> net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.695849/0, Gradient 4.76084/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 0.000321404/0, Gradient 0.0372708/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 4.29439e-006/0, Gradient 0.0015976/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 2.18072e-006/0, Gradient 0.000316994/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 7.11073e-007/0, Gradient 0.00176719/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 3.57758e-007/0, Gradient 0.000342999/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 2.43425e-007/0, Gradient 0.000143249/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 1.84078e-007/0, Gradient 7.83272e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 1.46985e-007/0, Gradient 4.91944e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 4.8149e-008/0, Gradient 0.00036959/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 3.29771e-008/0, Gradient 0.00048471/1e-010

```

TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 3.01021e-008/0, Gradient 0.000244588/1e-010
 TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 2.85411e-008/0, Gradient 0.000152011/1e-010
 TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a = sim(net,P) a

=

0.1774 0.0359 0.0035 -0.0001 -0.0037 -0.0355 -0.1775 »

gensim(net)

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
[Icons] ?

»
» P=[-50 -10 -1 0 1 10 50];
» T=[0.1775 0.0355 0.00355 0 -0.00355 -0.0355 -0.1775];
» net = newff([-100 100],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.695849/0, Gradient 4.76084/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 0.000321404/0, Gradient 0.0372708/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 4.29439e-006/0, Gradient 0.0015976/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 2.18072e-006/0, Gradient 0.000316994/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 7.11073e-007/0, Gradient 0.00176719/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 3.57758e-007/0, Gradient 0.000342999/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 2.43425e-007/0, Gradient 0.000143249/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 1.84078e-007/0, Gradient 7.83272e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 1.46985e-007/0, Gradient 4.91944e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 4.8149e-008/0, Gradient 0.00036959/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 3.29771e-008/0, Gradient 0.00048471/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 3.01021e-008/0, Gradient 0.000244588/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 2.85411e-008/0, Gradient 0.000152011/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a = sim(net,P)
a =
    0.1774    0.0359    0.0035   -0.0001   -0.0037   -0.0355   -0.1775

» gensim(net)

```

Рисунок 3.30 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.31, з яких можливо побачити, що десь на 200-м кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями було закінчено.

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі. На рисунках 3.29 та 3.30 зображено бажані та фактичні значення вихідного

сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову та Π – складову нейрорегулятора температури.

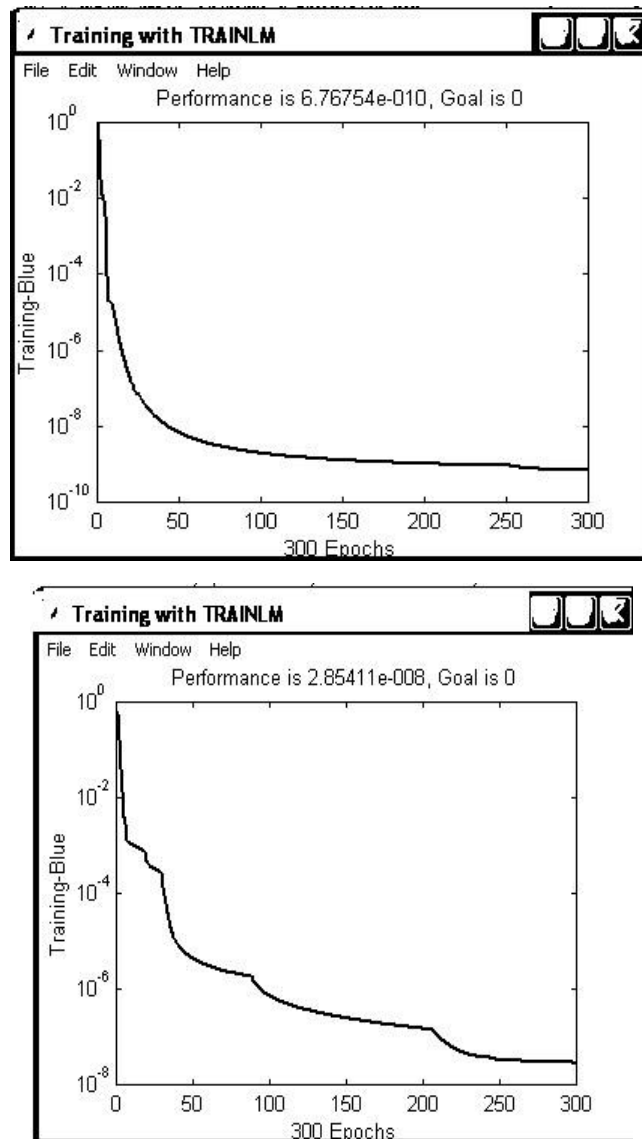


Рисунок 3.31 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених в програмах на рисунках 3.29 і 3.30, 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 Π – складової нейрорегулятора наступний:

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 3.27:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0101 - 0.01017) * (0.0101) * (1 - 0.0101) = 0,000009966648 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) * 0,000009966648 = \\ &= -0.0000000143 \\ \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) * 0,000009966648 = \\ &= 0.0000000351 \end{aligned}$$

Розрахунок помилок для I – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\delta_1(z) = (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) =$$

$$= (0.0359 - 0.0355) * (0.0359) * (1 - 0.0359) = 0.03330085$$

Розрахунок помилки для і-тих нейронів прихованого шару:

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

$$= 0.9599 * (1 - 0.9599) * 7.3655548636428527 * 0.0333 = 0.009443$$

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

$$= 0.9766 * (1 - 0.9766) * (-7.3307275810928836) * 0.0333 = -0.005578$$

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 3.32. У такий спосіб була синтезована модель САУ з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.32.

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.33, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.32.

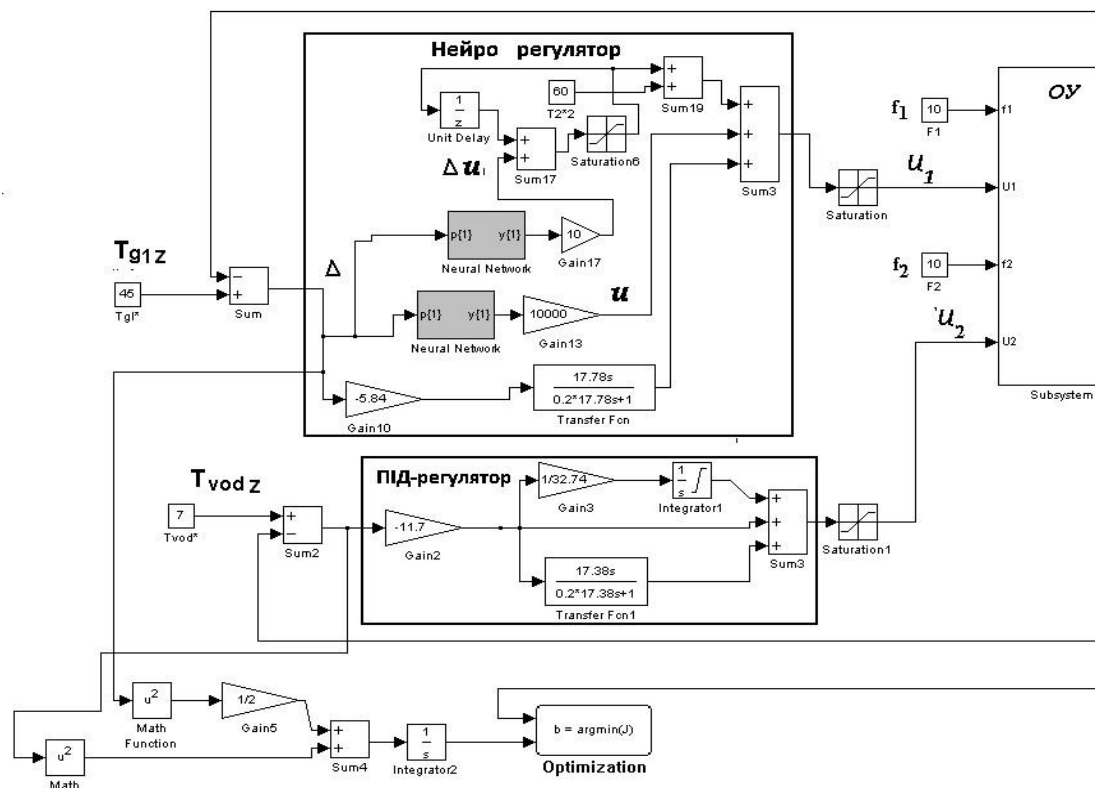


Рисунок 3.32 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

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 3.34. 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 400 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПІД регулятором, і так само 380 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.

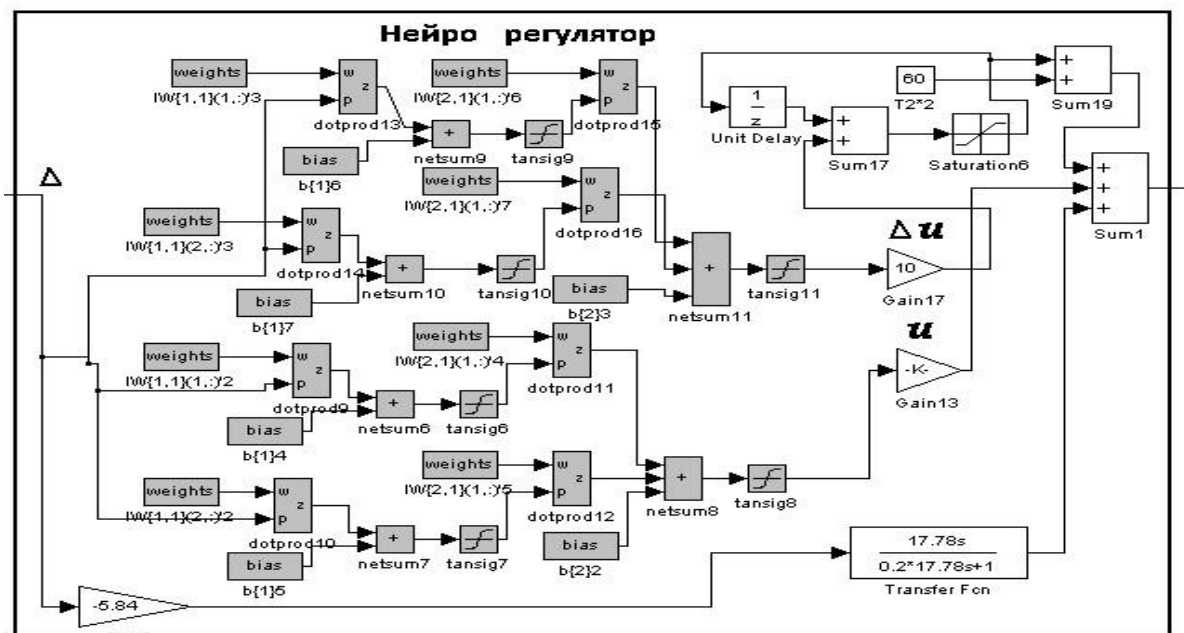


Рисунок 3.33 – Схема моделювання нейронного регулятора

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.

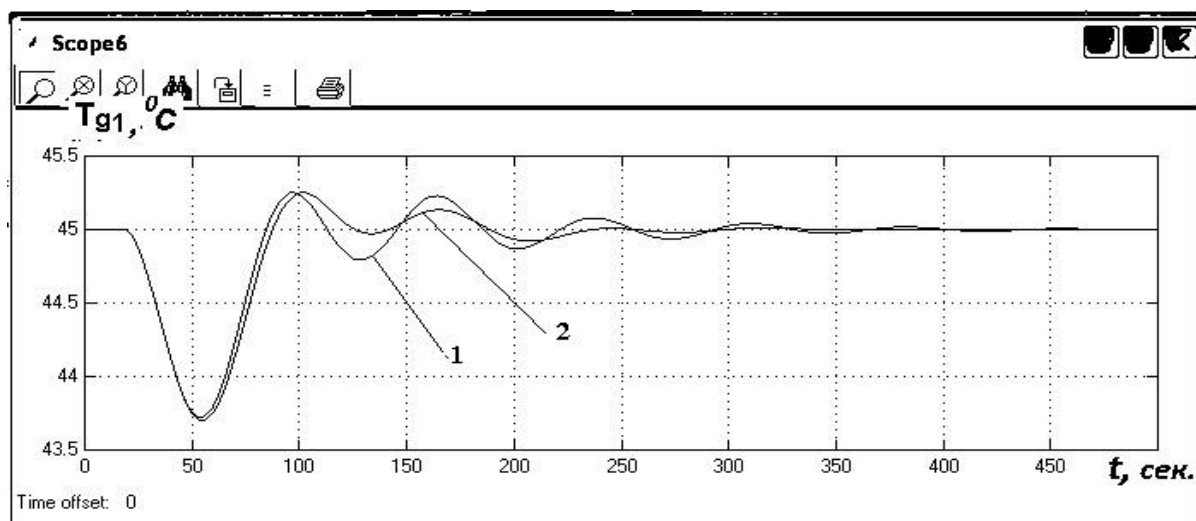


Рисунок 3.34. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з ПІДрегулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нейро регулятором

Аналогічним чином бути також само може бути синтезований нейрорегулятор температури води T_{vod} .

3.8 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегуляторами

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

Таким чином, інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний відповідно таким же, як при оптимізації САУ з традиційним ПД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була спочатку визначена модель САУ з

нейрорегулятором за температурою T_{g1} і параметричним оптимізатором, структурна схема яка відображена на рисунку 3.35. Таким чином, оптимізація проводилась послідовно спочатку оптимізувався нейрорегулятор температури T_{g1} при наявності ПД-регулятора температури води T_{vod} , а потім може оптимізувався нейрорегулятор температури води T_{vod} при наявності ПД регулятора температури T_{g1} .

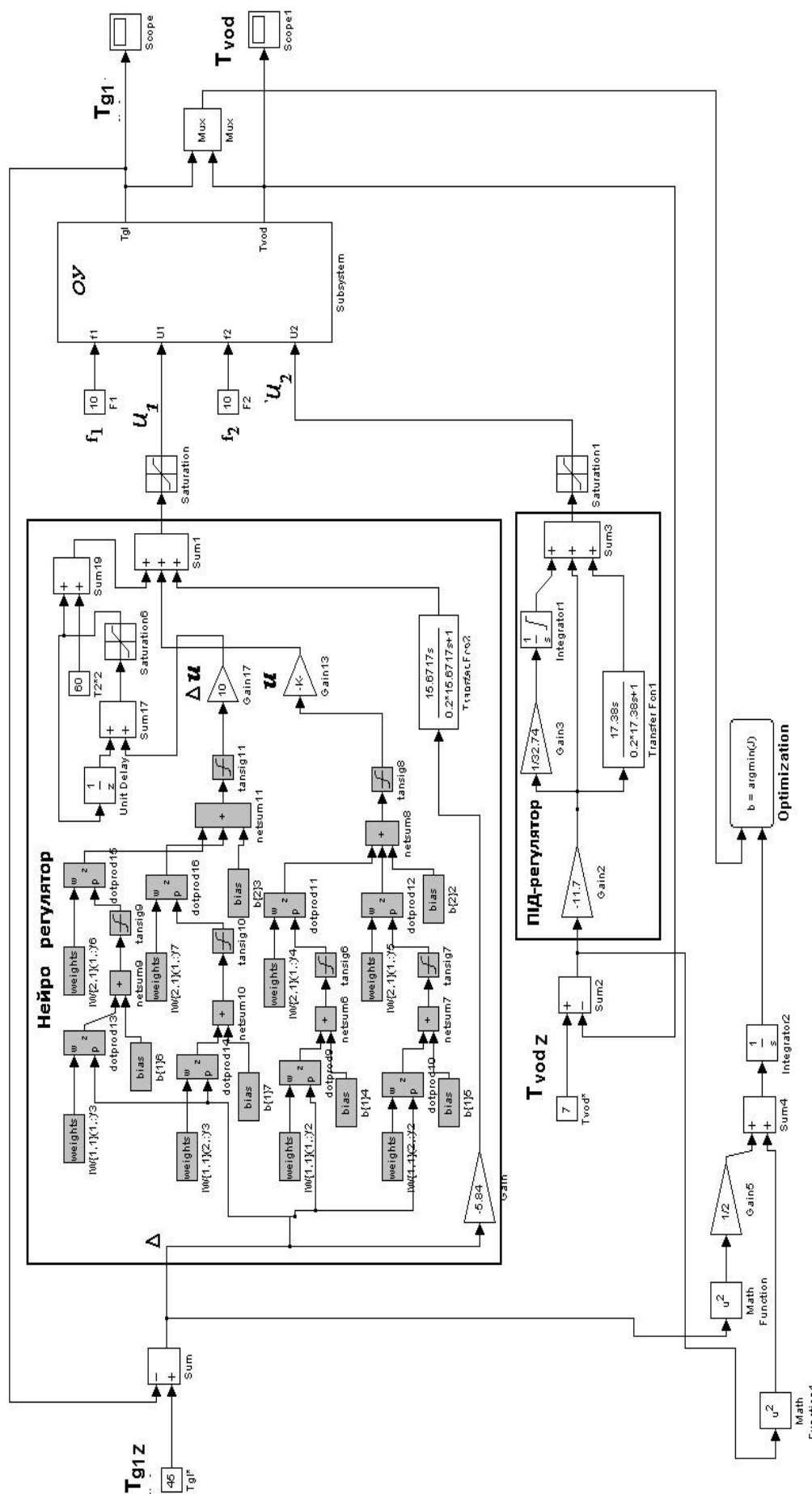


Рисунок 3.35 –Структурна схема моделі САУ з нейро регулятором за температурою T_{g1} і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленому рисунку 3.37.

Конкретизація задачі оптимального параметричного синтезу (ОПС)

☐ ОПС в умовах параметричної невизначеності ОК.
☒ ОПС при фіксованих параметрах ОК.

Параметри об'єкту керування (ОК)

Імена параметрів: k tau T
 Номінальні значення: 1 18.4 18.75
 Нижні значення діапазонів:
 Верхні значення діапазонів:
 u

Параметри що оптимізуються (аргументи)

Імена параметрів: k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 l
 Початкові наближення: -0.58136 0.0005017 -0.0
 Нижні обмеження: -100 -100 -100 -100 -100
 Верхні обмеження: 100 100 100 100 100

Умови оптимізації (Симплекс метод Нелдера-Міда)

Максимальна кількість кроків процедури оптимізації: 300
 Мінімальне прирощення аргументів: 0.01
 Мінімально значуще прирощення критерію: 0.001

Візуалізація результатів

Кількість графіків: 2
 Імена змінних що відображаються на графіках: y, x

Старт Відміна

Рисунок 3.36 – Вікно для визначення початкових значень параметрів оптимізації регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

Згідно з рисунків 3.38 та 3.37 можна побачити що вдалося значно покращити якість регулювання порівнявши значення інтегральних критеріїв

якості роботи системи. Значення інтегрального показника при САР з ПІД регулятором 58 а при САР з нейрорегулятором 19.

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.

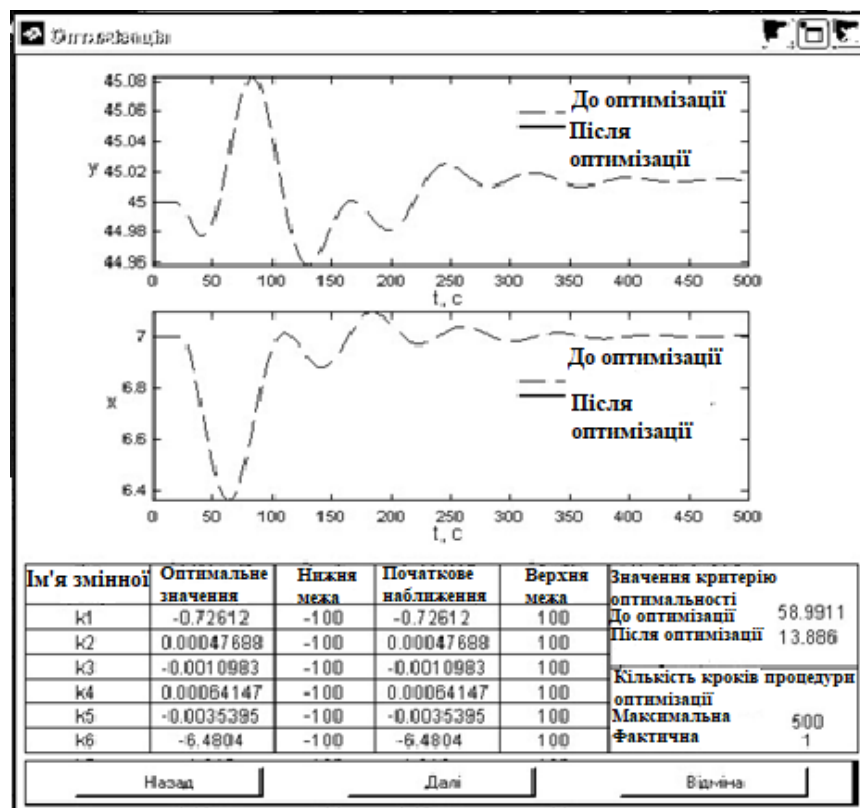


Рисунок 3.37 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

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 3.38). Параметри перевірки системи на грубість не відрізняються від попереднього випадку коли була виконана перевірка на грубість системи з ПД-регулятором.

