

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

**на тему: «ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВОГО
БУДИНКУ»**

Здобувач: Шунін А.О.
2 курс, група Ам-21

Керівник: доцент _____.

Консультанти:
доцент Гурський О.О.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту.

Рішення кафедри від _____ .2026 р., протокол № _____.

Завідувач кафедри АТЕіРС _____ О.М. Жигайло
(підпис)

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> <u>Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>Магістр</u>
Спеціальність	<u>174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка</u>
Освітньо-наукова програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в автоматизації та робототехніці</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри АТПіРС

_____ І.М. Світий

«05» січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач Шунін Артем Олександрович

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом гарячого водопостачання житлового будинку»

2. Керівник кваліфікаційної роботи Світий Іван Миколайович, к.т.н., доцент

Пункти 1 і 2 затверджені наказом ОНТУ № 39-03 від 24.01.25 р. р.

3. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи на кафедру «12» червня 2026 р.

4. 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.

5. Зміст кваліфікаційної роботи (розділи, які потрібно розробити):

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

Розділ 1. Технологічний процес гарячого водопостачання житлового будинку, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування (опис ТП і ТА, що його реалізує, як ОК; режими і регламенти ведення ТП і роботи ТА, наслідки їх порушень; існуючі САР і їх недоліки; висновки за розділом – обґрунтування напрямків удосконалення САР).

Розділ 2. Удосконалення САР на основі цілеспрямованого удосконалення її структури (застосування принципів інваріантності, автономності, каскадності, прогнозування, актуальні для конкретної САР, моделювання САР і підтвердження ефективності їх застосування, 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; моделювання САР з НР і підтвердження ефективності її застосування, 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).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання «09» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Строк виконання етапів роботи	Примітка
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 _____ Шунін А.О.
ПІБ Підпис, дата

Керівник роботи _____ Світій І.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 _____ Шунін А.О.
Прізвище, ініціали Підпис

АНОТАЦІЯ

Шунін А.О. «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом гарячого водопостачання житлового будинку». Кваліфікаційна робота магістра. – Одеса: ОНТУ 2026. - 123 с. Іл.: 96. Табл.: 8.

Робота присвячена підвищенню ефективності управління процесом підігріву води на водопостачанняч. Задачу вирішено шляхом побудови системи автоматичного регулювання автономної структури. Було проведено підвищення динамічної точності за рахунок побудови САР автономної структури, а також побудови САР з використанням регулятора змінної структури. Проведено програмну реалізацію розроблених алгоритмів регулювання.

Результатом впровадження роботи має стати підвищення ефективності керування процесом підігріву води за рахунок встановлення регулятора змінної структури який при динамічній змінах температури або рівня води стабілізує систему.

Ключові слова: підігрів, рівень, нагрівач, ефективність керування, система автоматичного регулювання, автономна САР, регулятор змінної структури, РЗС.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1. Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.....	11
1.1 Опис технологічного процесу підігріву води.....	11
1.2 Аналіз впливу режимів ведення ТП та роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз регламентів ведення ТП та наслідки їх порушення...	12
1.3 Аналіз існуючих систем автоматичного керування технологічного процесу підігріву води.....	14
1.4 Комплекс математичних моделей ТП підігріву води як об'єкта регулювання, розроблених раніше, їх реалізація в імітаційній формі та результати тестування....	16
1.5 Типові структура і алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, розроблені раніше. Результати їх параметричної оптимізації та перевірки на грубість.....	19
1.6 Висновки за розділом.....	25
Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП підігріву води в нагрівачі.....	26
2.1. Специфічні особливості об'єкту регулювання і обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення динамічної точності.....	26
2.2. Структурний та оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності.....	26
2.3 Аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіацій параметрів ОК.....	29
2.4 Порівняння САР базової структури та підвищеної динамічної точності.....	30
2.5 Висновки за розділом.....	33