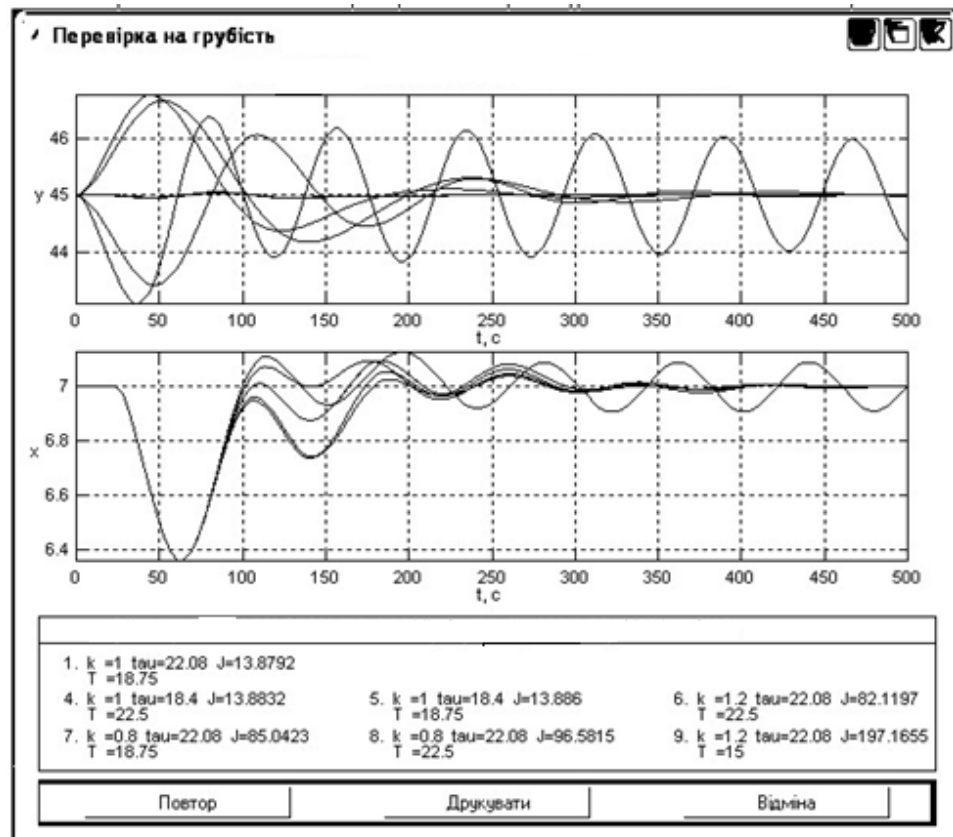


Рис. 3.38 – Вікно результатів перевірки на грубість САУ з нейрорегулятором температури T_{g1}

Згідно з результатом перевірки яка представлена на рисунку 3.38 можна зробити висновок що САУ з нейрорегулятором значно груба це дає можливість зробити висновок про принципову придатність нейрорегулятора до застосування.

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

На заключному етапі розробки САУ був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САУ за виходом системи на номінальний режим функціонування та при східчастому впливі що збурює. З графіків перехідних процесів що представлені на рисунку 3.39 можливо побачити, що час регулювання при САУ з нейронним регулятором та ПІД регулятором одноковий але максимальне динамічне відхилення в САУ з нейрорегулятором значно 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.

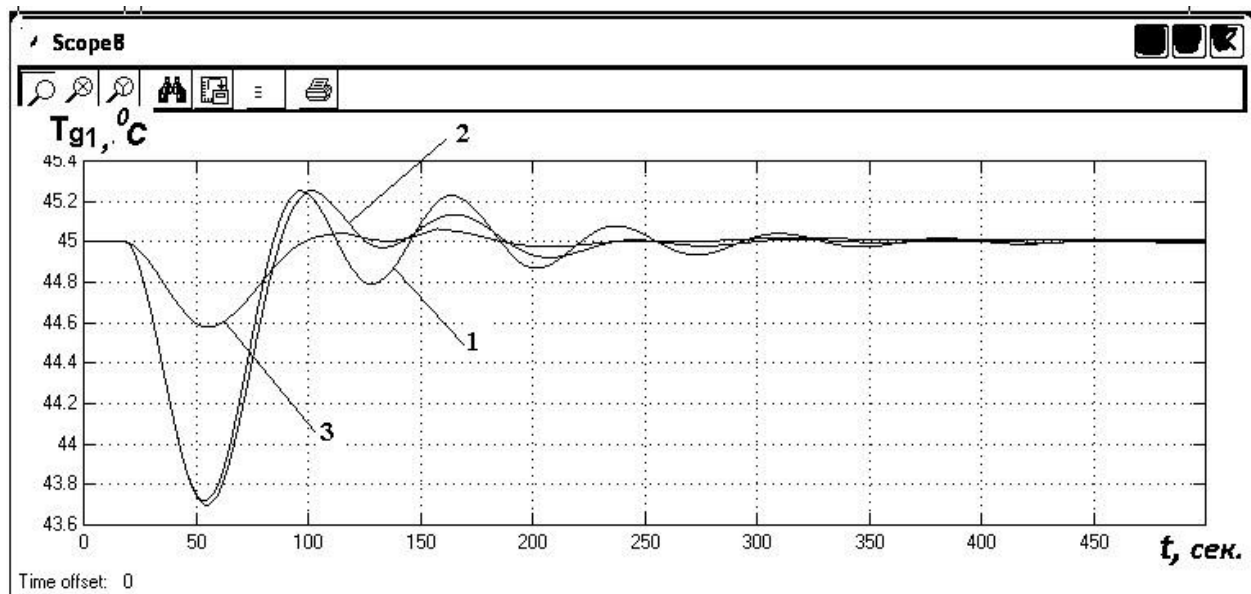


Рисунок 3.39. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 –перехідний процес у САУ з нечітким регулятором; графік 3 – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучної нейронної мережі;

Також на основі аналізатора імовірнісних характеристик, що був вбудований у середовище MATLAB\Simulink, була визначена якість регулювання різних САУ при випадкових впливах що збурюють. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень змінних регулювання різних САУ при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.40, де зображені вікно результату аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень змінних регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.40 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням найкраще функціонує САУ з нейрорегулятором. З рисунку 3.41 видно що САУ з нечітким регулятором за температурою T_{rod} функціонує найгірше від інших систем. В кінцевому випадку показники функціонування різних САУ за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.4 де були визначені показники якості функціонування оптимізованих САУ з ПДрегуляторами та САУ з нейрорегуляторами.

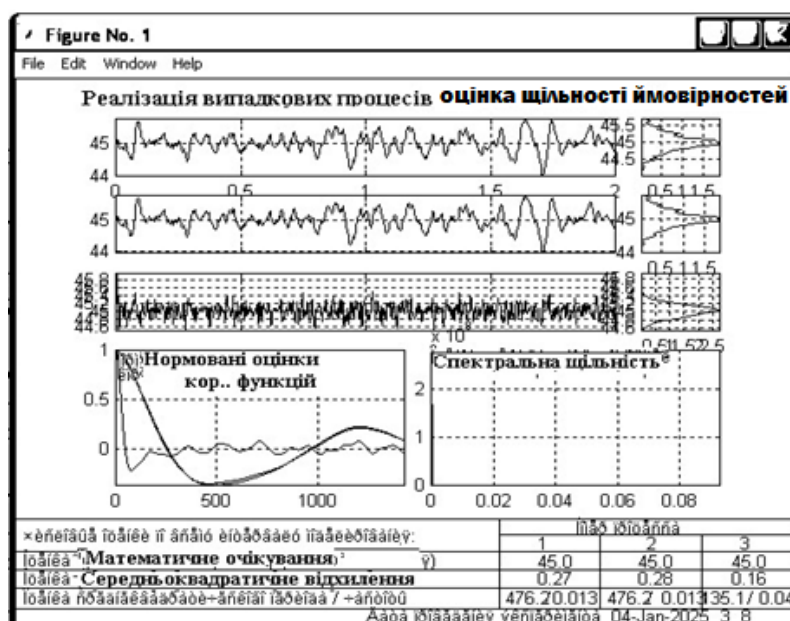


Рисунок 3.40 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик за каналом регулювання температури глюкою T_{g1}

регулювання краще ніж САУ з нечітким регулятором при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

3.10 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера

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

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

```
(*
*
* File: lpcod1.scl
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem
"lpcod1/Subsystem"
*
* Model name           : Ru1
* Model version        : 1.2
* Model creator        : Kn1
* Model last modified by : Kn1
* Model last modified on : Tue Dec 11 19:08:56 2012
* Model sample time    : 0.1s
* Subsystem name       : Ru1/Subsystem
* Subsystem sample time : 0.1s
```

```

* Simulink PLC Coder version    : 1.3 (R2012a) 19-Dec-2011
* ST code generated on         : Tue Dec 12 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((( -0.000498316 * rtb_Gain11) +
0.097336046887807272) * -2.0) + 1.0)) *
      2.0) - 1.0) * -3.6996224549188) + (((1.0 / (EXP((( -0.004755 * rtb_Gain11)
+ 7.58531064233) * -2.0) +
      1.0)) * 2.0) - 1.0) * -0.79863370057517)) + 0.50679) * -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 управління Structured Text (ST), за синтаксисом близька до Pascal; Structured Text (ST) — мова програмування стандарту ІЕС61131-3. Призначена для програмування

промислових контролерів і операторських станцій. Основою St-програми є вираження. Вираження складаються з операндів (констант і змінних) і операторів.

3.11 Висновки за розділом

В процесі виконання роботи були синтезовані моделі САУ з нечіткими регуляторами та з нейрорегуляторами що визначають нейронмереживу системи управління. 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 ПД-регулятором при об'єкті управління з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САУ, за характеристиками нечітких регуляторів було виконано тренування визначених штучних нейронних мереж, 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 ПД-регуляторами.

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання – відповідно 19 при САУ з нейрорегулятором і 58 при САУ з традиційним ПД-регулятором.

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора за температурою глюколю T_{gl} була сформована програма для промислового контролера.

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

МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ПОШУКОВОМУ СИГНАЛІ

4.1 Обґрунтування актуальності додаткової функції САК для підвищення енергоефективності

Раніше було розглянуто базову систему автоматичного керування холодильним агрегатом, у якій температура охолодженої води на виході з випарника стабілізується зміною продуктивності компресора, а температура гліколю в конденсаторному контурі підтримується на заданому рівні за допомогою триходового клапана. Така структура забезпечує працездатність установки та виконання основних технологічних вимог, однак не гарантує найбільш енергоефективного режиму роботи агрегату в усьому діапазоні навантажень. У базовій схемі температура гліколю підтримується на рівні близько 45°C, що відповідає прийнятному режиму роботи машини з капілярною трубкою як дроселюючим елементом.

Фізичний зміст температури гліколю полягає в тому, що вона визначає умови тепловідведення в конденсаторі, а через них — температуру і тиск конденсації холодоагенту. Чим вища температура гліколю, тим вищими є температура і тиск конденсації, тим більша ступінь стиснення компресора і тим вищі витрати енергії на його роботу. І навпаки, зниження температури гліколю полегшує тепловідведення в конденсаторі, знижує компресорну роботу та потенційно підвищує коефіцієнт перетворення холодильного агрегату [2]. Зниження температури конденсації полегшує роботу компресора, бо зменшує перепад між випарником і конденсатором, а отже підвищує енергоефективність холодильної машини.

Разом з тим у системі з капілярною трубкою зниження температури гліколю не може виконуватися довільно. Капілярна трубка є пасивним дроселюючим елементом, пропускна здатність якого визначається його геометрією та розраховується на номінальний режим роботи холодильного циклу. Якщо температура гліколю, а разом із нею і тиск конденсації, знижуються надмірно,

то зменшується перепад тиску на капілярній трубці, що може призвести до погіршення подачі холодоагенту у випарник. Унаслідок цього знижується інтенсивність кипіння, зростає перегрів і може погіршуватися здатність агрегату забезпечувати задану температуру води. Отже, для системи з капілярною трубкою температура гліколю впливає не лише на потужність компресора, а й на умови нормального живлення випарника.

Таким чином, у розглянутій системі виникає фізичний компроміс. За високих значень температури гліколю компресор працює з підвищеними енерговитратами через завищений тиск конденсації. За надто низьких значень температури гліколю починають проявлятися обмеження, пов'язані з роботою капілярної трубки та зменшенням витрати холодоагенту через неї. Це означає, що фіксована уставка температури гліколю, прийнята в базовій САК, є лише компромісом, закладеним на етапі проєктування, але не обов'язково відповідає найбільш енергоефективному режиму роботи агрегату за змінних теплових навантажень і зовнішніх умов.

Отже, можливість розвитку базової САК полягає не у зміні вже синтезованих внутрішніх контурів стабілізації, а у введенні верхнього, повільного контуру оптимізації, який формуватиме раціональне задане значення температури гліколю. У такій структурі внутрішній контур температури гліколю, як і раніше, відпрацьовуватиме задану уставку за допомогою триходового клапана, однак сама ця уставка вже не буде фіксованою. Вона визначатиметься автоматично з урахуванням енергоефективності холодильного агрегату. Саме це і визначає актуальність удосконалення САК у межах даної роботи.

4.2 Обґрунтування вибору критерію оптимальності та принципу його формування

У межах прийнятої структури внутрішні контури стабілізації температури води та температури гліколю зберігаються. Тому вдосконалення САК доцільно реалізувати у вигляді зовнішнього контуру оптимізації, який не керує

виконавчим органом безпосередньо, а формує оптимальне задане значення температури гліколю

$$u_{opt} \rightarrow T_{\text{глад.}}$$

Такий підхід дозволяє використати синтезовані у попередньому розділі регулятори та не змінювати базову структуру системи керування.

З огляду на викладене в підрозділі 3.1, саме температура гліколю є координатою, через яку формується режим конденсації холодильного агрегату. Зміна $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$ призводить до зміни температури конденсації, тиску нагнітання, витрат енергії на стиснення та, у випадку капілярної трубки, умов подачі холодоагенту у випарник. Отже, енергетичну ефективність агрегату в межах прийнятої постановки доцільно розглядати як функцію від заданої температури гліколю:

$$COP = f(T_{\text{гл}}^{\text{зад}}).$$

Корисний ефект роботи установки доцільно характеризувати її холодопродуктивністю

$$Q_0 = G_{\text{в}} c_{\text{р,в}} (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}),$$

де $G_{\text{в}}$ — масова витрата води, $c_{\text{р,в}}$ — питома теплоємність води, $T_{\text{вх}}$ і $T_{\text{вих}}$ — температури води на вході та виході з випарника відповідно. Як критерій оптимальності доцільно прийняти коефіцієнт перетворення холодильного агрегату

$$J = \frac{Q_0}{N_{\text{к}}} \rightarrow \max,$$

де $N_{\text{к}}$ — активна потужність компресора. У межах даної структури саме потужність компресора є основною змінною енергетичною складовою, тоді як потужність допоміжного обладнання залишається практично сталою. Тому максимізація COP є природним критерієм пошуку раціонального значення $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$.

Принцип формування критерію полягає в тому, що за кожного поточного значення теплового навантаження та зовнішніх умов існує така уставка температури гліколю, за якої досягається найбільш вигідне співвідношення між холодопродуктивністю агрегату та потужністю компресора. За завищених значень $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$ компресор працює в режимі підвищеної роботи стиснення через високий тиск конденсації. За надмірно занижених значень $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$ починають впливати обмеження, пов'язані з капілярною трубкою та живленням випарника. Отже, у системі формується раціональна область значень $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$, у якій COP агрегату досягає найбільшого значення.

Отже, у системі формується раціональна область значень $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$, у якій COP агрегату досягає найбільшого значення. У межах даної роботи оптимізуючою координатою доцільно прийняти задане значення температури гліколю $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$, а як критерій оптимальності — коефіцієнт перетворення холодильного агрегату COP. За поточного теплового навантаження та зовнішніх умов задача вдосконалення САК зводиться до побудови зовнішнього контуру автоматичної оптимізації, який змінюватиме $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$ так, щоб забезпечити максимум COP.

4.3 Розробка схеми імітаційного моделювання САК і плану комп'ютерних експериментів з дослідження її ефективності, подання і аналіз результатів моделювання

Оскільки оптимізуючу координату було обрано задане значення температури $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$, а як критерій оптимальності — коефіцієнт перетворення холодильного агрегату COP, наступним етапом є розробка структурної схеми системи автоматичної оптимізації. З урахуванням того, що положення екстремуму критерію може змінюватися при зміні теплового навантаження, температури навколишнього середовища та режиму роботи холодильного агрегату, у даній

керування процесом охолодження води з зовнішнім контуром автоматичної оптимізації заданої температури гліколю. Об'єктом оптимізації в цій структурі є вся нижня система керування разом із холодильним агрегатом, тобто контур стабілізації температури гліколю, контур стабілізації температури води та сам технологічний об'єкт. Внутрішні контури зберігають свої функції: перший забезпечує стабілізацію температури гліколю за допомогою триходового клапана, другий — стабілізацію температури води на виході з випарника шляхом зміни продуктивності компресора. Зовнішній контур оптимізації не втручається безпосередньо у виконавчі органи, а формує раціональне задане значення температури гліколю $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$, за якого холодильний агрегат працює найбільш енергоефективно за поточного теплового навантаження та зовнішніх умов.

Для реалізації автоматичної оптимізації в даній роботі обрано систему з безперервним пошуком. Блок розрахунку критерію формує поточне значення показника ефективності E , який у даній роботі відповідає коефіцієнту перетворення холодильного агрегату COP . У канал формування $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$ вводиться малий гармонічний пошуковий сигнал z , що генерується блоком БГГК. Зміна критерію під впливом цього сигналу виділяється смуговим фільтром ПФ і подається на синхронний детектор. На другий вхід синхронного детектора надходить пошуковий сигнал, скоригований блоком МДОО, який компенсує фазовий зсув, зумовлений інерційністю об'єкта оптимізації та наявністю фільтра. У синхронному детекторі ці сигнали перемножуються, а після проходження через фільтр низьких частот ФНЧ формується сигнал x , який визначає напрям зміни оптимізуючої координати. У результаті зовнішній контур безперервно коригує $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$ так, щоб критерій ефективності наближався до свого екстремального значення.

4.4 Реалізація та дослідження САО процесу охолодження води

У даному підрозділі виконано реалізацію та дослідження системи автоматичної оптимізації процесу охолодження води в середовищі MATLAB/Simulink. Об'єктом дослідження є зовнішній контур оптимізації, інтегрований у базову САК холодильного агрегату. Внутрішні контури стабілізації температури води та температури гліколю приймаються відповідно до раніше синтезованої структури, тому окремий синтез локальних регуляторів у межах цього підрозділу не виконується. Основну увагу зосереджено на дослідженні процедури пошуку екстремуму, втрат на пошук та чутливості системи до зміни параметрів об'єкта оптимізації і параметрів алгоритму. Вибір саме системи автоматичної оптимізації з безперервним пошуком узгоджується з класичними уявленнями про САО, де при однокритеріальній та одномірній задачі оптимізації до оптимізуючої координати додається гармонічний пошуковий сигнал, а за реакцією критерію формується керуючий вплив у напрямку екстремуму.

Для відпрацювання алгоритму автоматичної оптимізації залежність коефіцієнта перетворення холодильного агрегату від заданого значення температури гліколю $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$ у робочій області подано параболічною апроксимацією. Такий підхід не суперечить фізичному змісту задачі, а дозволяє виділити локальну екстремальну область та зосередитися на дослідженні процедури пошуку, впливі дрейфу екстремуму, збурень і параметрів системи. Структурну схему моделі системи автоматичної оптимізації з безперервним пошуковим сигналом наведено на (рис. 4.2). На цій схемі реалізовано блок формування оптимізуючої координати, блок розрахунку критерію ефективності, модель динаміки об'єкта оптимізації, а також вузли, що забезпечують введення гармонічного пошукового сигналу, його фазову корекцію, виділення реакції критерію на пошук та формування сигналу керування. Такий принцип відповідає теоретичному опису систем з безперервним пошуковим сигналом, у яких центрована складова показника ефективності подається на синхронний детектор разом із пошуковим сигналом,

а після фільтрації формується сигнал, що задає напрям зміни оптимізуючої координати.

На першому етапі досліджено роботу САО за номінальних налаштувань. На (рис. 4.3) наведено хід процедури пошуку екстремуму на фазовій площині, а на (рис. 4.4) — часові діаграми основних сигналів системи. З отриманих результатів видно, що після ввімкнення пошуку система виходить у окол екстремуму критерію та надалі підтримує роботу поблизу нього з малими коливаннями, зумовленими наявністю безперервного пошукового сигналу. Показники втрат на пошук у встановленому режимі наведено в (табл. 4.1). За номінальних налаштувань система працює стійко і забезпечує збіжність до раціонального режиму. Отримана поведінка узгоджується з теоретичним описом процедури пошуку без дрейфу екстремуму процедури пошуку без дрейфу екстремуму, для якої характерні вихід у околиці оптимуму та подальші малі коливання навколо нього.

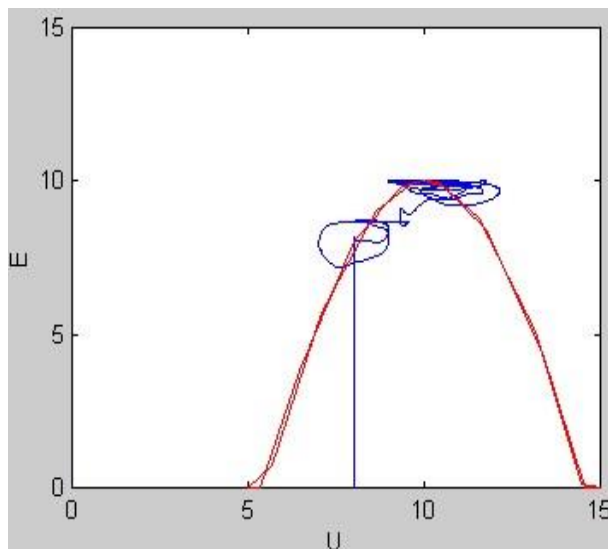


Рис. 4.3 – Хід процедури пошуку екстремуму при моделюванні системи за номінальних налаштувань

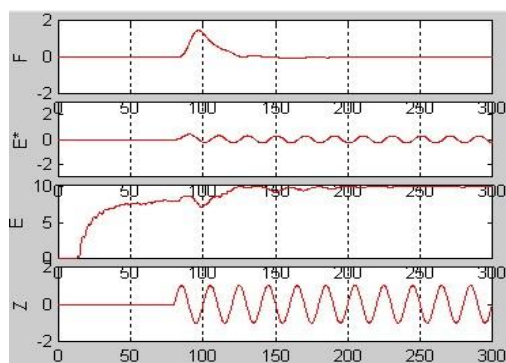
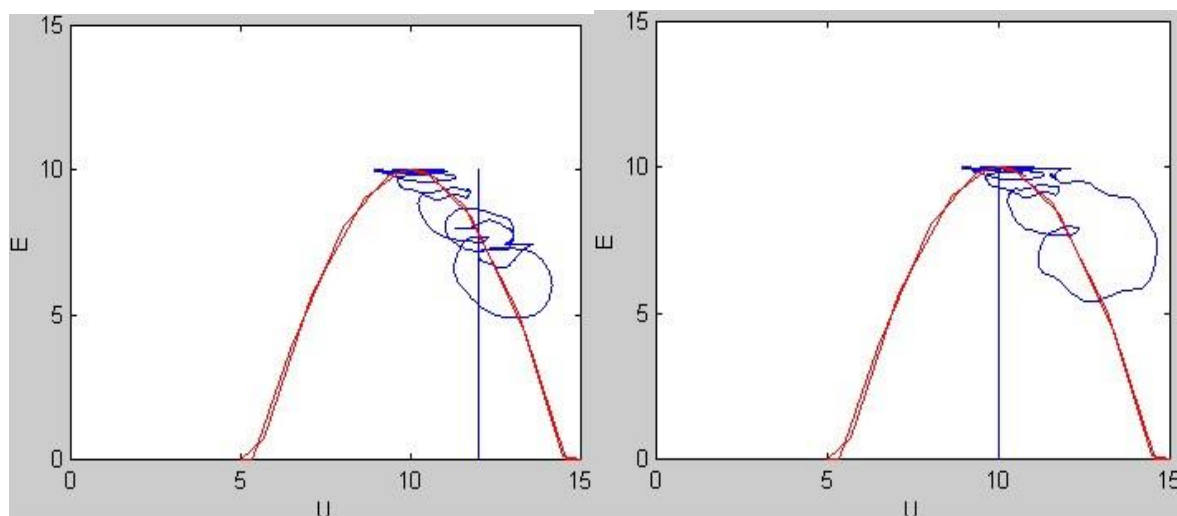


Рис. 4.4 – Графіки процесів у контрольних точках при моделюванні системи за поточних налаштувань

Таблиця 4.1 — Показники роботи САО за номінальних налаштувань

Час розрахунку критерію, с	Значення критерію	Значення критерію за 80с.
76	1,857	1,955

На другому етапі досліджено вплив початкового значення оптимізуючої координати на хід процедури пошуку. Результати моделювання наведено на (рис. 4.5), а кількісні показники втрат на пошук — у (табл. 4.2). Отримані результати показують, що система зберігає працездатність при різних початкових значеннях та в усіх розглянутих випадках сходиться до околу екстремуму. Найменші втрати на пошук мають місце тоді, коли початкове значення оптимізуючої координати розташоване ближче до оптимального. Отже, початкові умови впливають переважно на тривалість перехідного процесу і величину втрат на пошук, але не призводять до втрати працездатності системи.



А)

Б)

Рис. 4.5 – Хід процедури пошуку екстремуму при моделюванні системи при початковому значенні: А) 12 Б) 10

Таблиця 4.2 — Показники роботи САО при різних початкових значеннях оптимізуючої координати

Початкове значення	Час розрахунку критерію, с	Значення критерію	Значення критерію за 80с.
8	76	1,857	1,955
10	69,25	1,641	1,896
12	54	1,294	1,917

Наступна серія експериментів присвячена аналізу впливу параметрів екстремальної характеристики, зокрема її кривизни та координат екстремуму. На (рис. 4.6) і в (табл. 4.3) наведено результати моделювання при різних кривизні параболи. Зменшення абсолютного значення кривизни призводить до погіршення виразності екстремуму, внаслідок чого зростають втрати на пошук і погіршується локалізація оптимальної області. На (рис. 4.7) і в (табл. 4.4) наведено результати при зміні координат екстремуму. У цьому випадку система зберігає працездатність і знаходить нове положення раціонального режиму, проте час переходу та втрати на пошук змінюються залежно від величини зміщення екстремуму. Таким чином, система достатньо чутлива до