Розділ 3. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж.....	34
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління побудованих на базі апарата нечіткої логіки для розглянутого об'єкта керування.....	34
3.2. Реалізація в програмному середовищі MATLAB / Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійними статичними характеристиками.....	35
3.3 Синтез САР з нелінійною моделлю ОК і з традиційним ПІД-регулятором.....	37
3.4 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нечіткого регулятора.....	40
3.5. Синтез САР з нелінійним об'єктом на основі нейронного регулятора.....	48
3.6. Аналіз результатів функціонування САУ з традиційним регулятором, з регулятором побудованим на базі апарату нечіткої логіки і з нейронним регулятором.....	54
3.7. Висновки за розділом.....	57
Розділ 4. Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи на підприємстві.....	58
4.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом підігріву води і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок...	58
4.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.....	61
4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	62
4.4 Висновки за розділом.....	62
4.5. Розробка імітаційної моделі САР температури та рівня води у резервуарі з регулятором змінної структури та дослідження її роботи.....	64
4.6 Висновки за розділом.....	77
Розділ 5. Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи на підприємстві «ТОВ Теплоенергоналадка».....	78

5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми керування процесом підігріву води і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.....	78
5.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.....	83
5.3. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	96
5.4 Висновки за розділом.....	97
Список літератури.....	98
Додаток А.....	101
Додаток Б.....	104
Додаток В.....	105
Додаток Г.....	113
Додаток Д.....	120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МПК – мікропроцесорний контролер

КЗ – коригуючий зв’язок

АРМ – автоматизоване робоче місце

ЗА – засоби автоматизації

ММ – математична модель

ОР – об’єкт регулювання

ОК – об’єкт керування

ВП – випадковий процес

САК – система автоматичного керування

ТП – технологічний процес;

ОК – об’єкт керування;

РЗС – регулятор змінної структури

ВСТУП

У сучасному індустріальному середовищі процеси автоматизації виробництва стають все більш важливими для забезпечення ефективності та надійності виробничих процесів. Однією з ключових складових цього процесу є автоматизація систем підігріву води у котельних установках. Забезпечення потрібних температурних режимів води відіграє важливу роль у забезпеченні оптимального функціонування великих технологічних систем.

Кваліфікаційна робота присвячена удосконаленню системи автоматичного регулювання для процесу підігріву води.

Мета і задачі дослідження. Розробка САК технологічного процесу підігріву води, що забезпечує зниження питомих енерговитрат при реалізації процесу, за рахунок застосування передових, здебільшого –інтелектуальних алгоритмів керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- провести аналіз існуючих систем керування процесами підігріву води;
- розробити САК підвищеної динамічної точності з реалізацією функції гарантуючого керування процесами;
- розробити САК з використанням нейронного регулятора та САК з регулятором змінної структури;
- провести порівняльний аналіз ефективності розроблених САК шляхом їх імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження: Системи керування процесами підігріву води.

Предмет дослідження: Моделі та алгоритми системи автоматичного керування процесом підігріву води.

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

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше обґрунтовано:

- розроблено модель автоматичної системи з функціями гарантуючого керування, яка забезпечує ефективний режим функціонування відповідної установки з підігріву води для водопостачання;
- загальну концепцію побудови системи гарантуючого керування підігріву води в нагрівачі;
- загальну концепцію побудови САК на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж;
- загальну концепцію побудови САК підвищеної динамічної точності для процесу підігріву води в нагрівачі;
- доцільність аналізу процесу підігріву води в нагрівачі як об'єкту керування;
- умови безпечної експлуатації системи;
- вибір технічних засобів, які забезпечують належне керування процесом підігріву води в нагрівачі;
- вибір промислового контролеру та його блоків вводу\виводу для керування процесом підігріву води в нагрівачі.