параметрів екстремальної характеристики, але в межах розглянутих змін зберігає працездатність і стійкість.

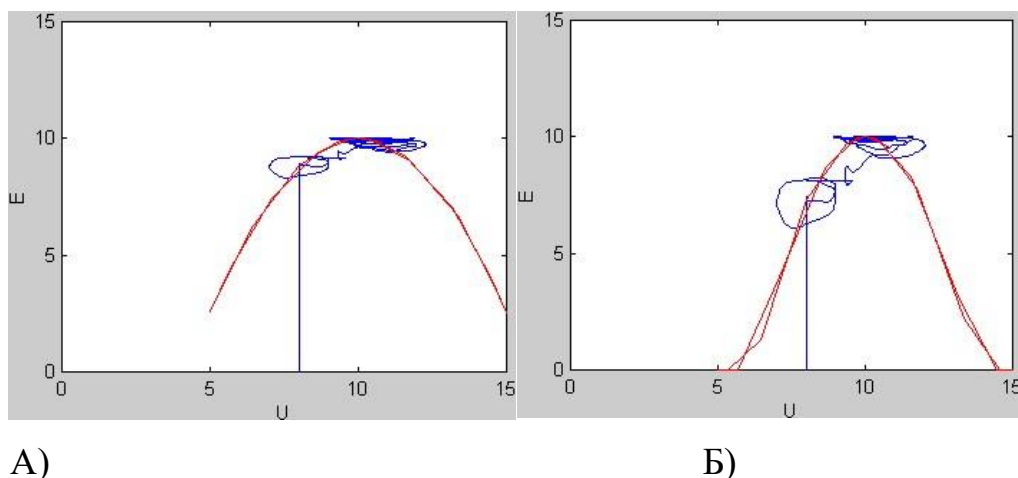


Рис. 4.6 – Хід процедури пошуку екстремуму при моделюванні системи з крутизною параболі: А) -0,3 Б) -0,7

Таблиця 4.3 — Показники роботи САО при різній кривизні екстремальної характеристики

Крутизна параболі	Час розрахунку критерію, с	Значення критерію	Значення критерію за 80с.
-0,5	76	1,857	1,955
-0,3	72	1,94	2,155
-0,7	50	1,677	2,682

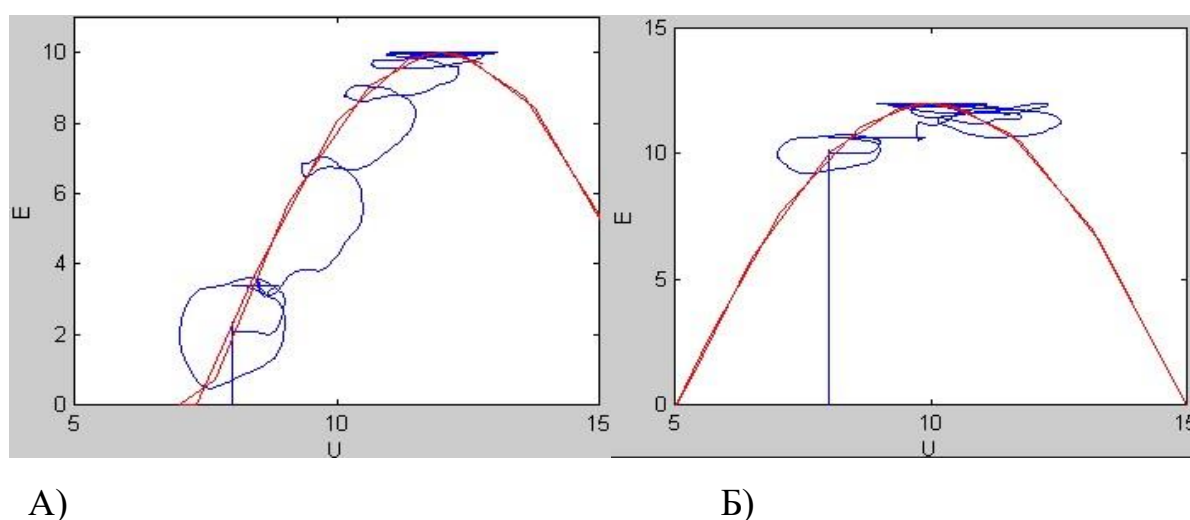
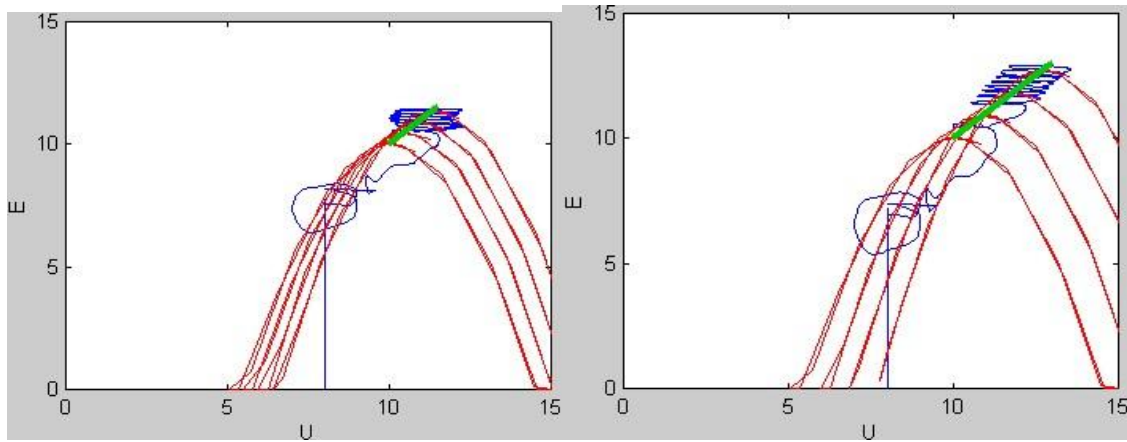


Рис. 4.7 – Хід процедури пошуку екстремуму при моделюванні системи зі значенням екстремуму : А) (12; 10) Б) (10; 12)

Таблиця 4.4 — Показники роботи САО при різних координатах екстремуму

Значення екстремуму (x;y)	Час розрахунку критерію, с	Значення критерію	Значення критерію за 80с.
(10; 10)	76	1,857	1,955
(12; 10)	59,25	1,4	1,89
(8; 10)	41	1,087	2,12
(10; 12)	41,75	1,128	1,972
(10; 8)	48,25	1,127	1,868

Окремо досліджено роботу системи в умовах нестационарності об'єкта оптимізації. На (рис. 4.8) наведено результати моделювання при дрейфі екстремуму. Видно, що система з безперервним пошуком здатна відслідковувати повільне зміщення оптимальної точки та зберігати роботу в її околі. Це відповідає загальному принципу систем екстремального регулювання, для яких характерною є здатність працювати в умовах дрейфу екстремуму. На (рис. 4.9) та в (табл. 4.5) наведено результати моделювання при збільшенні збурюючого впливу. Отримані часові діаграми показують, що випадкові збурення не призводять до втрати стійкості системи. Завдяки наявності фільтрації та замкненого контуру оптимізації пошук екстремуму зберігається, а зміна втрат на пошук є відносно незначною. Отже, система виявляє достатню робастність до помірного зростання рівня збурень.



А)

Б)

Рис. 4.8 – Хід процедури пошуку екстремуму при моделюванні системи з дрейфом екстремуму : А) (0,005; 0,005) Б) (0,01; 0,01)

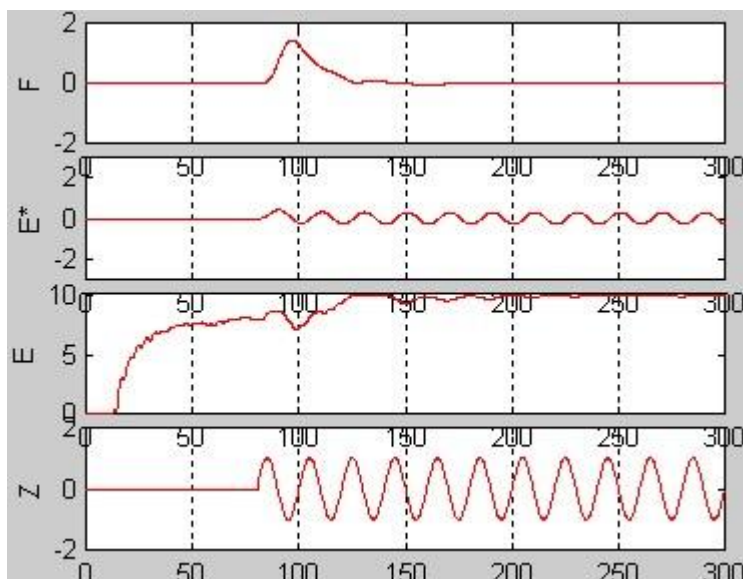


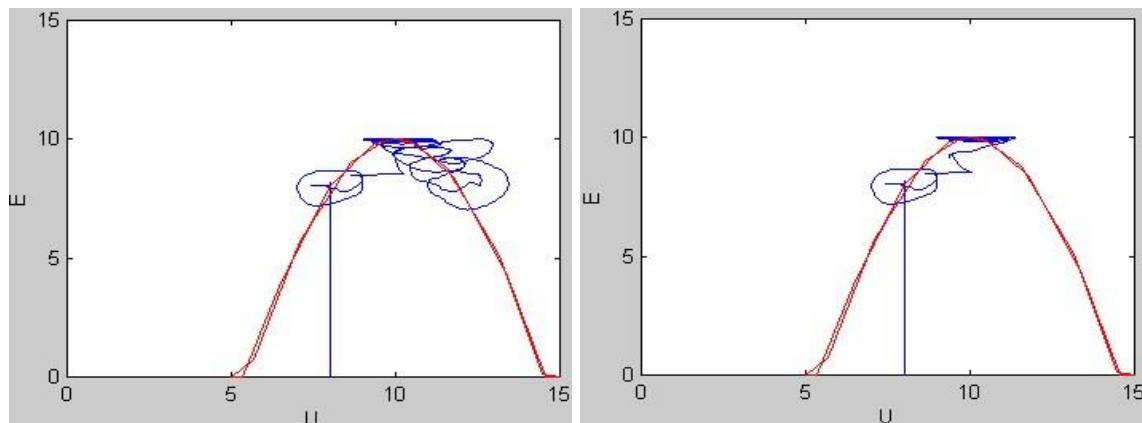
Рис. 4.9 – Часові діаграми основних сигналів САО при збільшенні збурюючого впливу

Таблиця 4.5 — Показники роботи САО при зміні рівня збурюючого впливу

Дисперсія	Час розрахунку критерію, с	Значення критерію	Значення критерію за 80с.
1	76	1,857	1,955
1,4	76,25	1,846	1,937

Важливою частиною дослідження є оцінка чутливості САО до параметрів моделі динаміки об'єкта оптимізації. Результати моделювання наведено на (рис. 4.10) і в (табл. 4.6). Вони показують, що зміна параметрів моделі впливає

на якість пошуку, причому найбільш суттєвим є вплив параметрів, які визначають інерційність об'єкта. При помірних відхиленнях параметрів система зберігає стійкість, однак втрати на пошук і точність локалізації екстремуму змінюються. За значного розузгодження параметрів моделі та об'єкта якість роботи системи погіршується. Це добре узгоджується з роллю блоку МДОО в структурі САО, оскільки саме він повинен компенсувати фазовий зсув, зумовлений інерційністю об'єкта оптимізації та наявністю фільтрів.



А)

Б)

Рис. 4.10 – Хід процедури пошуку екстремуму при моделюванні системи з постійною часу моделі динаміки об'єкта оптимізації : А) 15с Б) 7с

Таблиця 4.6 — Показники роботи САО при різних параметрах моделі динаміки об'єкта оптимізації

Параметри динаміки оптимізації	моделі об'єкта	Час розрахунку критерію, с	Значення критерію	Значення критерію за 80с.
$T=10,5$, $\tau=1,7$		76	1,857	1,955
$\tau=2,1$		71,25	1,74	1,954
$\tau=1,3$		89	2,198	1,976
$T=15$		24,25	0,6793	2,241
$T=7$		128,3	3,322	2,072

На (рис. 4.11) і в (табл. 4.7) наведено результати зміни амплітуди пошукового сигналу. Збільшення амплітуди призводить до більш помітного зростання втрат на пошук, тоді як її зменшення також погіршує якість пошуку, але менш різко. Таким чином, для амплітуди пошукового сигналу існує раціональна область значень, у якій забезпечується компроміс між швидкістю процедури пошуку та величиною втрат у сталому режимі. На (рис. 4.12) і в (табл. 4.8) наведено результати зміни періоду пошукового сигналу. При помірній зміні періоду система зберігає стійкість, однак пошук відбувається з більшими втратами і менш точною локалізацією екстремуму. За істотного відхилення періоду від номінального значення система втрачає працездатність і не забезпечує знаходження раціонального режиму. Це свідчить про високу чутливість САО до правильного вибору частотних параметрів пошукового сигналу. Відповідний висновок узгоджується з теоретичним положенням про те, що пошуковий сигнал і реакція критерію на нього повинні бути фазово узгодженими, інакше визначення напрямку руху до екстремуму стає некоректним.

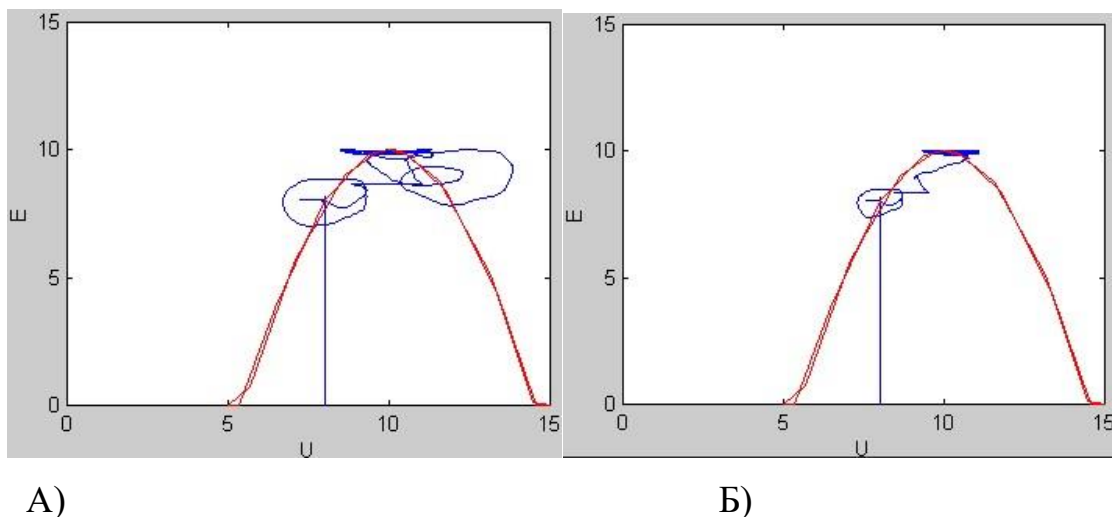
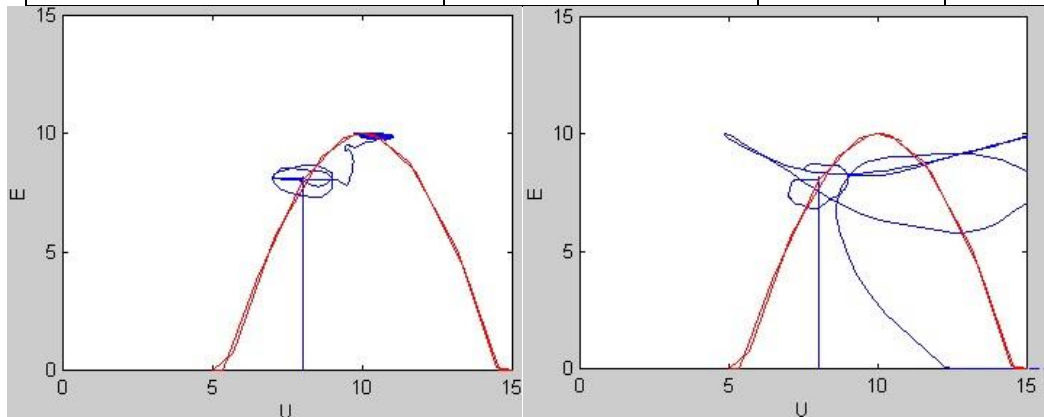


Рис. 4.11 – Хід процедури пошуку екстремуму при моделюванні системи з амплітудою пошукового сигналу : А) 1,3 Б) 0,7

Таблиця 4.7 — Показники роботи САО при різній амплітуді пошукового сигналу

Амплітуда пошукового сигналу	Час розрахунку критерію, с	Значення критерію	Значення критерію за 80с.
1	76	1,857	1,955
1,3	92	4,031	3,505
0,7	109,3	2,854	2,09



А)

Б)

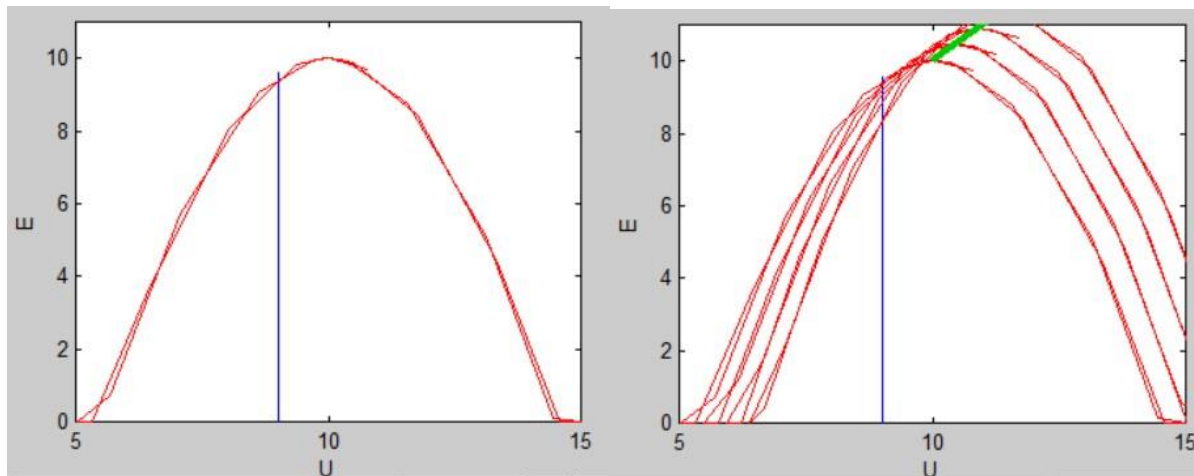
Рис. 4.12 – Хід процедури пошуку екстремуму при моделюванні системи з періодом пошукового сигналу : А) 16с Б) 30с

Таблиця 4.8 — Показники роботи САО при різному періоді пошукового сигналу

Період пошукового сигналу	Час розрахунку критерію, с	Значення критерію	Значення критерію за 80с.
20	76	1,857	1,955
16	114,8	8,299	5,786
24	68	19,14	22,51
30	-	-	-

Для наочного пояснення необхідності введення контуру автоматичної оптимізації було додатково розглянуто роботу базової САР, у якій задане значення оптимізуючої координати залишається фіксованим. У такому випадку система не виконує пошук екстремуму, а ефективність її роботи визначається

тим, наскільки вдало вибране задане значення відповідає фактичному положенню максимуму критеріальної залежності.



А)

Б)

Рис. 4.13 – Ілюстрація роботи базової САР без автоматичного пошуку оптимального завдання: А) стабільна критеріальна залежність; Б) дрейф екстремуму критеріальної залежності

Як видно з рис. 4.13, при стабільній критеріальній залежності фіксоване задане значення може забезпечувати прийнятний режим лише за умови його близькості до екстремуму. Якщо ж положення екстремуму змінюється, базова САР не має механізму автоматичного уточнення заданого значення, тому робоча точка поступово віддаляється від оптимального режиму. Це призводить до зростання втрат, пов'язаних із роботою системи у неоптимальній області.

На відміну від базової САР, система з надбудованою САО змінює задане значення оптимізуючої координати відповідно до поточного значення критерію та забезпечує наближення робочої точки до області екстремуму. Для кількісної оцінки цього ефекту було виконано порівняння базової САР та САР з надбудованою САО за приведеним критерієм J_{80} .

Узагальнені результати порівняльних експериментів наведено в табл. 4.9. Як показник ефективності використано приведені значення критерію J_{80} , що дозволяє порівнювати результати моделювання за однаковим часовим

інтервалом. Менше значення J_{80} відповідає меншим втратам, пов'язаним із відхиленням робочого режиму від області екстремуму.

Таблиця 4.9 – Порівняння базової САР та САР з надбудованою САО за приведеним критерієм J_{80}

Умови експерименту	Параметр експерименту	Базова САР, J_{80}	САР з САО, J_{80}	Висновок
Номінальна парабола	$U_{зд}=8$	160	1,955	САО істотно зменшує втрати
Номінальна парабола	$U_{зд}=10$	0,06486	1,896	Фіксоване завдання випадково близьке до оптимального
Номінальна парабола	$U_{зд}=12$	158,7	1,917	САО компенсує невіддале початкове завдання
Номінальна парабола	$U_{зд}=9$	40,37	1,989	САО забезпечує менше значення критерію
Зміна крутизни параболи	$k=-0,5$	160	1,955	САО зберігає ефективність
Зміна крутизни параболи	$k=-0,3$	96,41	2,155	САО краще адаптується до зміни форми залежності
Зміна крутизни параболи	$k=-0,7$	224,9	2,682	Перевага САО зростає при зміні крутизни
Зміна положення екстремуму	(10;10)	160	1,955	САО знаходить оптимальний режим

Зміна положення екстремуму	(12;10)	641	1,89	Перевага САО дуже значна
Зміна положення екстремуму	(8;10)	0,06953	2,12	Базова САР ефективна лише при випадковому збігу із оптимумом
Зміна положення екстремуму	(10;12)	160,7	1,972	САО компенсує зміщення екстремуму
Зміна положення екстремуму	(10;8)	160,8	1,868	САО забезпечує стійко мале значення критерію

Аналіз результатів, наведених у табл. 4.9, показує, що базова САР може забезпечувати мале значення критерію лише в окремих випадках, коли фіксоване задане значення випадково розташоване поблизу фактичного екстремуму. Так, для номінальної параболи при $U_{зд}=10$ та при зміні положення екстремуму (8;10) значення критерію для базової САР є мінімальним, що пояснюється близькістю фіксованого завдання до оптимального режиму.

В інших випадках, коли початкове задане значення віддалене від екстремуму або змінюється форма чи положення критеріальної залежності, значення J_{80} для базової САР суттєво зростає. Це свідчить про те, що система з фіксованим завданням не має властивості адаптації до зміни умов роботи об'єкта.

САР з надбудованою САО демонструє значно стабільніші результати. У більшості досліджених випадків значення приведенного критерію J_{80} залишається близьким до малого рівня, незалежно від початкового завдання, крутизни параболи або положення екстремуму. Це підтверджує, що контур автоматичної оптимізації забезпечує автоматичне уточнення оптимального

завдання та зменшує залежність якості керування від попереднього вибору режиму.

Отже, введення САО є доцільним насамперед у тих випадках, коли оптимальний режим не є заздалегідь точно відомим або змінюється в процесі роботи. Базова САР із фіксованим завданням може бути ефективною лише за умови випадкового збігу із положенням екстремуму, тоді як САР з надбудованою САО забезпечує автоматичний пошук і підтримання режиму, близького до оптимального.

4.5 Висновки до розділу 3

У розділі 3 обґрунтовано доцільність удосконалення базової системи автоматичного керування процесом охолодження води на основі розвитку її функціональної структури. Показано, що в системі з капілярною трубкою температура гліколю є важливою координатою, яка визначає умови теплообміну в конденсаторі, впливає на температуру і тиск конденсації холодоагенту, а отже — на потужність компресора та коефіцієнт перетворення холодильного агрегату.

На підставі виконаного аналізу як оптимізуючу координату обрано задане значення температури гліколю $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$, а як критерій оптимальності — коефіцієнт холодильного агрегату $COP = \frac{Q_0}{N_k} \rightarrow \max$. Показано, що вдосконалення базової САР доцільно реалізувати не шляхом зміни вже синтезованих внутрішніх контурів стабілізації, а введенням зовнішнього повільного контуру автоматичної оптимізації, який формує раціональне значення $T_{\text{гл}}^{\text{зад}}$ за поточних умов роботи агрегату.

Розроблено структурну схему системи автоматичної оптимізації з безперервним пошуковим сигналом, інтегрованої в базову САР холодильного агрегату. Показано, що така структура дозволяє здійснювати автоматичний пошук екстремального значення критерію ефективності без порушення роботи внутрішніх контурів стабілізації температури води та температури гліколю.

У результаті моделювання підтверджено працездатність запропонованої САО. Встановлено, що система забезпечує збіжність до околу екстремального значення критерію, зберігає працездатність при зміні початкових умов, координат і кривизни екстремальної характеристики, а також здатна відстежувати повільний дрейф екстремуму. Разом з тим показано, що найбільший вплив на якість роботи САО мають параметри моделі динаміки об'єкта оптимізації та параметри пошукового сигналу, насамперед його амплітуда і період.

Порівняння базової САР із фіксованим заданим значенням температури гліколю та САР з надбудованою САО за приведеним критерієм J_{80} показало, що фіксоване завдання є ефективним лише за умови його близькості до фактичного екстремуму. При зміні положення або форми критеріальної залежності базова САР не забезпечує адаптації режиму роботи, тоді як САО автоматично уточнює оптимальне завдання та підтримує стабільно малі значення критерію.

РОЗДІЛ 5 РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ НА ПІДПРИЄМСТВІ

5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом охолодження технологічної води формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.

В якості контролера для керування техпроцесом вибираємо SIMATIC S7-1500 із середовищем програмування TIA Portal

Таблиця 5.1–Список параметрів що вводяться та виводяться з контролеру.

	Найменування параметру	Умовне позначення	Вид сигналу A/D	Тип сигналу I/O	Діапазон сигналу на вході/виході контролеру	Позначення на схемі
1	Електродвигун сухих охолоджувачів	1	D	I	«открытый коллектор»	DI1
2	Насос для рідини	2-4	D	I	«открытый коллектор»	DI2...4
3	Електродвигун сухих охолоджувачів	1	D	O	«открытый коллектор»	DO1
4	Насос для рідини	2-4	D	O	«открытый коллектор»	DO2..4
5	Обороти компресора	5	D	0	20-50 гЦ	DI5
6	Температура води на виході	Tvod (6)	A	I	(4-20 мА)	AI1
	холодильної машини					

7	Температура води на виході холодильної машини	Tvod (6)	A	O	(4-20 мА)	A01
8	Відсічні клапани	7-11	D	O	24 V DC	DO5..9
9	Відсічні клапани	7-11	D	I	24 V DC	DI6..10
10	Сигнал від датчика температури	12a	A	I	(4-20 мА)	AI2
11	Сигнал на керування 3-х ходовим кл.	12б	A	O	(4-20 мА)	AO2
12	Реле захисту холодильної установки	14-22	D	I	24 V DC	DI11..19
13	Датчики рівня	23-25	D	I	24 V DC	DI20-22
14	Сигналізація	HL	D	O	24 V DC	DO10-12

Кількість каналів вводу\виводу: AI – 2 , AO – 2, DI – 22, DO – 12

Технічну структуру системи управління розробимо на базі контролера S71500. Для реалізації алгоритмів управління в модулях ПЗО контролера повинні бути передбачені 2 аналогових входів, 2- аналогових виходи, 22-дискретних входів і 12-дискретних виходів.

В якості центрального процесора обираємо **cpu 1518-4 pn/dp (6ES7518-4AP00-0AB0)**

Та модулі розширення **DQ 32x24VDC/0.5A HF (6ES7 522-1BL01-0AB0)**



Рис.5.1- схема підключення модулів розширення DQ 32x24VDC/0.5A HF DI 32x24VDC BA (6ES7 521-1BL10-0AA0)



Рис.5.2- схема підключення модулів розширення DI 32x24VDC BA AI 4x U/I/RTD/TC/ AQ 2x U/I ST (6ES7 534-7QE00-0AB0)



Формирование унифицированных сигналов напряжения

Рис.5.3- схема підключення модулів розширення AI 4x U/I/RTD/TC/ AQ 2x U/I ST

В якості блока живлення вибираємо **PM 1507 AC/DC 120/230V 60W (6EP1333-4BA00)**

Характеристики блока живлення

Article number	6EP1333-4BA00
Product	S7-1500 PM1507
Power supply, type	24 V/8 A
Output	
Output	Controlled, isolated DC voltage
Rated voltage V_{out} DC	24 V
Total tolerance, static $\pm$	1 %
Static mains compensation, approx.	0.1 %
Static load balancing, approx.	0.1 %
Residual ripple peak-peak, max.	50 mV
Spikes peak-peak, max. (bandwidth: 20 MHz)	150 mV
Product function	No
Output voltage adjustable	
Status display	LED green for 24 V OK; LED red for error; LED yellow for stand-by
On/off behavior	No overshoot of V_{out} (soft start)
Startup delay, max.	1.5 s
Voltage rise, typ.	10 ms
Rated current value I _{out} rated	8 A
Current range	0 ... 8 A
Active power supplied typical	192 W
Short-term overload current	
• on short-circuiting during the start-up typical	35 A
• at short-circuit during operation typical	35 A
Duration of overloading capability for excess current	
• on short-circuiting during the start-up	70 ms
• at short-circuit during operation	70 ms
Parallel switching for enhanced performance	Yes; Parallel switching of 3 A and 8 A possible, devices must be switched on at the same time, max. 75% per device with I-load
Numbers of parallel switchable units for enhanced performance	2

Рис.5.4- Характеристики блока живлення

Блоки живлення навантаження (PM) для програмованих контролерів S7-1500 і станцій ET 200MP. Перетворення вхідної напруги 120/230 В змінного струму у вихідну напругу=24 В.

Формування зовнішніх ланцюгів живлення центральних процесорів, інтерфейсних, сигнальних і технологічних модулів, а також системних блоків живлення (PS) програмованих контролерів S7-1500 і станцій ET 200MP.

Відсутність інтерфейсу для підключення до внутрішньої шини S7-1500/ET 200 MP.