Вперше розроблено:

- структуру та імітаційну модель системи гарантуючого керування підігріву води;
- алгоритми керування САК процесом підігріву води в нагрівачі на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж;
 - комплекс моделей процесу підігріву води в нагрівачі як об'єкту регулювання;
 - варіанти алгоритмів регулювання базової структури та підвищеної динамічної точності для САК процесом підігріву води в нагрівачі;
 - регламент функціонування та алгоритм пуску САК процесом стерилізації томатної пасти в стерилізаторах безперервної дії;

- технічну структуру мікропроцесорного ядра системи керування процесом підігріву води в нагрівачі;
- програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання в середовищі CoDeSys для САК процесом підігріву води в нагрівачі;
- системи керування за допомогою середовища WinCCFlexible, програмне забезпечення АРМ оператора и наладчика САК процесом підігріву води в нагрівачі;
- комплект технічної документації САК.

Практичне значення отриманих результатів. Матеріали досліджень відповідної магістерської роботи можуть бути використані в наступних дипломних проектах і магістерських роботах за відповідною темою пов'язаною з підігрівом води, або, у більш широкій інтерпретації водопостачання.

Результати дослідження також можуть бути впроваджені на підприємствах для підвищення ефективності процесу підігріву води. Вдосконалені алгоритми керування, розроблені на основі штучних нейронних мереж та системи гарантуючого керування на нижніх допустимих межах, забезпечують мінімізацію енерговитрат і стабільність процесу. Це створює умови для зниження виробничих витрат, а також сприятиме покращенню якості та безпеці продукції, що буде доповнено оптимізацією використання ресурсів. Глобальний «вимір» також може полягати в підвищенні рівня, якості продукції, що випускається, зниженню економічних, енергетичних витрат, що створить умови для стабілізації цін і сприятиме зниженню витрат на нагрівання води.

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

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ, ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Опис технологічного процесу підігріву води та основного супутнього обладнання

Монтаж та обслуговування систем опалення і гарячого водопостачання є критично важливими аспектами інфраструктури будь-якого житлового або комерційного приміщення. Регулярне обслуговування та ремонт системи є важливою складовою підтримки її ефективності. Це включає роботи компонентів та вчасну заміну витратних матеріалів. Важливо обирати обладнання з високою ефективністю та розробляти системи з урахуванням принципів енергозбереження, таких як використання теплової ізоляції та управління температурними режимами. Щодо гарячої води, її наявність є критично важливою для забезпечення комфорту та гігієни. Отже, наявність надійних та ефективних систем гарячого водопостачання є важливою для забезпечення комфортного та безпечного життя.

Для виробництва гарячої води застосовують електронагрівач. Вхідною сировиною служать вода та енергетичні ресурси. Отримана у електропідігрівачу вода далі по технічному процесу тече у резервуар та при спаду температури за допомогою насосів вода циркулює до нагрівача для повторного підігрівання, у результаті чого вода підтримується завжди гарячою. При охолодженні теплоносія вона включає стільки ТЕНів, скільки необхідно, щоб підняти температуру до заданої. Усі операції зі встановлення режиму експлуатації задаються на панелі управління.

Нагрівач має теплову потужність 9 кВт та живиться від 220V від мережі та оснащена двоступінчастою системою захисту, яка оберігає пристрій від перегріву, капілярним термостатом, що плавно регулює температуру теплоносія системи в діапазоні 30 –

90°C, аналоговим термометром, світловими індикаторами для візуального контролю роботи, а також висновком для підключення циркуляційного насоса.

Основними елементами є: Нагрівач, резервуар з водою, регулюючий клапан.

Принцип роботи такого нагрівального агрегата простий і надійний. Конструкція складається з ємності, в яку вмонтовано кілька трубчастих електронагрівників (ТЕНів). Вода, потрапляючи в ємність, нагрівається безпосередньо від цих елементів. Кількість необхідних ТЕНів залежить від потужності самого котла.

Складання схеми та опис суті технологічного процесу, реалізованого технологічним агрегатом, як цілеспрямованого перетворення матеріальних і енергетичних потоків.

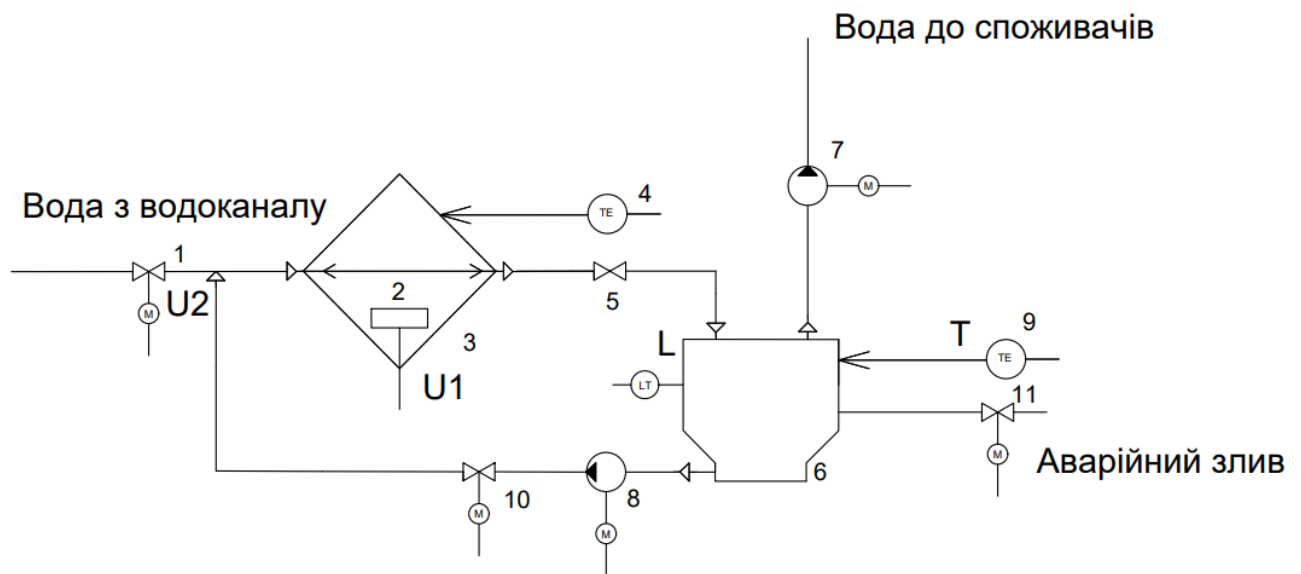


Рис. 1.1 – Технологічна схема процесу підігріву води. 1 - Клапан з водою з водоканалу; 2 - нагріваючий елемент електронагрівача; 3 - електронагрівач; 4 - датчики температури у нагрівачі; 5 - клапан в резервуар; 6 - резервуар з водою; 7 - насос води на підігрів; 8 - насос для циркуляції води; 9 - датчик температури у резервуарі; 10 - клапан з засувкою; 11 - клапан аварійного злива води;

1.2 Аналіз впливу режимів ведення ТП та роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз регламентів ведення ТП та наслідки їх порушення

Конкретизація мети і завдань керування об'єктом, виявлення регульованих координат.

Загальною метою функціонування підприємства в цілому є виконання планових завдань або договірних зобов'язань по номенклатурі і обсягу продукції та отримання при цьому певного економічного ефекту.

Декомпозиція цієї загальної цілі для більш низьких рівнів виробничої ієрархії призводить до наступних цілей:

- а) на рівні окремого технологічного процесу - координація роботи технологічного обладнання, на якому реалізується процес;
- б) на рівні окремих одиниць технологічного обладнання - виконання технологічних, експлуатаційних і техніко-економічних регламентів, зокрема - оптимізація роботи окремих одиниць устаткування.

Звідси завдання управління можна поділити на:

- а) завдання регулювання, коли необхідно забезпечити виконання вимог регламенту. Отже, змінні, відповідні технологічним та експлуатаційним параметрам, будуть регульованими змінними об'єкта управління;
- б) завдання умовної оптимізації, коли при дотриманні вимог регламенту додатково відповідно до наперед сформульованим критерієм, вирішуються завдання оптимізації процесу.