Два типорозміри з вихідною потужністю 70 або 190 Вт.

Без підтримки діагностичних функцій

Призначення

Блоки живлення навантаження (PM) призначені для формування вихідної напруги = 24 В, яка може бути використана:

-для живлення центральних процесорів програмованого контролера S7-1500 або інтерфейсних модулів станції ET 200MP;

-для живлення системних блоків живлення (PS) контролерів S7-1500 і станцій ET 200MP;

-для живлення зовнішніх ланцюгів сигнальних і технологічних модулів контролерів S7-1500 і станцій ET 200MP.

В якості панелі оператора обираємо **SIMATIC TP1200 COMFORT (6AV21240MC01-0AX0)**



Рис.5.5- загальний вигляд всіх обраних пристроїв
схема технологічної структури та опис контроллера

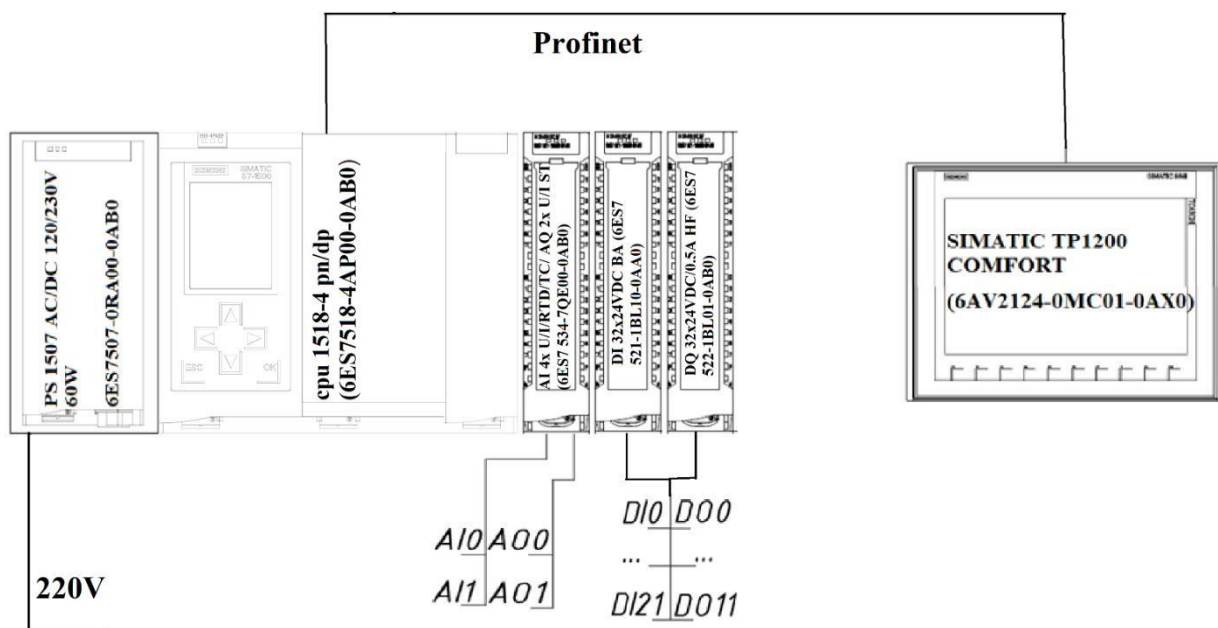


Рис.5.6- схема технологічної структури

Загальний опис контролера



Рис.5.7- загальний вигляд контролера

Програмований контролер S7-1500 має модульну конструкцію і дає змогу використовувати у своєму складі:

- ☐ Модуль центрального процесора (CPU), призначений для виконання програми користувача, керування всіма вузлами контролера і компонентами системи розподіленого введення-виведення.
- ☐ Сигнальні модулі (SM), призначені для введення і виведення дискретних і аналогових сигналів з різними електричними і часовими параметрами.

- Технологічні модулі (ТМ), призначені для вирішення завдань швидкісного рахунку, позиціонування, формування імпульсів, зважування тощо. т.д.
- Комунікаційні модулі (СМ/СР), призначені для збільшення кількості комунікаційних інтерфейсів контролера та виконання обміну даними через промислові мережі PROFIN. даними через промислові мережі PROFINET, Industrial Ethernet і PROFIBUS, а також через безпосередні з'єднання на основі послідовних інтерфейсів.
- Системні блоки живлення (PS),призначені для живлення електроніки модулів контролера через його внутрішню шину, якщо потужності вбудованого в CPU блока живлення для цієї мети недостатньо
- Блоки живлення навантаження (PM), призначені для підключення до мережі живлення ~120/230 В і формування вихідної напруги =24 В. Однотипні модулі (SM, CM) S7-1500 поділяються на класи, що відрізняються підтримкою різного набору функцій:
- Модулі класу BA (Basic) відносно прості та недорогі компоненти без діагностики параметрів.
- Модулі класу ST (Standard) з підтримкою діагностичних функцій на рівні модуля або групи каналів. Клас точності для аналогових модулів дорівнює 0.3 %.
- Модулі класу HF (High Feature) з підтримкою діагностичних функцій на рівні кожного каналу. Клас точності для аналогових модулів дорівнює 0.1 %. Підвищена стійкість до впливу перешкод, підвищена міцність електричної ізоляції.
- Модулі класу HS (High Speed) з малими часами фільтрації сигналів і короткими часом перетворення.

Сигнальні, технологічні та комунікаційні модулі

(СМ PtP) програмованого контролера S7-1500 можуть використовуватися і в станції ET 200MP. **Технічні характеристики**

Напруга живлення 24В

Ступінь захисту IP20

Article number	6ES7511-1FK00-0AB0	6ES7513-1FL00-0AB0	6ES7515-2FM00-0AB0	6ES7516-3FN00-0AB0	6ES7517-3FP00-0AB0	6ES7518-4FP00-0AB0
	CPU 1511F-1PN, 225KB PROG, 1MB DATA	CPU 1513F-1 PN, 450KB PROG, 1,5MB DATA	CPU 1515F-2 PN, 750KB PROG, 3MB DATA	CPU 1516F-3 PN/DP, 1,5MB PROG, 5MB DATA	CPU 1517F-3 PN/DP, 3MB PROG, 8MB DATA	CPU 1518F-4 PN/DP, 6MB PROG, 20MB DATA
Counters, timers and their retentivity						
S7 counter						
• Number	2 048	2 048	2 048	2 048	2 048	2 048
IEC counter						
• Number	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)
S7 times						
• Number	2 048	2 048	2 048	2 048	2 048	2 048
IEC timer						
• Number	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)	Any (only limited by the main memory)
Data areas and their retentivity						
Flag						
• Number, max.	16 kbyte	16 kbyte	16 kbyte	16 kbyte	16 kbyte	16 kbyte
Address area						
I/O address area						
• Inputs	32 kbyte; All inputs are in the process image	32 kbyte; All inputs are in the process image	32 kbyte; All inputs are in the process image	32 kbyte; All inputs are in the process image	32 kbyte; All inputs are in the process image	32 kbyte; All inputs are in the process image
• Outputs	32 kbyte; All outputs are in the process image	32 kbyte; All outputs are in the process image	32 kbyte; All outputs are in the process image	32 kbyte; All outputs are in the process image	32 kbyte; All outputs are in the process image	32 kbyte; All outputs are in the process image
Time of day						
Clock						
• Type	Hardware clock	Hardware clock	Hardware clock	Hardware clock	Hardware clock	Hardware clock
Interfaces						
1st interface						
Interface types						
- Number of ports	2	2	2	2	2	2
- Integrated switch	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
- RJ 45 (Ethernet)	Yes	Yes; X1	Yes; X1	Yes; X1	Yes; X1	Yes; X1
Protocols						
- PROFINET IO Controller	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
- PROFINET IO Device	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
- SIMATIC communication	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
- Open IE communication	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
- Web server	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
- Media redundancy	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Рис.5.8- Технічні характеристики

Параметризація технічних засобів, контролера і мереж, програмування алгоритмів логічного керування та регулювання САК. Параметризація технічних засобів, контролера і мереж

Вибираємо в середовищі програмування TIAportal тип контроллера та панелі оператора відповідно до 5 розділу, визначаємо структуру і параметри мережі обміну інформацією.

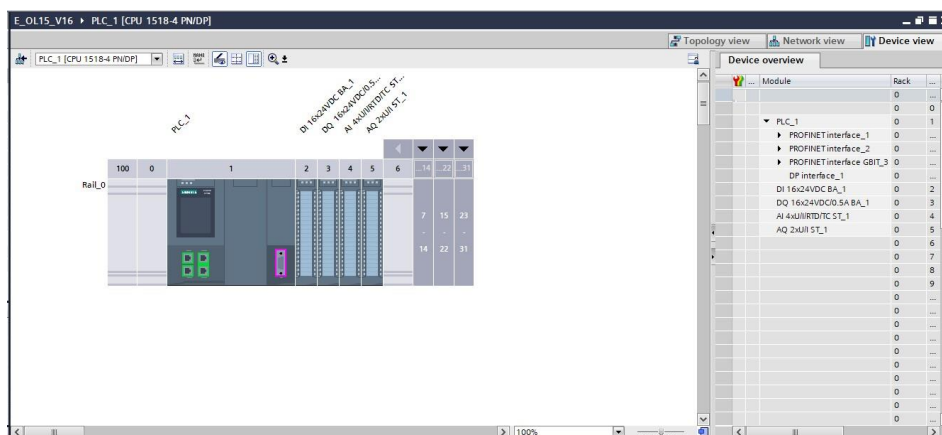


Рис.5.9–Вікно з прикладом вибору контроллера та конфігурація модулів.



Рис.5.10– Приклад вікна встановлення параметрів мережі обміну інформацією

Далі відповідно до розділу 5 вибираємо в середовищі TIA портал блоки дискретних на аналогових входів та виходів (рис 6.1) Далі проводимо конфігурацію обраних модулів,визначаючи імена змінних вхідних та вихідних сигналів (теги) (див. рис. 6.3 , 6.4, 6.5, 6.6) та проводячи вибір типу сигналів (рис. 6.7 6.8) а саме, для вхідних аналогових сигналів 4-20мА для вихідних 0-10В

DQ 16x24VDC/0.5A BA_1 [DQ 16x24VDC/0.5A BA]				
General	IO tags	System constants	Texts	
	Name	Type	Address	Tag table
	bOut_Valve	Bool	%Q0.0	Default tag table
	bOut_Glikol	Bool	%Q0.1	Default tag table
	bOut_Water	Bool	%Q0.2	Default tag table
	bOut_Dry	Bool	%Q0.3	Default tag table
	bOut_support_...	Bool	%Q0.4	Default tag table
	bOut_sign	Bool	%Q0.5	Default tag table
	Output7	Bool	%Q0.6	Default tag table
	Output8	Bool	%Q0.7	Default tag table
	Output9	Bool	%Q1.0	Default tag table
	Output10	Bool	%Q1.1	Default tag table
	Output11	Bool	%Q1.2	Default tag table
	Output12	Bool	%Q1.3	Default tag table
	Output13	Bool	%Q1.4	Default tag table
	Output14	Bool	%Q1.5	Default tag table
	Output15	Bool	%Q1.6	Default tag table
	Output16	Bool	%Q1.7	Default tag table

Рис.5.11– привязка тегів до модуля DQ

DQ 16x24VDC/0.5A BA_1 [DQ 16x24VDC/0.5A BA]				
General	IO tags	System constants	Texts	
	Name	Type	Address	Tag table
	bOut_Valve	Bool	%Q0.0	Default tag table
	bOut_Glikol	Bool	%Q0.1	Default tag table
	bOut_Water	Bool	%Q0.2	Default tag table
	bOut_Dry	Bool	%Q0.3	Default tag table
	bOut_support_...	Bool	%Q0.4	Default tag table
	bOut_sign	Bool	%Q0.5	Default tag table
	Output7	Bool	%Q0.6	Default tag table
	Output8	Bool	%Q0.7	Default tag table
	Output9	Bool	%Q1.0	Default tag table
	Output10	Bool	%Q1.1	Default tag table
	Output11	Bool	%Q1.2	Default tag table
	Output12	Bool	%Q1.3	Default tag table
	Output13	Bool	%Q1.4	Default tag table
	Output14	Bool	%Q1.5	Default tag table
	Output15	Bool	%Q1.6	Default tag table
	Output16	Bool	%Q1.7	Default tag table

Рис.5.12– привязка тегів до модуля DI

AI 4xUI/VRTD/TC ST_1 [AI 4xUI/VRTD/TC ST]				
General		IO tags	System constants	Texts
Name	Type	Address	Tag table	
A_In1	Int	%IW2	Default tag table	
A_In2	Int	%IW4	Default tag table	
A_In3	Int	%IW6	Default tag table	
A_In4	Int	%IW8	Default tag table	

Рис.5.13– привязка тегів до модуля AQ

AQ 2xUI ST_1 [AQ 2xUI ST]				
General		IO tags	System constants	Texts
Name	Type	Address	Tag table	
A_Out1	Int	%QW2	Default tag table	
A_Out2	Int	%QW4	Default tag table	

Рис.5.14– привязка тегів до модуля AI

Конфігурація аналогових модулів входу та виходу

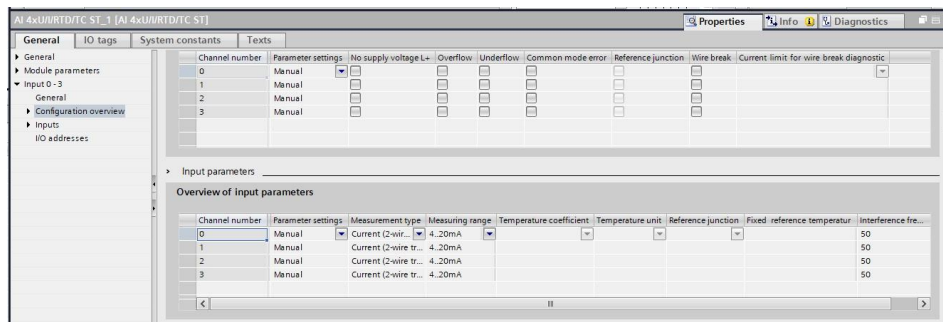


Рис.5.15– вибір типу сигналу для аналогового входного модулю

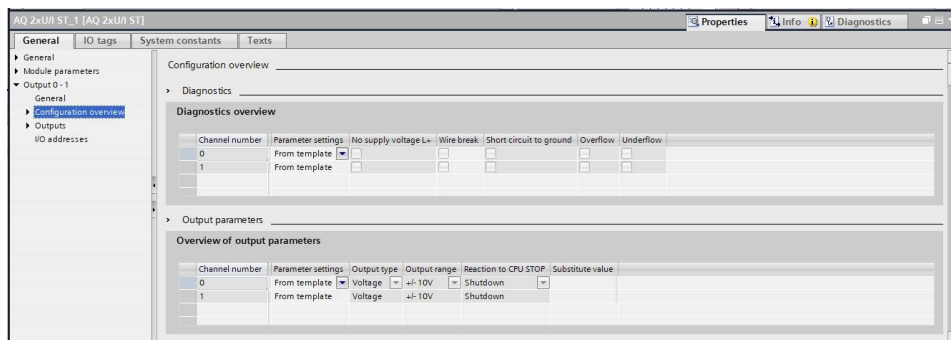


Рис.5.16– вибір типу сигналу для аналогового вихідного модулю

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

Алгоритми логічного керування отримали свою програмну реалізацію в програмах (функціональних блоках) «fb_proс» та «auto_run». «fb_proс» провидить опиту стану типового обладнання (електроприводів, клапанів і т.і), в якій використовуються типові блоки «TIA portal open_library_V15» Фрагменти програми «fb_proс» наведені на рисунку 5.17

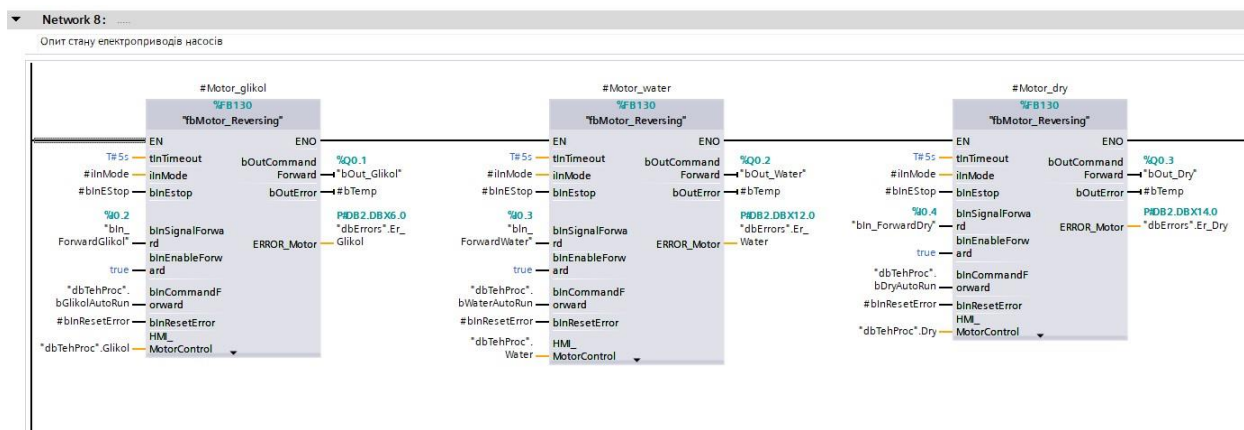


Рис.5.17– Фрагмент програми«fb_proc», опиту стану електродвигунів
Аналогічно проводиться опит стану регулюючих клапанів. За результатом
опиту станів формуються змінні bOutAuto та bOutError які будуть використані
при роботі програми «auto_run» (рис 6.10)

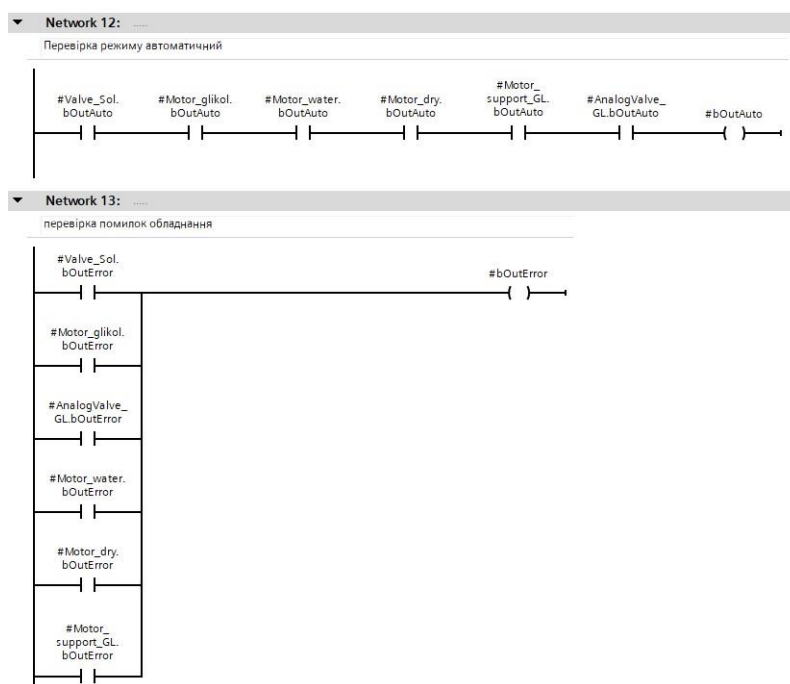


Рис.5.18– фрагмент підпрограми «fb_proc», яка перевіряє чи знаходиться
обладнання в режиму «автоматичний» та наявність помилки.

Далі розробляємо програму «AutoRun» відповідно до алгоритмів які були
представлені в 4 розділі

Фрагмент програми яка вмикає сигналізацію за запуск електродвигуна сухих
охолоджувачів представлений на рис 6.11, по команді «AutoRun» сигнал

приходить на «timer2»,та через 7 с. надходить на триггер який вмикає електродвигун.

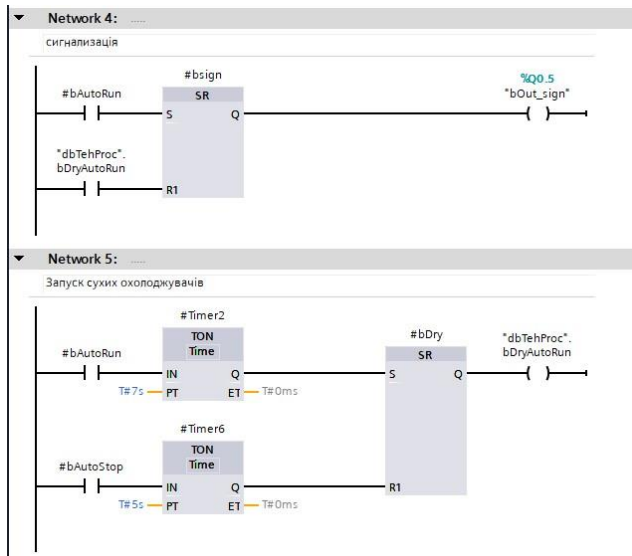


Рис.5.19— передпускова сигналізація за запуск електродвиуна сухих охолоджувачів

На рис 5.20 підпрограми «auto_run» розглянуто включення ПД регулятора для контуру температури гліколю та умову включення насосу при досягені певної температури.

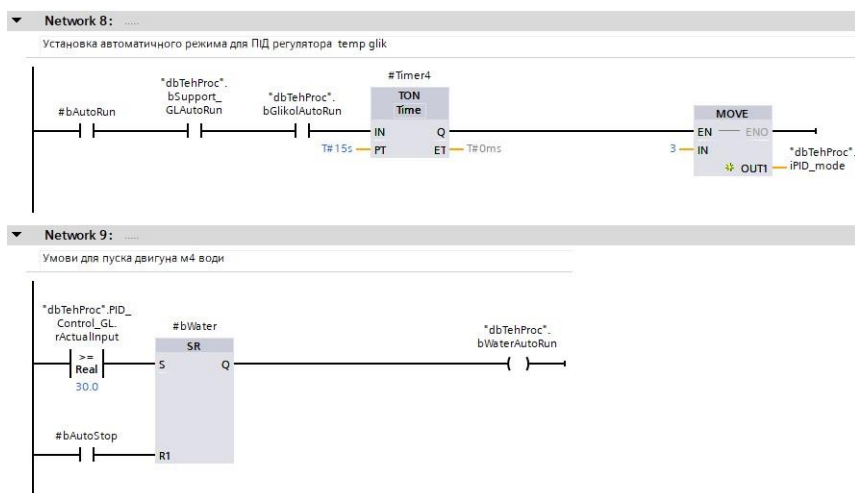


Рис.5.20— умови влючення ПД регулятора та умова вмикання двигуна М4 На рис.5.21 представлений фрагмент схеми який реалізує установку ручного режиму для ПД регулятора контуру води,гліколю. Та записує режим роботи регулятора.

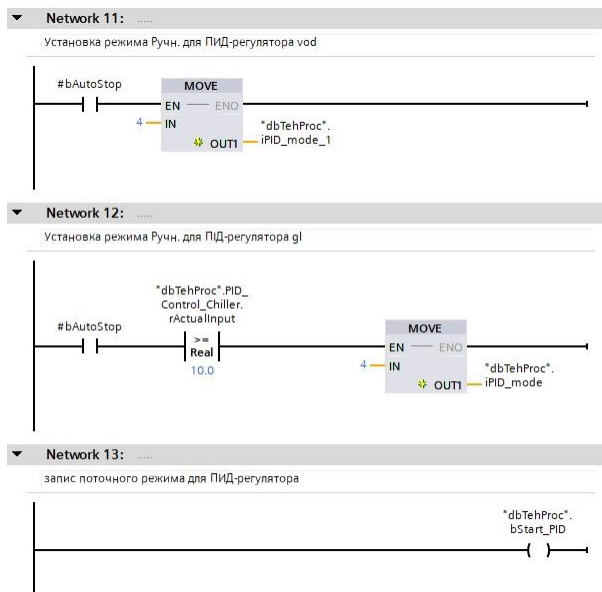


Рис.5.21– Уст. Ручного режиму ПІД регулятора та запис режиму ПІД регулятора

Проводимо тестування програми логічного керування із використанням засобів емуляції контролера.

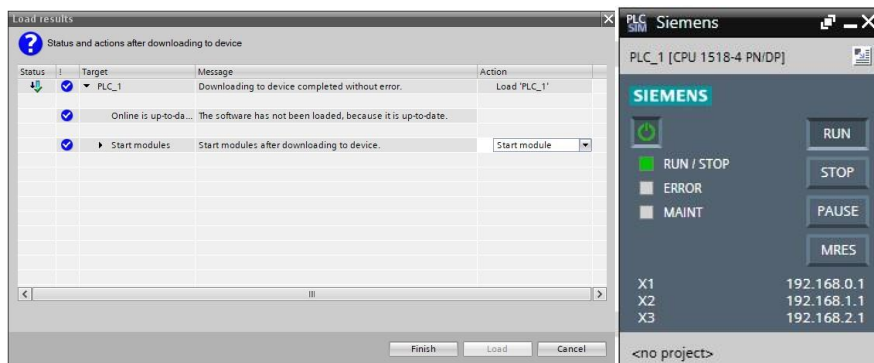


Рис.5.22– загрузка программы в контроллер та її перевірка

Розробка програм для реалізації алгоритмів регулювання

Модель ОР та алгоритми регулювання були розроблені в розділі 2 та 3.

У середовищі «TIAportal» проводимо їх програмну реалізацію.

Розробляємо підпрограму «fb_SAR», в якій моделі ОР реалізовані із використанням підпрограм (функціональних блоків) типових динамічних ланок із бібліотеки LSIM.

На рис 5.23, 5.24, 5.25 нведені фрагменти програми «fb_SAR»

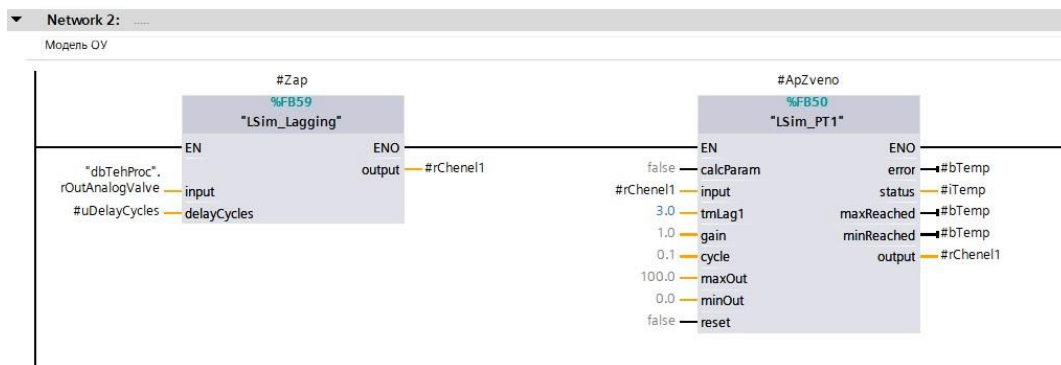


Рис.5.23—звено запізнення та аперериодичне звено 1-го порядку

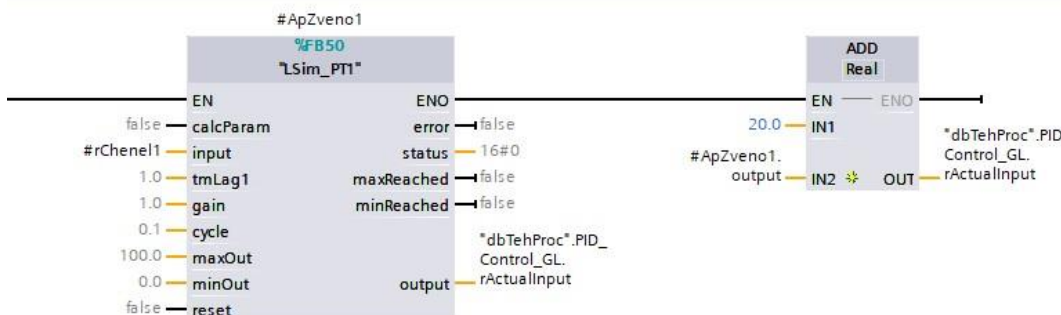


Рис.5.24— аперериодичне звено 2-го порядку та суматор В підпрограмі «fb_SAR» функціональний блок ПІД регулятора (рис 5.25) був релізований з використанням бібліотечного блоку «fbPID_Compact»

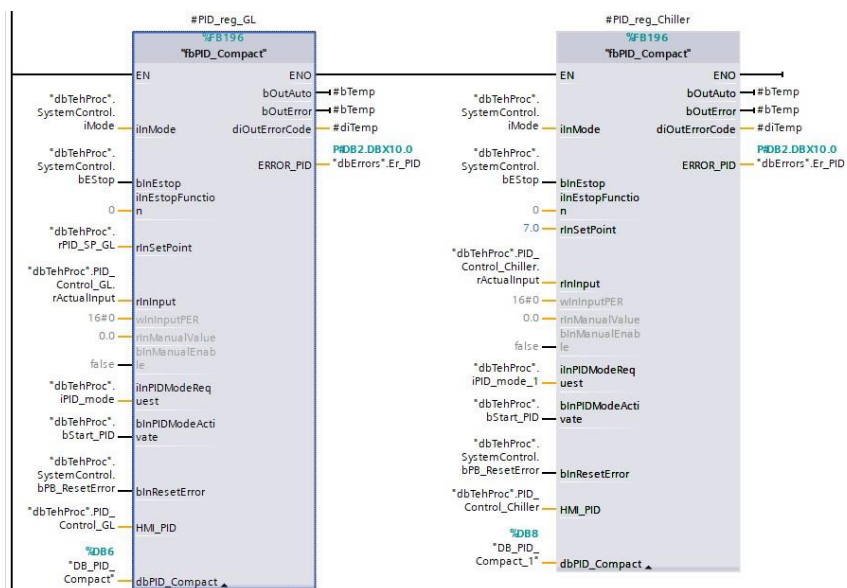


Рис.5.25— блок ПІД регулятор «fbPID_Compact»



Рис.5.26– перевірка на працездатність

В даному розділі було проведено розробку контролерно-комп'ютерної мережі та програмування алгоритмів регулювання та логічного керування САК. Проведене в режимі емуляції тестування програми підтвердило правильність роботи програми, відповідно до вимог алгоритму керування **Розробка SCADA для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК**

Конкретизація функцій і структури екранів АРМ оператора-технолога

АРМ оператора-технолога має передбачати можливість виконання оператором наступних функцій:

- контролювати значення технологічних параметрів процесу і задавати режими керування;
- контролювати стан технологічного обладнання (ввімкнено, вимкнено, знаходиться в аварії тощо) і значення експлуатаційних параметрів обладнання;
- керувати запуском і зупинкою ТА в ручному та автоматичному режимах керування;
- контролювати виникнення порушень в роботі обладнання і оперативно реагувати на них;
- формувати звіти за архівними даними для служб головного технолога, механіка та енергетика.

Розробка екранів АРМ оператора-технолога

- Схема установки. Основний екран із зображенням мнемосхеми технологічного процесу, який дозволяє контролювати хід ТП, керувати станом ТА, змінювати задані режими його роботи, контролювати виникнення порушень в роботі обладнання. У оператора є можливість перемикання між

екранам Alarms, Help, reset error. Оператор може здійснювати як автоматичний пуск, останов та керувати станом обладнання в ручному режимі.

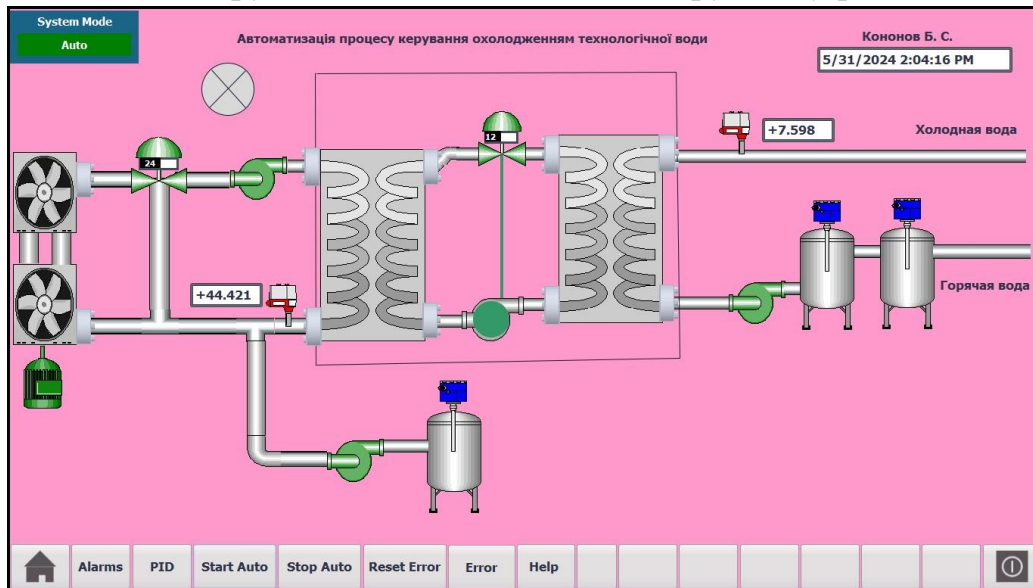


Рис.5.27– Головний екран АРМ

Конкретизація функцій та структури екранів АРМ наладчика САК

АРМ наладчика САК має передбачати можливість виконання оператором наступних функцій:

- налаштовувати контури регулювання (налаштовувати параметри регуляторів, тестувати роботу контурів регулювання);
- задавати значення затримок часу для таймерів, що використовуються в алгоритмах пуску і зупинки;
- задавати значення затримок часу для спрацьовування датчиків;
- задавати граничні значення технологічних параметрів;
- виконувати адміністрування користувачів системи; - виконувати аналіз системних повідомлень.

Обґрунтовуємо перелік екранів АРМ наладчика САК.

При реалізації АРМ наладчика САК були передбачені наступні екрани:

- Налаштування САК. Екран призначений для налаштування параметрів регуляторів, завдання затримок часу для спрацьовування датчиків

та правильної роботи алгоритмів автоматичного пуску та зупинки, завдання граничних значень технологічних параметрів

Розробка екранів АРМ наладчика САК

Для розробки були використані впливаючі вікна для функціонального блоку ПІД регулятора та компонент trend_1 для виводу графіків перехідного процесу та для зміни заданого значення.

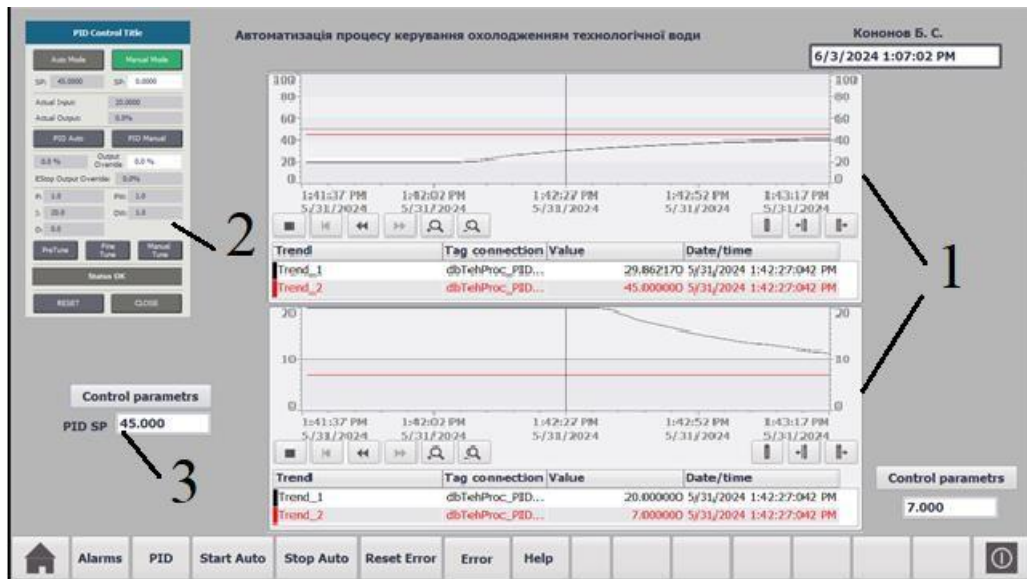


Рис.5.28– Екран наладчика САК

Для наладчика САК були розроблені наступні вкладки :

- 1- графіки перехідних процесів
- 2- екран для встановлювання параметрів ПІД регулятора
- 3- екран для завдання граничних значень технологічних параметрів

При виконанні самостійної роботи в середовищі TIA Portal розроблено програмне забезпечення АРМ оператора-технолога процесу охолодження води. АРМ дозволяє контролювати хід технологічного процесу, задавати режими роботи, здійснювати перемикання режимів управління обладнанням (АВТ / РУЧ) і управляти в ручному режимі окремим обладнанням. Відображати динаміку зміни технологічних параметрів, вести журнали подій.

5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

Одним з основних показників економічної оцінки інвестиційних проектів є показник чистого приведеного доходу (ЧПД).

Розрахунок чистого приведеного доходу здійснюється за формулою 14,17.

$$\text{ЧПД} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{ДП}_i}{(1+d)^i} - \text{ІС} \quad (14,17)$$

ІС – стартові інвестиції;

ДП_i – Сума чистих грошових надходжень, дисконтованих протягом n-років; Якщо ЧПД > 0, то це означає, що в результаті реалізації проекту прибутковість підприємства підвищується і проект можна вважати прийнятним.

$$\text{ЧПД} = 2\,515\,000 - 2\,020\,000 = 495 \text{ (тис. грн.)}$$

Один з найбільш використовуваних показників привабливості інвестиційного проекту є строк окупності інвестицій. Під строком окупності інвестицій СОІ у модернізацію техніки розуміють тривалість часу (періоду), протягом якого сума фінансових підсумків, дисконтованих на початок експлуатації нової техніки (або вкладення інвестицій) стане рівній сумі інвестицій. Розраховується за формулою 14,18:

$$\text{СОІ} = \frac{\text{ІС}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\text{ДП}_i}{(1+d)^i} \right)_{\text{ср}}} \quad (14,18)$$

де: $\sum_{i=1}^n \frac{\text{ДП}_i}{(1+d)^i}$ ср – середня сума чистого грошового потоку за період часу прийнятий

у розрахунках (місяць, квартал, рік) $2\,515\,000 / 5 = 503 \text{ (тис. грн.)}$

$$\text{СОІ} = 2\,020\,000 / 503 < 4 \text{ року.}$$

5.4 Висновки за розділом

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

2. В системі Matlab Розроблені моделі нових алгоритмів керування. Проведене тестування програмного забезпечення підтвердило його працездатність та ефективність. Розширення функцій системи 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 результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було проаналізовано технологічний процес охолодження технологічної води та досліджено можливості підвищення ефективності його функціонування засобами автоматичного керування.

Проведено аналіз технологічної схеми холодильної установки, визначено основні координати керування, збурюючі впливи та показники якості функціонування системи. Виконано структурну і параметричну ідентифікацію об'єкта керування, отримано математичні моделі основних каналів процесу та підтверджено їх адекватність експериментальним даним.

У роботі виконано вдосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання системи автоматичного керування процесом охолодження технологічної води. Проведено структурний та параметричний синтез системи автоматичного регулювання підвищеної динамічної точності, а також досліджено її функціонування в різних режимах роботи.

У результаті синтезу отримано систему керування, яка забезпечує кращі показники якості регулювання порівняно з базовою структурою. Проведені дослідження показали зменшення впливу зовнішніх збурень на процес регулювання, покращення динамічних характеристик та забезпечення стійкої роботи системи при зміні параметрів об'єкта керування.

У роботі досліджено можливість використання інтелектуальних методів керування. Розроблено та досліджено систему з нечітким регулятором, для якого сформовано базу правил і функції належності. Встановлено, що застосування нечіткої логіки дозволяє враховувати особливості нелінійного об'єкта керування та підвищувати гнучкість алгоритмів управління.

Також виконано розробку та навчання штучних нейронних мереж, які використовуються як нейрорегулятори. Результати моделювання підтвердили можливість їх ефективного застосування для керування

нелінійними об'єктами та забезпечення високої якості регулювання за умов зміни режимів роботи технологічного процесу.

Для підвищення енергоефективності холодильної установки було розроблено систему автоматичної оптимізації режимів роботи. Запропонована система забезпечує автоматичний вибір раціонального значення температури гліколю залежно від поточних умов функціонування та дозволяє підтримувати режим роботи холодильного агрегату, близький до оптимального за критерієм енергетичної ефективності.

Проведені дослідження показали, що використання розробленої системи автоматичної оптимізації дозволяє підвищити коефіцієнт енергетичної ефективності холодильного агрегату та зменшити енергетичні витрати без погіршення якості регулювання технологічного процесу.

У роботі також розроблено програмне забезпечення для реалізації запропонованих алгоритмів керування на базі промислового контролера Siemens. Проведене тестування підтвердило працездатність програмної реалізації та можливість впровадження розроблених рішень на діючих промислових об'єктах без суттєвої модернізації технічної структури системи керування.

Таким чином, поставлена в роботі мета досягнута. Розроблені алгоритми та структури систем автоматичного керування можуть бути використані для модернізації існуючих систем охолодження технологічної води з метою підвищення якості регулювання, надійності роботи обладнання та зниження енергетичних витрат.

1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форм навчання / за ред. В.А. Хобіна. – Одеса : ОНТУ, 2024. – 47 с.
2. Хобін В.А. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів : конспект лекцій. – Одеса, 2016. – 96 с.
3. Хобін В.А. Теорія автоматичного керування. Частина 1 : конспект лекцій. – Одеса, 2020. – 110 с.
4. Хобін В.А. Теорія автоматичного керування. Частина 2 : конспект лекцій. – Одеса, 2014. – 73 с.
5. Скаковський Ю.М. Проектування систем автоматизації. Частина 1 : конспект лекцій для студентів спеціальності 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Одеса : ОНАХТ, 2014. – 86 с.
6. Сичук Л.М., Світий І.М. Автоматизація технологічних процесів та виробництв : конспект лекцій для студентів напряму підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Одеса : ОНАХТ, 2013. – 88 с.
7. Хобін В.А. Спеціальні розділи теорії управління : конспект лекцій. – Одеса : ОНАХТ, 2010. – 62 с.
8. ДСТУ Б А.2.4-3:95. Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів.
9. ДСТУ Б А.2.4-4:95. Основні вимоги до робочої документації.
10. ДСТУ Б А.2.4-10:95. Правила виконання специфікацій устаткування, виробів і матеріалів.
11. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах.
12. Siemens AG. SIMATIC HMI WinCC Flexible 2005. User Manual. Order No. 6AV6691-1AB01-0AB0. – 2005. – 394 p.

- 13.Siemens AG. WinCC Flexible 2008 Compact / Standard / Advanced. User Manual. – 2008.
- 14.Siemens AG. SIMATIC. Components for Totally Integrated Automation. Catalog ST 70. Part 1. – 2010.
- 15.Siemens AG. Industrial Communication for Automation Systems and Drives. Catalog IK PI. – 2005.
- 16.Кононов Б. Автоматизація процесу керування охолодженням технологічної води : кваліфікаційна робота бакалавра / Одеський національний технологічний університет. – Одеса, 2024.
- 17.Yu F.W., Chan K.T., Chu H.Y. Efficiency Improvements of Air-Cooled Chillers Equipped with High Static Condenser Fans // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. – 2006. – Paper 749.
- 18.Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту. – Львів : Магнолія, 2010. – 279 с.
- 19.Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. Інтелектуальні системи. – Львів : Новий Світ, 2008. – 406 с.
- 20.Руденко О.Г., Бодянський Є.В. Штучні нейронні мережі. – Харків : Компанія СМІТ, 2006. – 404 с.
- 21.Архангельський В.І. та ін. Нейронні мережі в системах автоматизації. – Київ : Техніка, 1999. – 364 с.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДИ AUTOMATION OF WATER COOLING PROCESS

Кононов Б.С

Kononov B.S

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID 0009-0008-8012-2433

Email metalolol1234@gmail.com

Анотація. Автоматизація процесів охолодження технологічної води має важливе значення для забезпечення стабільності роботи фармацевтичного обладнання, систем вентиляції та кондиціонування у промисловості й побуті. Відомі способи автоматичного керування характеризуються низькою якістю готового продукту через недостатню динамічну точність регулювання, що зумовлено взаємним впливом контурів керування. Для забезпечення високої ефективності цього процесу ним треба керувати з використанням сучасних засобів автоматизації. Тому автоматизація процесу охолодження технологічної води є актуальним завданням. Розроблено параметризовану, параметричну та координатну схему холодильної установки як об'єкта керування. Конкретизовано основні регламенти. Проведено структурну і параметричну ідентифікацію моделі каналу перетворення дій об'єкта регулювання. Розроблено і параметрично оптимізовано алгоритми регулювання. Вибрано технічні засоби, за рахунок яких можна провести модернізацію обладнання. Розроблено технічну структуру мікропроцесорного ядра системи керування, здійснений вибір промислового контролера та його блоків вводу/виводу. В середовищі TIAportal розроблені програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання. Привиконанні роботи в середовищі SCADA-системи WinCCFlexible розроблено програмне забезпечення АРМ оператора і наладчика САК процесом охолодження технологічної води. Розроблено варіант комплексу технічної документації САК. Розглянуто питання техніки безпеки при монтажі, налагодженні та експлуатації розробленої системи.

Abstract

Automation of the technological water cooling process plays an important role in ensuring the

stable operation of pharmaceutical equipment, ventilation systems, and air-conditioning systems in industry and everyday applications. Existing control methods are characterized by insufficient control accuracy caused by the interaction between control loops, which reduces the overall efficiency of the process. Therefore, the automation of the technological water cooling process using modern control technologies is an important and relevant task.

A parameterized, parametric, and coordinate model of the refrigeration unit as a control object has been developed. The main technological constraints and operating regulations have been specified. Structural and parametric identification of the control channel model has been carried out. Control algorithms have been developed and optimized.

Technical means for equipment modernization have been selected. The hardware structure of the microprocessor-based control system has been developed, including the selection of an industrial controller and its input/output modules. Software implementing logical control and regulation algorithms has been developed in the TIA Portal environment. In addition, operator and maintenance workstation software for the automatic control system of the technological water cooling process has been developed using the WinCC Flexible SCADA environment.

A set of technical documentation for the automatic control system has been prepared. Occupational safety issues related to the installation, commissioning, and operation of the developed system have also been considered.

Ключові слова: автоматизація, автоматичне керування холодильна установка, автономне керування.

Key words: automation, automatic control refrigeration system, autonomous control

Вступ. Технологічна вода відіграє ключову роль у різних галузях промисловості, таких як наступні.

Енергетика - вода використовується як теплоносії у системах охолодження, а також для вироблення пари на теплових електростанціях.

Металургія - у процесах охолодження металургійних печей, прокатних станів і для промивання готової продукції.

Хімічна промисловість - як розчинник, реагент і теплоносії у виробництві хімічних речовин.

Харчова промисловість - для очищення обладнання, приготування напоїв і харчових продуктів.

Легка промисловість - у текстильній і целюлозно-паперовій промисловості вода використовується для просочення, фарбування і промивання тканин і паперу.

Залежно від області застосування вода може піддаватися різним методам очищення і підготовки, забезпечуючи необхідні параметри для конкретних виробничих завдань.

Фармацевтичне виробництво висуває особливо суворі вимоги до якості води, оскільки вона безпосередньо впливає на безпеку та ефективність лікарських препаратів. Основні напрямки використання води у фармацевтиці такі:

- виробництво лікарських препаратів - використовується як основний інгредієнт (наприклад, в ін'єкційних розчинах) або розчинник.
- очищення обладнання та приміщень - забезпечує стерильність виробничих процесів.
- система охолодження і пароутворення - бере участь у технологічних процесах нагріву та охолодження.

Фармацевтичне виробництво висуває суворі вимоги до температурних режимів на всіх компонентах виробництва - від синтезу активних речовин до зберігання готових препаратів. Охолоджена вода відіграє вирішальну роль у підтримці цих умов, забезпеченні стабільності клімату, роботі обладнання та контролі якості продукції.

Високу ефективність технологічного процесу охолодження технологічної води в фармацевтичному виробництві можна забезпечити лише шляхом використання автоматизації керування цим процесом оскільки вона дозволяє забезпечити застосування сучасних алгоритмів та технічних засобів в системі автоматичного керування (САК). Тому автоматизація охолодження технологічної води в фармацевтичній промисловості є актуальним завданням.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

Оскільки автоматичне керування процесом охолодження технологічної води є актуальним завданням, багато компаній та виробників холодильного обладнання пропонують різні технічні рішення для його реалізації. Так, компанія «Anyda Airchiller» розробила систему автоматичного керування холодильними установками на базі контролера Siemens S7-1500, яка забезпечує підтримання заданої температури гліколю та технологічної води, а також реалізує комплекс функцій захисту обладнання від аварійних режимів роботи [1].

Компанія «Holod-Proekt» запропонувала систему керування холодильною установкою на базі контролера Danfoss ERC213, яка забезпечує автоматичне регулювання параметрів процесу охолодження та захист елементів системи відповідно до заданого алгоритму функціонування [2].

Компанією Alpenta розроблено систему керування ACS (Alpenta Control System), яка здійснює збір технологічних даних та моніторинг роботи обладнання в режимі реального часу з метою підвищення енергоефективності та надійності функціонування холодильних

установок [3].

Відоме технічне рішення, що використовує адаптивний алгоритм QuickMind для автоматичного регулювання температури води залежно від режимів роботи системи. Перевагою такого підходу є використання адаптивної логіки керування поряд із традиційними пропорційними та пропорційно-інтегральними законами регулювання [4].

Також відомий спосіб автоматичного керування процесом охолодження технологічної води, який передбачає регулювання температури гліколю шляхом зміни його витрати через конденсатор, а температури технологічної води — шляхом зміни холодопродуктивності холодильної установки [5].

Компанією SHINI розроблено систему охолодження SIRE, яка поєднує традиційний холодильний цикл із системою Free Cooling. Система забезпечує автоматичне перемикавання режимів роботи та дозволяє суттєво знизити енергоспоживання за рахунок використання природного охолодження у холодний період року [6].

Компанія Frostland запропонувала автоматизовану холодильну систему з мікропроцесорним керуванням, яка забезпечує автоматичне регулювання технологічних параметрів, контроль аварійних режимів та комплексний захист обладнання [7].

Компанія Thermocold розробила чилер AWA SEA 055, обладнаний мікропроцесорною системою керування та електронним розширювальним клапаном, що дозволяє автоматично підтримувати оптимальні режими роботи та підвищувати енергоефективність установки [8].

Компанія Dalgakiran запропонувала систему керування на базі контролера Carel pCO, яка реалізує контроль температури та тиску холодоагенту, захист від замерзання випарника, контроль фаз живлення та інші функції безпечної експлуатації холодильного обладнання [9].

Компанією Daikin розроблено серію чилерів EUWA-LZ з мікропроцесорним керуванням, які забезпечують автоматичне підтримання режимів роботи холодильного агрегату, контроль основних технологічних параметрів та підвищену енергоефективність системи [10].

Аналіз відомих технічних рішень показав, що більшість існуючих систем автоматичного керування забезпечують стабілізацію основних технологічних параметрів і реалізують функції захисту обладнання. Однак вони переважно побудовані на класичних принципах автоматичного регулювання та не враховують повною мірою взаємний вплив контурів керування, зміну режимів роботи об'єкта та можливість автоматичної оптимізації енергоспоживання. Це обумовлює необхідність розробки удосконаленої системи автоматичного керування процесом охолодження технологічної води, яка забезпечуватиме підвищену динамічну точність регулювання та покращені показники енергоефективності.

Недоліком усіх перелічених способів є низька якість готового продукту в результаті низької динамічної точності керування через не врахування шкідливого впливу контурів регулювання один на одного.

Мета і завдання дослідження.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу охолодження технологічної води шляхом компенсації взаємного впливу контурів регулювання та підвищення динамічної точності системи автоматичного керування.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- аналіз процесу охолодження технологічної води як об'єкта керування;
- розробка комплексу моделей процесу охолодження технологічної води як об'єкта регулювання та проведення моделювання для підтвердження відповідності отриманих моделей експериментальним даним;
- розробка варіантів алгоритмів регулювання, проведення їх параметричної оптимізації, порівняльного аналізу САР, синтезу та аналізу САР підвищеної динамічної точності;
- дослідження можливості застосування нечітких регуляторів та нейромережових алгоритмів керування для підвищення якості регулювання;
- розробка системи автоматичного керування, що реалізує функцію мінімізації енерговитрат під час роботи холодильної установки;
- складання регламенту функціонування та алгоритмів пуску-зупинки процесу охолодження технологічної води;