Для процесу виробництва в якості регульованих та оптимізованих координат доцільно вибрати температуру води в нагрівачу з каналу U1-T та рівень води у всій системі U2-L.

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

№ п/п	Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Номінальнізначення	Допустимі відхилення відноміналу		
					Довготри валі	Короткочасні	
					Величина	Величи на	Час
1	Температура у нагрівачу	T	°C	60	±0.5	±3	100 с
2	Рівень води у всій системі	L	см	130	±2	±10	100 с

Виявлення нормативів ведення технологічного процесу і роботи технологічного агрегату. Основу нормативів складають три основних регламенти.

1.3 Аналіз існуючих систем автоматичного керування технологічного процесу підігріву води

Мета ведення автоматичного процесу підігріву води – підтримувати температуру води для її використання. При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдано тільки тоді, коли технологічний процес має сенс реалізувати, коли виконується цілий ряд вимог до технологічного процесу.

Таких як:

- є достатній рівень води в системі;
- питомі, тобто на одиницю продукції, витрати енергії на процес не повинні перевищувати нормативних значень;
- режими роботи технологічного обладнання не повинні виходити за гранично-припустимі;

– шкідливий вплив технологічного процесу на людину й природу не повинне перевищувати нормативних значень.

Технологічний регламент - визначає умови, при яких в результаті технологічного процесу виходить продукт із заданими властивостями. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналу технологічних параметрів. Для технологічного процесу виробництва пари такими параметрами є: T – температура теплої води в резервуарі.

Експлуатаційна регламент - визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів цього технологічного обладнання. Для технологічного процесу виробництва пари такими параметрами є: L – рівень води резервуарі; P_n – тиск в нагрівачі.

Техніко-економічний та екологічний - регламент визначає умови ефективності ведення процесу та його екологічності. Він являє собою набір номінальних або гранично-допустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів. До цієї групи параметрів можна віднести: $ККД$ – $ККД$ котла; $I_{пв}$ – питомі витрати на підігрівання літру води.

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: F_v – вода з каналу; T_v – температура води з каналу

Енергетичні параметри характеризують енергію, яка підводиться до технологічного устаткування ззовні і витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів віднесемо: F_e – витрати електроенергії;

Механічні параметри технологічного обладнання характеризують стан його робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо: $U1$ – положення клапану; $U2$ – потужність нагрівачу.