- проведення вибору технічних засобів, що забезпечують належне керування процесом;
- розробка технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом охолодження технологічної води;
- вибір промислового контролера та його блоків введення/виведення;
- розробка програм, що реалізують алгоритми логічного керування та регулювання в середовищі TIA Portal;
- створення системи керування в середовищі TIA Portal, розробка програмного забезпечення АРМ оператора і наладчика САК процесу охолодження технологічної води;
- розробка комплексу технічної документації САК;
- розгляд питань безпечної та надійної експлуатації системи.

Методи і матеріали досліджень.

Основним методом дослідження є системний аналіз, завдяки якому процес охолодження технологічної води розглядається як багатоконтурний об'єкт керування з взаємопов'язаними каналами регулювання. Для отримання математичних моделей використовувалися методи

активного експерименту, структурної та параметричної ідентифікації, а також інженерні методики визначення параметрів об'єкта керування.

При розробці систем автоматичного регулювання застосовувалися методи теорії автоматичного керування, зокрема методи структурного та параметричного синтезу, оптимізації параметрів регуляторів, а також методи побудови систем підвищеної динамічної точності. Для дослідження інтелектуальних алгоритмів використовувалися методи нечіткої логіки та штучних нейронних мереж.

Основним інструментом дослідження було імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, яке використовувалося для аналізу динамічних характеристик системи, оцінки якості регулювання та перевірки ефективності запропонованих технічних рішень.

Результати досліджень.

На початковому етапі дослідження було проведено аналіз технологічного процесу охолодження технологічної води та особливостей функціонування холодильної установки.

Технологічна вода після споживача з температурою близько 12 °C надходить до буферних ємностей, звідки подається до випарника холодильної машини. У випарнику відбувається кипіння холодоагенту при низькій температурі, внаслідок чого здійснюється відведення теплоти від води та її охолодження до температури 7 °C. Необхідна температура води підтримується шляхом регулювання холодопродуктивності холодильної установки зміною частоти обертання електропривода компресорної станції.

Після випаровування холодоагент надходить до двоступеневого поршневого компресора, де стискається до необхідного тиску, після чого подається до конденсатора. Відведення теплоти конденсації здійснюється за допомогою гліколевого контуру. Температура гліколю на виході з конденсатора підтримується на рівні 45 °C шляхом регулювання його витрати через теплообмінне обладнання. Надалі нагрітий гліколь охолоджується в сухих охолоджувачах, розташованих на покрівлі виробничого приміщення.

У системі також передбачено режим вільного охолодження (Free Cooling), який дозволяє використовувати низьку температуру навколишнього середовища для охолодження технологічної води без залучення компресорної холодильної машини. У цьому режимі тепло від технологічної води відводиться через теплообмінник безпосередньо до гліколевого контуру.

Залежно від температури зовнішнього повітря система автоматично обирає режим роботи. При зниженні температури зовнішнього повітря нижче 1,5 °C здійснюється автоматичний перехід у режим вільного охолодження. При підвищенні температури зовнішнього повітря

до 1,8 °C система автоматично повертається до режиму роботи холодильної машини. Такий алгоритм забезпечує безперервність технологічного процесу та дозволяє суттєво знизити енергоспоживання в холодний період року.

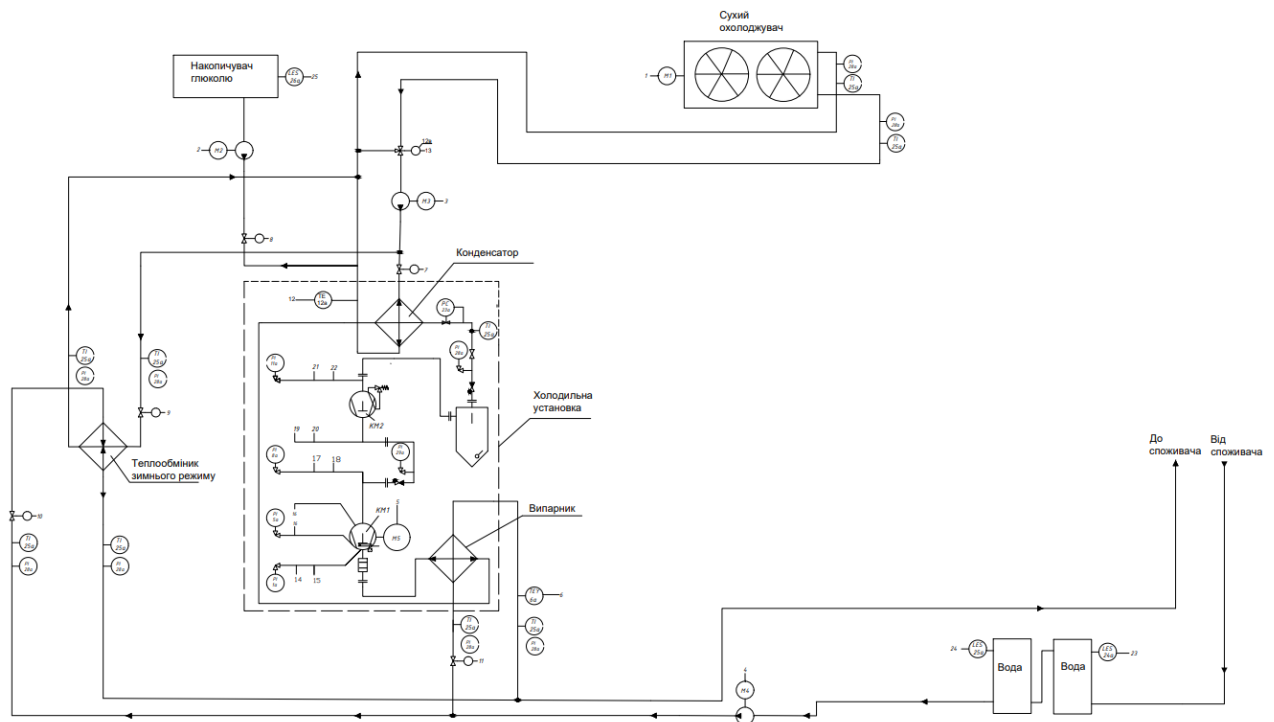


Рис. 1– Технологічна схема процесу керування витоком зерна з підвагового бункера до лінії завантаження суден

Fig. 1– Technological scheme of the process of controlling the flow of grain from the weighing bunker to the ship loading line

Далі було проведено параметризацію технологічної схеми (рис. 2), побудовано параметричну схему (рис. 3) та структурну схему об'єкта регулювання (ОР) (рис. 4).

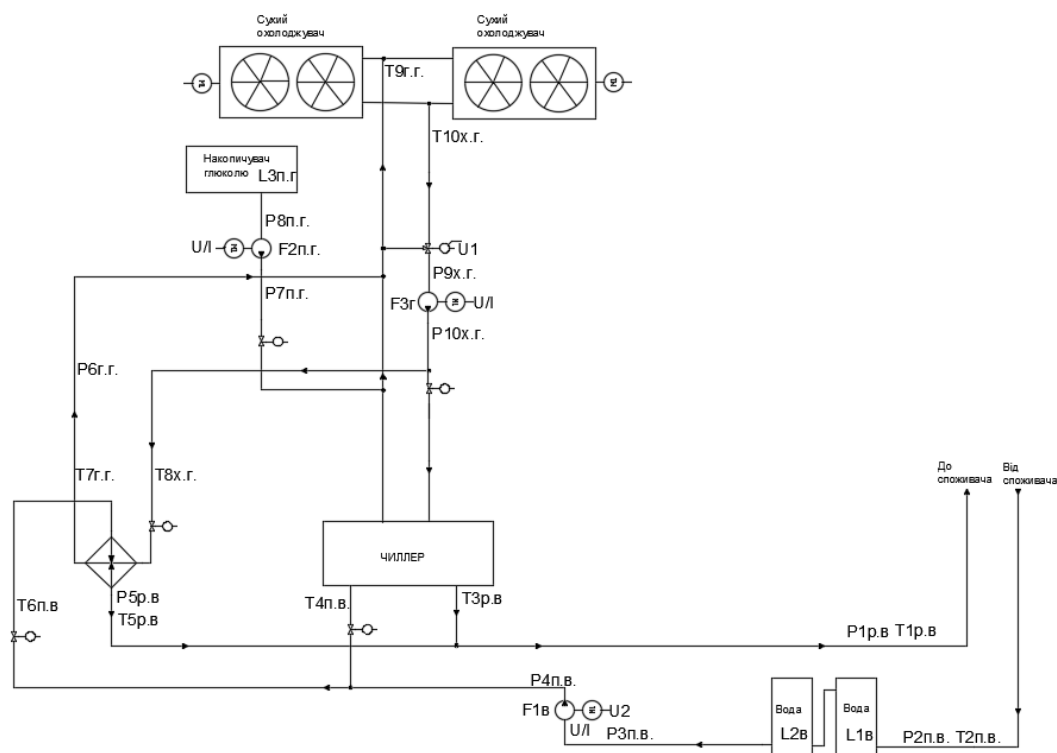


Рис. 2– Параметризована технологічна схема холодильної машини

Fig. 2– Parametrized technological diagram of a refrigeration unit

$F_{п.в}$, $T_{п.в}$, $P_{п.в}$ – витрати, температури і тиск води від споживача;

$F_{р.в}$, $T_{р.в}$, $P_{р.в}$ – витрати, температури і тиск води до споживача;

$F_{х.г}$, $T_{х.г}$, $P_{х.г}$ – витрати, температури і тиск «холодного» гліколю;

$F_{г.г}$, $T_{г.г}$, $P_{г.г}$ – витрати, температури і тиск «гарячого» гліколю;

$P_{п.г}$, $F_{п.г}$ – тиск та витрати підпитки гліколя;

Q_T – теплопередача теплообмінника;

U , I – параметри двигунів електроприводу (ПЕД) насосів.

$L1в$, $L2в$ – рівень у проміжних баках з водою

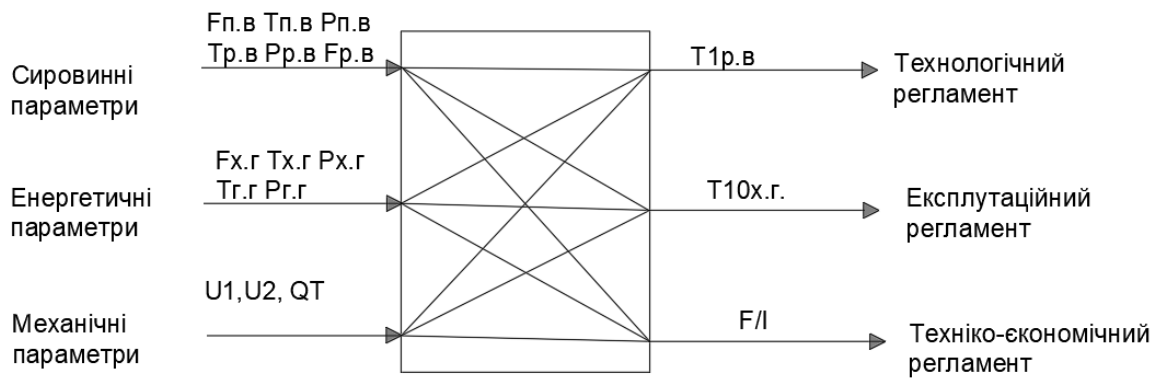


Рис. 3– Параметрична схема технологічного процесу витоку зерна з підвагового бункера

Fig. 3– Parametric diagram of the technological process of grain leakage from the weighing bunker

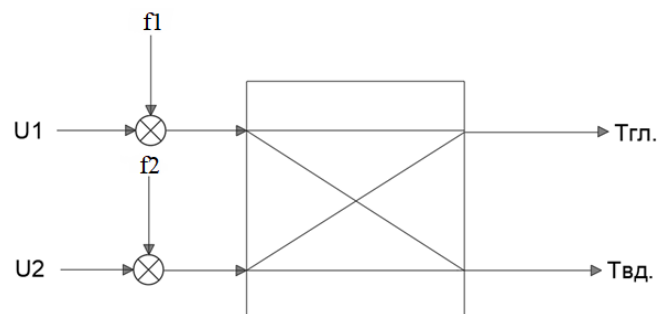


Рис. 4– Структурна схема процесу витоку зерна з підвагового бункера як об'єкту регулювання

Fig. 4– Structural diagram of the process of grain leakage from the weighing bunker as an object of regulation

U1- змінення положення регулюючого клапана який змінює витрати гліколю

U2 – змінення частота обертів компресора холодильної машини, яка змінюється частотним перетворювачем

f1 та f2-вектор неконтрольованих збурень

Тгл-температура гліколю

Твд-температура води

Провели ідентифікацію моделі каналу «U1-Тгл» «U1-Твд» «U2-Твд» «U2-Тгл» перетворення об'єкта регулювання. За результатами активного експерименту об'єкт визначено як статичний. Було побудовано схему моделі неконтрольованих збурень.

Генерацію результатів пасивного експерименту забезпечено програмою rgen у середовищі Matlab. Для ідентифікації моделей неконтрольованих координатних збурень використали програму IdSoft середовища Matlab. Провели реалізація моделей у середовищі Matlab і підтвердження їх відповідності експериментальним даним. В пакеті Simulink середовища Matlab для каналу ОК розроблено схему моделювання для моделі 1-го і 2-го порядку. Для реалізації повної моделі ОК об'єднано моделі динаміки каналів ОК. Модель ОК достатньо точно відображає експериментальні дані, що означає адекватність моделі ОК. Для відтворення моделі збурень як стохастичних процесів (СП) із заданими властивостями використано метод формуючого фільтру. Похибка відтворення σ_f менша 5%, а значить точність моделі неконтрольованих збурювань є достатньою. Повна модель ОК містить у собі повну модель каналів і модель вхідних дій. Проведено експерименти з повною моделлю ОК. Як показують їх результати, модель ОК в достатній мірі відтворює результати експериментальних досліджень. Здійснено конкретизацію задач регулювання технологічним агрегатом Процес керування процесом охолодження технологічної води є об'єктом неперервної дії. Для нього є характерним тривалий робочий режим, на який об'єкт виводять дистанційно. Режими пуску і зупинки є неекономічними режимами роботи установки. Підвищення економічної ефективності роботи цього процесу в режимах пуску і зупинки можна досягти, автоматизувавши ці завдання. Тому для даного технологічного процесу актуальна автоматизація задачі логічного керування. Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів Температура гліколю на виході чиллера має підтримуватися на рівні 45 °C з точністю $\pm 0,5^\circ\text{C}$. За цим параметром припустимі короточасні відхилення до $\pm 2^\circ\text{C}$ протягом часу не більше 100 с. Температура води на виході чиллера має підтримуватися на рівні 7 °C з точністю $\pm 0,2^\circ\text{C}$. За цим параметром припустимі короточасні відхилення до $\pm 1^\circ\text{C}$ протягом часу не більше 200 с. Регламентом на функціонування САР охолодження технологічної води висуваються жорсткі вимоги до тривалих відхилень, тому в якості критерію оптимальності обрано інтегральний модульний критерій, що істотно штрафує незначні відхилення і мало штрафує короточасні відхилення:

$$J = \int_0^{t_M} [|\Delta M(t)|] dt$$

Оснoву керування становить інформація про мету керування або про бажаний стан ОК u^* , про поточний стан ОК y^* та про збурення. Для системи керування процесом охолодження технологічної води доступною, крім інформації про бажаний стан ОК, є інформація про

поточний стан ОК. Такий обсяг інформації для формування керуючого впливу (u) достатній для реалізації замкнутого принципу керування. Тому саме цей принцип і покладено в основу розробленої САР.

Проведено параметричний синтез і аналіз САР базової структури.

Процес за каналом «U1-Тгл» «U2-Твод» має астатичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обрано пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) алгоритми регулювання. Порівняли перехідні процеси в САР з ПІД-регулятором до і після оптимізації за інтегральним і прямими показниками якості (табл. 1).

Таблиця 1– Результати порівняння варіантів САР

САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_{gl}^{MAKSC}, ^\circ C$	$T_{пп1}, c$	$\Delta T_{vod}^{MAKSC}, ^\circ C$	$T_{пп2}, c$	
ПІ	1.6	107.5	0.77	225	88.25
ПІД	1.37	88	0.7	103	50.45

Як видно з результатів порівняння перехідних процесів, САР з ПІД-регулятором є кращою за усіма показниками. Тому далі використано ПІД-закон регулювання. САРі з ПІ-регулятором і з ПІД-регулятором є грубою. 50.45 Результати оцінки САР на грубість показують, що "найсприятливішим" для керування сполученням параметрів ОК є більший на 20% час запізнення ОК, а "найнесприятливішим" для керування сполученням- на 20% менший час запізнення. Проведено структурний і параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності і її аналіз. Виявлено, що основною причиною недостатньої динамічної точності САР є зміна передісторії заданого значення. Основним шляхом підвищення динамічної точності розглянутої САР є побудова автономної САР (рис. 5).

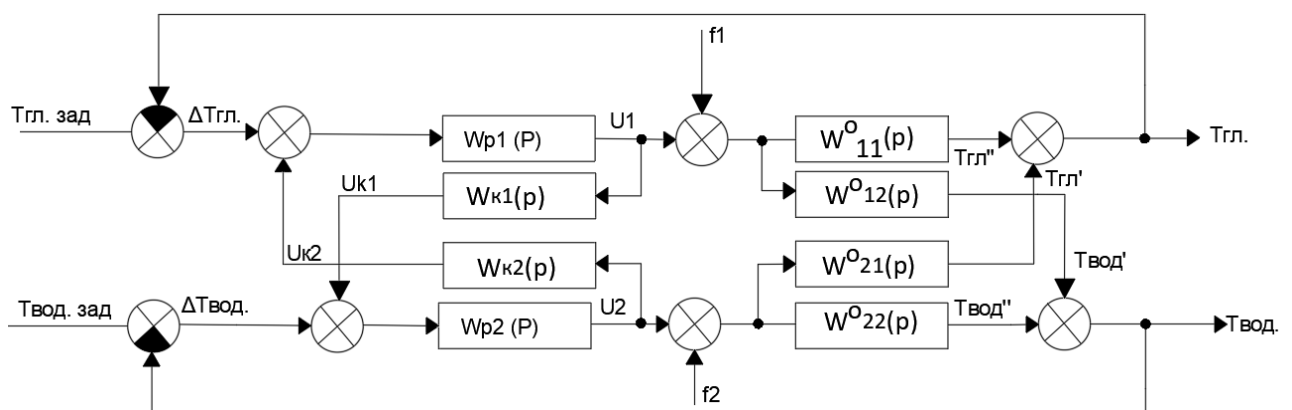


Рис.5- Структурна схема САР підвищеної динамічної точності

Fig. 5– Structural diagram of an ATS with increased dynamic accuracy

Було конкретизовано задачу і розроблено алгоритм пуску ділянки охолодження води. Здійснено вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізацію керуючих впливів, які забезпечують належне та якісне керування процесом охолодження води. Класи точності, ступінь захисту та ступінь вибухозахисту пристроїв відповідають виробничим умовам технологічного процесу.

Програмна реалізація алгоритмів логічного керування виконана в програмному модулі PLC_PRG. Графічний інтерфейс при тестуванні алгоритму пуску наведено на рис. 6. Розроблена технічна структура мікропроцесорного ядра системи процесу керування охолодження технологічної води. Здійснений вибір промислового контролера та його блоків вводу/виводу, в середовищі TIAportal, розроблені програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання, проведена їх перевірка, яка засвідчила роботоспроможність програм та їх відповідність алгоритмам керування.

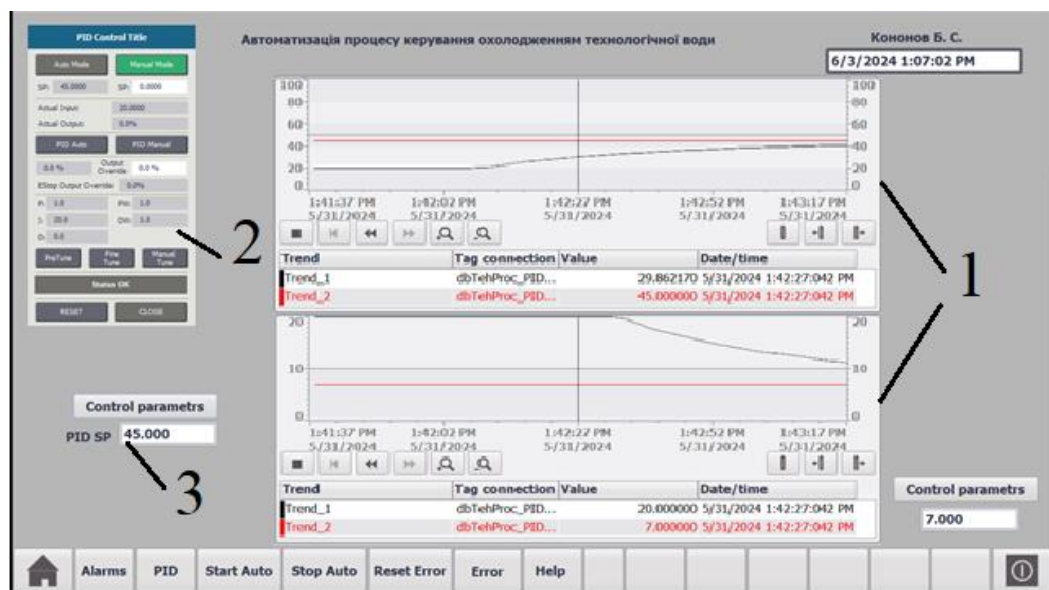


Рис. 6– Фрагмент графічного інтерфейсу оператора

Fig. 6– Fragment of the operator's graphical interface

- 1- графіки перехідних процесів
- 2- екран для встановлювання параметрів ПІД регулятора
- 3- екран для завдання граничних значень технологічних параметрів

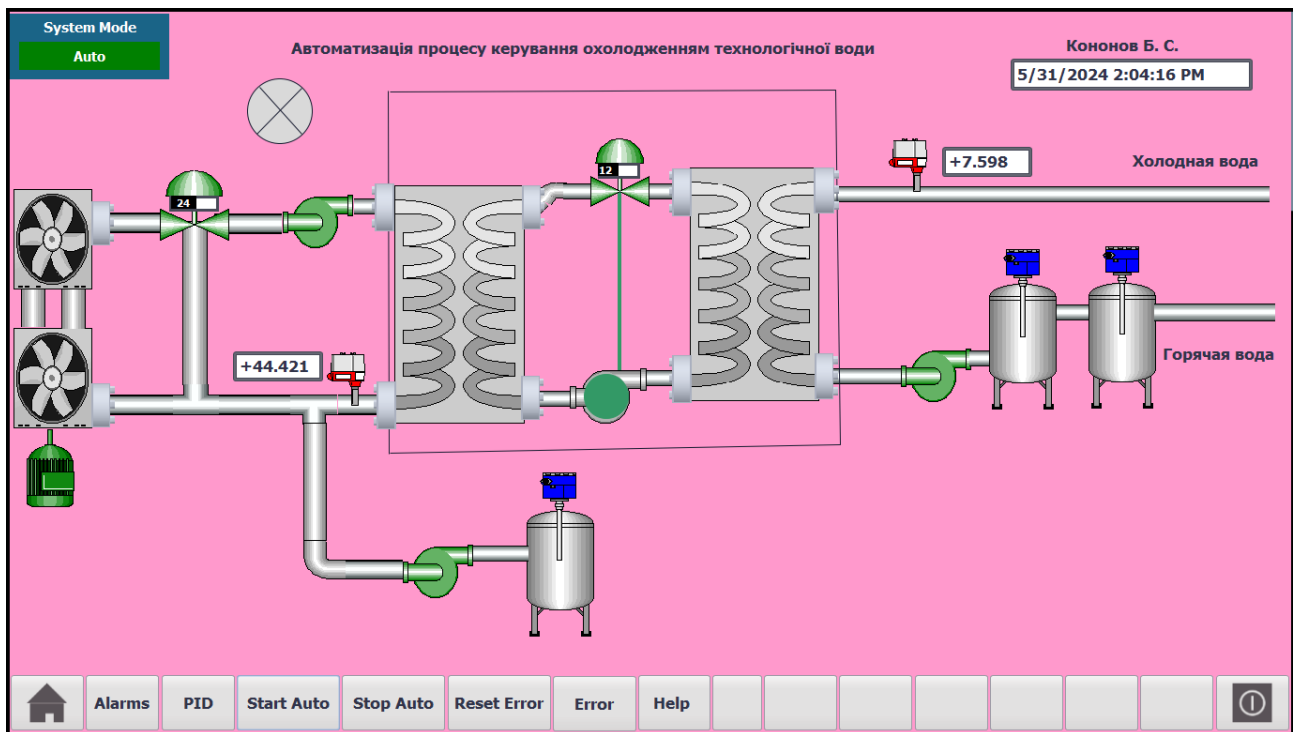


Рис. 7– Загальний вигляд екрану «Схема установки» при нормальній роботі

Fig. 7– General view of the “Installation diagram” screen during normal operation

Результати тестування програми у режимі емуляції контролера, що реалізує керування пуском та останном процесу, підтверджують коректність реалізації програми моделі САР та програми логічного керування. Розроблена SCADA-система для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК. Конкретизовано функції і структури екранів АРМ оператора-технолога. На рис. 7 представлений екран «Схема установки» при працюючому в автоматичному режимі процесі, без порушень режиму роботи і справному обладнанні з відкритими екранними формами керування засувками і двигунами.

АРМ дозволяє контролювати хід технологічного процесу, задавати режими роботи, здійснювати перемикання режимів керування обладнанням поточно-транспортної лінії (АВТ / РУЧ) і керувати в ручному режимі окремим обладнанням, проводити налаштування і налагодження САК, відображати динаміку зміни технологічних параметрів, вести журнали подій, проводити адміністрування користувачів програми. Розроблено фрагменти документації технічного забезпечення САК та заходів з охорони безпеки. Виконаний опис функціональної схеми автоматизації, опис принципової електричної схеми електроприводу та опис принципової електричної схеми живлення. Обговорення результатів. САР з ПД-регулятором в перехідних режимах задовольняє гранично припустимим вимогам, а САР з ПІ-регулятором не задовольняє цим вимогам за максимальним динамічним відхиленням. САР базової структури в сталих режимах не виходить за рамки зони неважливих відхилень.

Обговорення результатів. САР підвищеної динамічної точності задовольняє гранично припустимим вимогам Після підвищення динамічної точності САР максимальне динамічне відхилення $\Delta T_{\text{ГЛ}}$ не змінилося; час перехідного процесу за $\Delta T_{\text{ГЛ}}$ не змінився; протеколивальність системи по $T_{\text{вод}}$ зменшилося, час перехідного процесу за $\Delta T_{\text{вод}}$ не зменшився, інтегральний показник якості зменшився на 10%.

САР підвищеної динамічної точності є грубою. Оскільки САР підвищеної динамічної точності дає суттєве покращення показників якості регулювання у порівнянні з САР базової структури, тому САР підвищеної динамічної точності використовувати є доцільним (рис. 8, табл. 2).

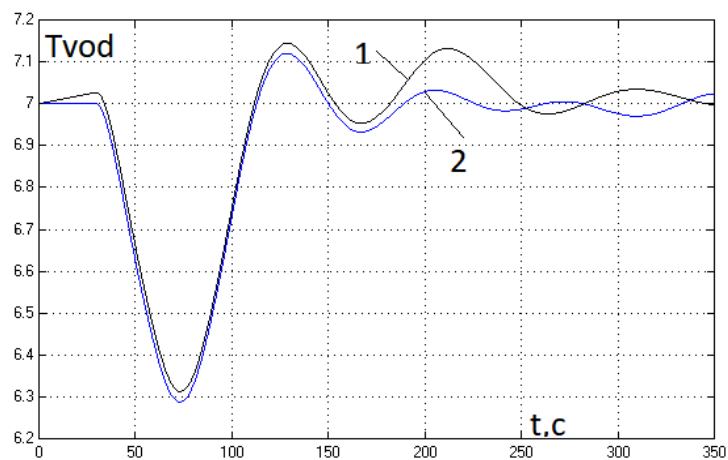


Рис. 8– Результати порівняння якості роботи САР базової структури (1) і САРпідвищеної динамічної точності (2)

Fig. 8– Results of comparison of the performance of the basic structure ATS (1) and the ATS with increased dynamic accuracy (2)

Таблиця 2– Результати порівняння варіантів САР

Алгоритм керування	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_{\text{ГЛ}}^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{c}$	$\Delta T_{\text{вод}}^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп2}}, \text{c}$	
ПІД	1.37	88	0.7	103	50.45
Автономна	1.37	88	0.7	102.5	50.40

Висновки

Оскільки зерно є стратегічним продуктом держави і експортується за кордон, дуже важливим є забезпечення умов його транспортування, в основному водним транспортом і збереження його споживних властивостей. Технологічний процес завантаження суден зерном вимагає якомога більшої стабільності за умови заданої продуктивності поточно-транспортної системи. Для забезпечення високої ефективності процесу завантаження суден зерном ним треба керувати з використанням сучасних засобів автоматизації. Автоматизація процесу завантаження суден зерном є актуальним завданням. Розглянуто технологічний процес витоку зерна з підвагового бункера. Як об'єкт керування розглянуто підваговий бункер. Розроблено параметризовану, параметричну та координатну схему об'єкту керування. Конкретизовано основні регламенти. Проведено структурну і параметричну ідентифікацію моделі каналу перетворення дій об'єкта регулювання. 93 Автоматизація технологічних і бізнес-процесів

Розроблено і параметрично оптимізовано алгоритми регулювання. Вибрано технічні засоби, за рахунок яких можна провести модернізацію обладнання. Розроблено технічну структуру мікропроцесорного ядра системи керування процесом витоку зерна з підвагового бункеру, здійснений вибір промислового контролера та його блоків вводу/виводу. Всередовищі CoDeSys розроблені програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання. При виконанні роботи в середовищі SCADA-системи WinCCFlexible розроблено програмне забезпечення АРМоператора і наладчика САК процесом витоку зерна з підвагового бункеру. Розроблено варіант комплекту технічної документації САК. Розглянуто питання техніки безпеки при монтажі, налагодженні та експлуатації розробленої системи.

Список використаних джерел

1. Етиленгліколева холодильна установка / Офіційний сайт компанії Anyda Airchiller. – URL: <https://ru.anyda-airchiller.com/low-temperature-chiller/air-cooled-low-temperature-chiller/ethylene-glycol-refrigeration-unit.html>
2. Реалізація проекту щита управління холодильної установки / Офіційний сайт компанії Holod-Proekt. – URL: <http://holod-proekt.com/2019/10/project-implementation-of-the-control-panel-of-the-refrigeration-unit-part-3-components-of-the-control-panel-control-elements>
3. Чилери Alpenta / Офіційний сайт компанії Aerostar. – URL: <https://aerostar.ua/ru/catalogue/alpenta/chillery>
4. Каталог обладнання Climaveneta / Офіційний сайт компанії Aclima. – URL: <https://aclima.ua/ru/catalog/climaveneta/chillery/chillery-s-vodyanyom-ohlazhdeniem-kondensatora/oborudovanie-1497>
5. Контролер CAREL mChiller Enhanced / Офіційний сайт компанії Eurocool. – URL: <https://eurocool.dp.ua/ua/p1434690934uchbd00001130-kontroller-carel.html>
6. Чилери SHINI / Офіційний сайт компанії Shini Ukraine. – URL: <https://shinieurope.com.ua/ru/chillery/>
7. Тепловий насос / чиллер модульного типу / Офіційний сайт компанії Frostland. – URL: <https://frostland.com.ua/uk/product/teplovij-nasos-chiler-qohol-130-kvt-qobigr-140-kvt-povitrya-voda-modulnogo-tipu/>
8. Чиллер Thermocold AWA SEA 055 / Офіційний сайт компанії SP-Chiller. – URL: <https://www.sp-chiller.com.ua/ru/product/chyller-199-kvt-vozdukh-voda-thermocold-awa-sea-055/>
9. Чилери серії EBSV / Офіційний сайт компанії Dalgakiran Україна. – URL: <https://dalgakiran.ua/ru/products/chillery-serii-ebsv/>
10. Чилери Daikin EUWA-LZ з водяним охолодженням / Офіційний сайт компанії Infrost. – URL: http://www.infrost.com.ua/chiller/daikin_chiller/euwalz.html
11. Кононов Б.О. «Автоматизація процесу охолодження технологічної води» / Магістерська кваліфікаційна робота. – Одеса: ОНТУ, 2026. – 164 с.

List of References

1. Ethylene Glycol Refrigeration Unit / Official website of Anyda Airchiller. – URL: <https://ru.anyda-airchiller.com/low-temperature-chiller/air-cooled-low-temperature-chiller/ethylene-glycol-refrigeration-unit.html>
2. Refrigeration Unit Control Panel Project Implementation / Official website of Holod-Proekt. – URL: <http://holod-proekt.com/2019/10/project-implementation-of-the-control-panel-of-the-refrigeration-unit-part-3-components-of-the-control-panel-control-elements>
3. Alpenta Chillers / Official website of Aerostar. – URL: <https://aerostar.ua/ru/catalogue/alpenta/chillery>
4. Climaveneta Equipment Catalogue / Official website of Aclima. – URL: <https://aclima.ua/ru/catalog/climaveneta/chillery/chillery-s-vodyanyom-ohlazhdeniem-kondensatora/oborudovanie-1497>
5. CAREL mChiller Enhanced Controller / Official website of Eurocool. – URL: <https://eurocool.dp.ua/ua/p1434690934uchbd00001130-kontroller-carel.html>
6. SHINI Chillers / Official website of Shini Ukraine. – URL: <https://shinieurope.com.ua/ru/chillery/>
7. Modular Heat Pump / Chiller Unit / Official website of Frostland. – URL: <https://frostland.com.ua/uk/product/teplovij-nasos-chiler-qohol-130-kvt-qobigr-140-kvt-povitrya-voda-modulnogo-tipu/>
8. Thermocold AWA SEA 055 Chiller / Official website of SP-Chiller. – URL: <https://www.sp-chiller.com.ua/ru/product/chyller-199-kvt-vozdukh-voda-thermocold-awa-sea-055/>
9. EBSV Series Chillers / Official website of Dalgakiran Ukraine. – URL: <https://dalgakiran.ua/ru/products/chillery-serii-ebsv/>
10. Daikin EUWA-LZ Water-Cooled Chillers / Official website of Infrost. – URL: http://www.infrost.com.ua/chiller/daikin_chiller/euwalz.html
11. Kononov B.O. “Automation of the Technological Water Cooling Process” / Master's Qualification Thesis. – Odessa: ONTU, 2026. – 164 p.

References IEEE

**Спосіб автоматичного керування процесом охолодження
технологічної води**

Корисна модель відноситься до способу автоматичного керування процесом охолодження технологічної води і може бути використана для охолодження пуансона пресу для таблетування в фармацевтичній промисловості, а також у системах вентиляції та кондиціонування в будь яких сферах промисловості та побуті.

Відомий спосіб автоматичного керування процесом охолодження технологічної води, який містить однокристальний контролер Siemens S7-1500, що забезпечує підтримку на заданому рівні температури гліколю та температури технологічної води, а також захист від високої напруги, захист від вимкнення води, захист від перевантаження за струмом, захист від точки витоку, безперервність фази та захист від обриву фази, захист від високої температури, відмови датчика, сигналізацію низького рівня рідини та інші [Етиленгліколева холодильна установка (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «Anyda Airchiller.com».- URL: <https://ru.anyda-airchiller.com/low-temperature-chiller/air-cooled-low-temperature-chiller/ethylene-glycol-refrigeration-unit.html>].

Недоліком даного способу є низька якість готового продукту в результаті низької динамічної точності керування через не врахування шкідливого впливу контурів регулювання один на одного

Також відомий спосіб керування процесом охолодження технологічної води за допомогою контролера управління Danfoss серії ERC213. Щит керування холодильною установкою являє собою пристрій, у якому встановлено необхідні пристрої та апаратуру, за допомогою яких відбувається регулювання і захист необхідних параметрів електропостачання холодильної установки в автоматичному режимі завдяки заданому алгоритму роботи за допомогою

керівних елементів - контролерів і реле. [Реалізація проекту щита управління холодильної установки. (електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «holod-proekt.com». -URL: <http://holod-proekt.com/2019/10/project-implementation-of-the-control-panel-of-the-refrigeration-unit-part-3-components-of-the-control-panel-control-elements>]

Недоліком даного способу є низька якість готового продукту в результаті низької динамічної точності керування через не врахування шкідливого впливу контурів регулювання один на одного

Також відомий спосіб керування процесом охолодження технологічної води за допомогою Alpenta Control System (ACS) – система управління Alpenta. Вона забезпечує збір даних і подальший контроль в режимі реального часу для забезпечення максимальної ефективності роботи з економії енергії та терміну служби технологічних компонентів установки. Кожним блоком можна керувати зовнішнім сигналом вкл/викл на головному контролері, також він відправляє сигнал аварії на зовнішній контролер. [Чилери Alpenta (електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «aerostar.ua» : URL: <https://aerostar.ua/ru/catalogue/alpenta/chillery>].

Недоліком даного способу є низька якість готового продукту в результаті низької динамічної точності керування через не врахування шкідливого впливу контурів регулювання один на одного

Також відомий спосіб керування процесом охолодження технологічної води за допомогою контролера W3000TE. Контролер дозволяє регулювати температуру води в системах обогрівання, охолодження (тільки для реверсивних агрегатів) і гарячого водопостачання (тільки для реверсивних агрегатів). Температура регулюється автоматично в залежності від різних умов роботи системи. Можливе призначення різних рівнів пріоритету гарячого водопостачання в залежності від потреб. Регулювання здійснюється за іншим

алгоритмом QuickMind із застосуванням адаптивної логіки управління, що є перевагою для системи, що працює з невеликими об'ємами води. В якості альтернативи доступне регулювання за пропорційним і пропорційно-інтегральним законам. [Каталог обладнання aclima (електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «aclima.ua» : URL: <https://aclima.ua/ru/catalog/climaveneta/chillery/chillery-s-vodyanym-ohlazhdeniem-kondensatora/oborudovanie-1497>].

Недоліком даного способу є низька якість готового продукту в результаті низької динамічної точності керування через не врахування шкідливого впливу контурів регулювання один на одного.

Найбільш близьким до запропанованого, обраним за прототип є відомий спосіб автоматичного керування процесом охолодження технологічної води, який містить регулювання температури гліколю на вході в теплообмінник зміною витрати гліколю в конденсаторі, а також регулювання температури води на вході в теплообмінник – зміною холодопродуктивності холодильної установки

[КОНТРОЛЕР CAREL MCHILLER ENHANCED (електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії «eurocool.dp.ua» : URL: https://eurocool.dp.ua/ua/p1434690934uchbd00001130-kontroller-carel.Html?srsId=AfmBOor6WNj_LolzCII8KhX5kT1r6sWlMatHEOcxTdqTJJrXanBabkXk].

Недоліком даного способу є низька якість готового продукту в результаті низької динамічної точності керування через не врахування шкідливого впливу контурів регулювання один на одного.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення якості готового продукту шляхом підвищення динамічної точності керування.

Поставлену задачу вирішено в способі автоматичного керування процесом охолодження технологічної води ,який містить регулювання температури гліколю на вході в теплообмінник зміною витрати гліколю в конденсаторі, а також регулювання температури води на вході в теплообмінник

– зміною холодопродуктивності холодильної установки.

Згідно корисної моделі додатково керуючу дію контуру регулювання температури гліколю подають на вхід коригуючого зв'язку, який забезпечує незалежність контуру регулювання температури води від контуру регулювання температури гліколю, а сигнал з його виходу подають на вхід регулятора температури води.

Приклад реалізації запропонованого способу наведено на фігурі.

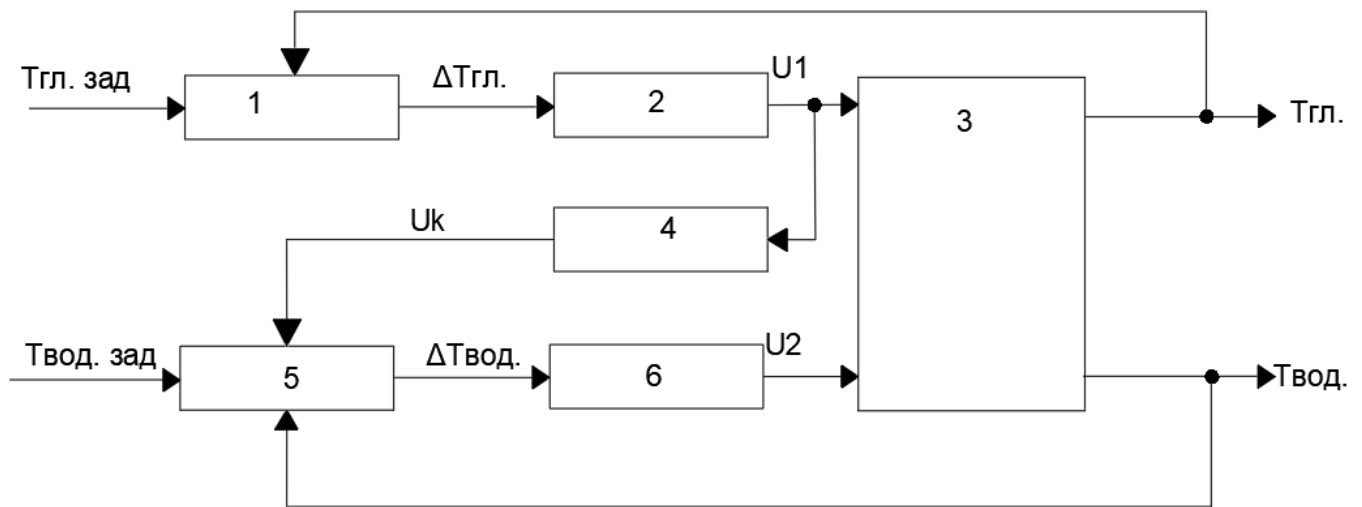
Спосіб здійснюється таким чином.

Поточне значення температури гліколю на вході в теплообмінник $T_{\text{гл}}$ подають на перший вхід суматора 1, на другий вхід якого надходить її задане значення $T_{\text{гл}}^{\text{зд}}$. Сигнал розузгодження $\Delta T_{\text{гл}}$ з виходу блоку 1 подають на вхід регулятора 2, на виході якого формується керуюча дія u_1 – зміна положення 3-х ходового клапана який змінює витрати гліколю в конденсаторі. Сигнал u_1 надходить на вхід об'єкта регулювання 3 – конденсатора, на виході якого формується сигнал $T_{\text{гл}}$

Поточне значення температури води на вході в теплообмінник $T_{\text{вод}}$ подають на перший вхід суматора 5, на другий вхід якого надходить її задане значення $T_{\text{вод}}^{\text{зд}}$. Сигнал роз узгодження $\Delta T_{\text{вод}}$ з виходу блоку 5 подають на вхід регулятора 6, на виході якого формується керуюча дія u_2 – частота обертання привідного електродвигуна насосу який змінює холодопродуктивність холодильної установки. Сигнал u_2 надходить на вхід об'єкта регулювання 3 – теплообмінника, на виході якого формується сигнал $T_{\text{вод}}$

Також сигнал u_1 подають на вхід коригуючого зв'язку 5, який забезпечує незалежність контуру регулювання температури води від контуру регулювання температури глікол. Сигнал u_k з виходу блоку 4 подають на третій вхід блоку 5.

Спосіб автоматичного керування процесом охолодження технологічної води



$T_{\text{гл}}^{\text{зд}}$ та $T_{\text{вод}}^{\text{зд}}$ – задані значення температури гліколю та води, °С;

$T_{\text{гл.}}$ та $T_{\text{вод.}}$ – поточні значення температури гліколю та води, °С

$\Delta T_{\text{гл.}}$ та $\Delta T_{\text{вод.}}$ – помилки регулювання, °С

U_k – керуюча дія коригуючого зв'язку, %х.р.о.;

u_1 та u_2 – керуючі дії, які регулюють положення 3-х ходового клапана глікою та частототу обертання двигуна компресора %х.р.о.;

Блок 2 та блок 6 -передаточні функції регуляторів

Блок 1 та блок 2 -суматори

Блок 4 -коригуючий зв'язок

Фігура

Формула корисної моделі

Спосіб автоматичного керування процесом охолодження технологічної води, який містить регулювання температури гліколю на вході в теплообмінник зміною витрати гліколю в конденсаторі, а також регулювання температури води на вході в теплообмінник – зміною холодопродуктивності холодильної установки, **який відрізняється тим що** додатково керуючу дію контуру регулювання температури гліколю подають на вхід коригуючого зв'язку, який забезпечує незалежність контуру регулювання температури води від контуру регулювання температури гліколю, а сигнал з його виходу подають на вхід регулятора температури води.

Реферат

Спосіб автоматичного керування процесом охолодження технологічної води

Корисна модель відноситься до способу автоматичного керування процесом охолодження технологічної води і може бути використана для охолодження пуансона пресу для таблетування в фармацевтичній промисловості, а також у системах вентиляції та кондиціонування в будь яких сферах промисловості та побуті.

Спосіб автоматичного керування процесом охолодження технологічної води містить регулювання температури гліколю на вході в теплообмінник зміною витрати гліколю в конденсаторі, а також регулювання температури води на вході в теплообмінник – зміною холодопродуктивності холодильної установки, додатково керуючу дію контуру регулювання температури гліколю подають на вхід коригуючого зв'язку, який забезпечує незалежність контуру регулювання температури води від контуру регулювання температури гліколю, а сигнал з його виходу подають на вхід регулятора температури води.

Порядковий номер заявки, визначений заявником		Дата одержання		
[22] Дата подання заявки	Пріоритет	[51] МПК	ЕВ	[21] Номер заявки
		C02F 1/22		
[86] Реєстраційний номер та дата подання міжнародної заявки, установлені відомством, що одержує [87] Номер і дата міжнародної публікації міжнародної заявки)				
ЗАЯВА про державну реєстрацію винаходу (корисної моделі) МІНЕКОНОМІКИ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ" (УКРНОІВІ) вул. Дмитра Годзенка, 1 (вул. Глазунова, 1), м. Київ-42, 01601				
Подаючи нижчезазначені документи, прошу (просимо) видати: патент України на винахід ☒ патент України на корисну модель				
[71] Заявник(и)			Код за ЄДРПОУ (для українських заявників)	
Кононов Богдан Сергійович				
(зазначається повне ім'я або найменування заявника(ів), його (їх) місце проживання або місцезнаходження та код держави згідно із стандартом BOIB ST.3. Дані про місце проживання авторів - заявників наводяться за кодом (72))				
Прошу (просимо) встановити пріоритет ☐ заявки ☐ пунктів формули винаходу за заявкою № за датою: подання попередньої (їх) заявки (ок) в державі-учасниці Паризької конвенції (навести дані за кодами (31),(32),(33) подання до НОІВ попередньої заявки, з якої виділено цю заявку (навести дані за кодом (62) подання до НОІВ попередньої заявки (навести дані за кодом (66))				
[31] Номер попередньої заявки	[32] Дата подання попередньої заявки	[33] Код держави подання попередньої заявки згідно із стандартом BOIB ST.3	[62] Номер та дата подання до НОІВ попередньої заявки, з якої виділено цю заявку	[66] Номер та дата подання до НОІВ попередньої заявки
[54] Назва винаходу (корисної моделі) Спосіб автоматичного керування процесом охолодження технологічної води				
Адреса для листування, прізвище або найменування адресата вул. Марсельська, буд. 26, кв. 62, Одеса – 65000, Україна, UA				
Телефон +38 095 394 1807		E-mail metalolol1234@gmail.com		Факс
[74] Повне ім'я та реєстраційний номер представника у справах інтелектуальної власності прізвище або повне ім'я іншої довіреної особи				

☐ Прошу (просимо) прискорити публікацію заявки

Перелік документів, що додаються	Кількість аркушів	Кількість примірників	Підстави щодо виникнення права на подання заявки і одержання патенту (без подання документів), якщо винахідник(и) не є Заявником(ами): ☐ є документ про передачу прав винахідником(ами) або роботодавцем(ями) правонаступнику(ам) ☐ є документ про право спадкування
☒ опис винаходу	4	3	
☒ формула винаходу	1	3	
☒ креслення та інші ілюстративні матеріали	1	3	
☒ реферат	1	3	
☒ документ про сплату збору за подання заявки	1	1	
☐ документ, який підтверджує наявність підстав для зменшення збору або звільнення від сплати збору			
☐ документ про депонування штаму			
☐ копія попередньої заявки, яка підтверджує право на пріоритет			
☐ переклад заявки українською мовою			
☐ документ, який підтверджує повноваження довіреної особи (довіреність)			
Інші документи:			
☐ міжнародний звіт про пошук			
[72] Винахідник(и) Винахідник(и)-заявник(и) (повне ім'я)	Місце проживання та код держави згідно із стандартом BOIB ST.3 (для іноземних осіб - тільки код держави)		Підпис(и) винахідника(ів)- заявника(ів)
Кононов Богдан Сергійович	вул. Марсельська, буд. 26, кв. 62, Одеса – 65000, Україна, UA		
Я (ми) прошу (просимо) не згадувати мене (нас) як винахідника(ів) при публікації відомостей стосовно заявки на видачу патенту Підпис(и) винахідника(ів)			
Підпис(и) заявників(ів)			
Дата підпису М.П.	Якщо заявником є юридична особа, то підпис особи, яка має на це повноваження, із зазначенням посади скріплюється печаткою. Якщо всі автори виступають заявниками, то їх підписи наводяться за кодом (72)		