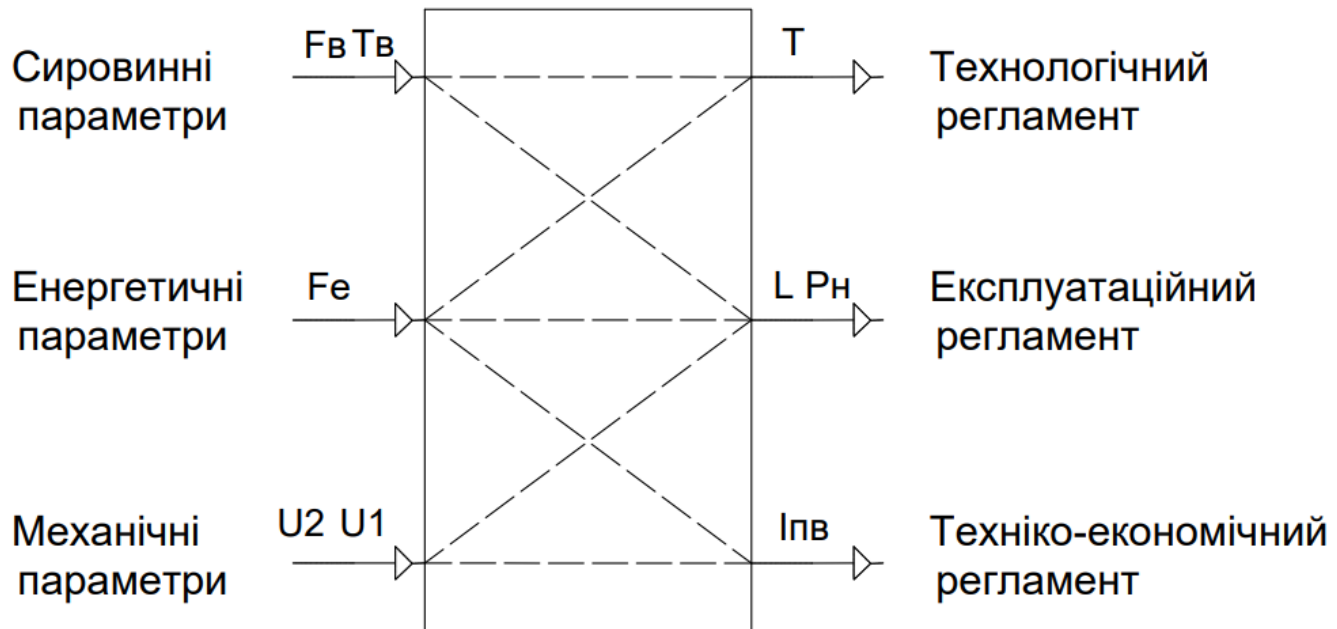


Рис. 1.2 – Параметрична схема процесу підігріву води.

1.4. Комплекс математичних моделей ТП підігріву води як об'єкта регулювання, розроблених раніше, їх реалізація в імітаційній формі та результати тестування

Проводимо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на рис. 1.3.

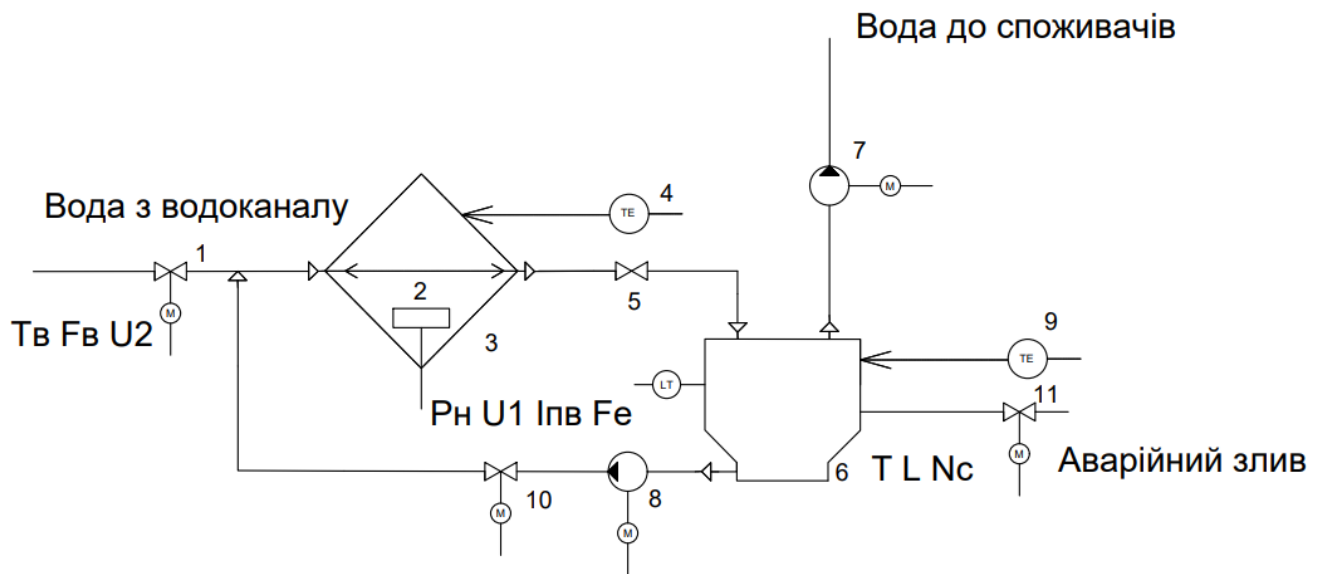


Рис. 1.3 – Параметризована технологічна схема об'єкту

T – Температура теплої води в резервуарі

L – Рівень води у резервуарі

U1 – Регулювання напруги на нагрівачі

U2 – Регулювання % відкриття клапану

Тв – Температура води в нагрівачі

Fв – Витрати води

Pн – Тиск в нагрівачі

Fe – Витрати електроенергії

Іпв – Питомі витрати електроенергії

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.

Розробка концептуальної моделі об'єкта регулювання. Структурна схема ОК є черговим і останнім етапом формалізації подання технологічного процесу як ОК. Розробка схеми проводиться на основі результатів досліджень. Структурна схема ОК, по суті, є найбільш загальною моделлю технологічного процесу як ОК. Структурна схема процесу підігріву води наведена на рис. 1.4.

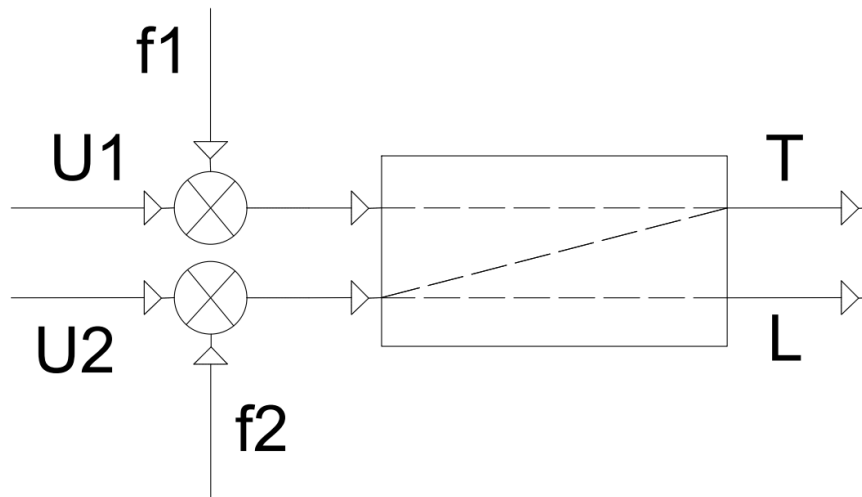


Рис. 1.4 – Структурна схема процесу підігріву води в нагрівачі.

Конкретизовані завдання керування об'єктом: U_1 – потужність нагрівача; U_2 – швидкість праці насосів; L_p – рівень води в резервуарах; $T_{то}$ – Температура теплообмінника; f_1 - вектор неконтрольованих збурень; f_2 - вектор неконтрольованих збурень.

Для отримання параметрів лінійних моделей динаміки каналів ОК було проведено серію активних експериментів, суть яких полягала в подачі ступінчатого сигналу керуючої дії на окремі входи та отриманні експериментальних перехідних характеристик. Для того, щоб отримати необхідні коефіцієнти рівнянь параметри моделей динаміки каналів ОК, проведено параметричну ідентифікацію за експериментальними перехідними характеристиками. Як результат, маємо доступні для подальших експериментів математичні моделі лінійної динамічної складової ОК. Математичні моделі лінійної динамічної складової ОК зведено в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати параметричної ідентифікації

Канал ОК	Модель 1-го порядку	Модель 2-го порядку
«U1 – T»	$W_o(p) = \frac{0,3 \cdot e^{-36,5}}{36,3p + 1}$	$W_o(p) = \frac{0,3 \cdot e^{-22,3p}}{(24p + 1)^2}$
«U2 – T»	$W_o(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-19,8p}}{13,1p + 1}$	$W_o(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-11,9p}}{(9,8p + 1)^2}$
«U2 – L»	$W_o(p) = \frac{e^{-24p}}{45p}$	$W_o(p) = \frac{e^{-9,8p}}{45p \cdot (13p + 1)}$

Відтворення отриманих моделей у середовищі імітаційного моделювання здійснювалося в середовищі моделювання MATLAB на рис. 1.5.

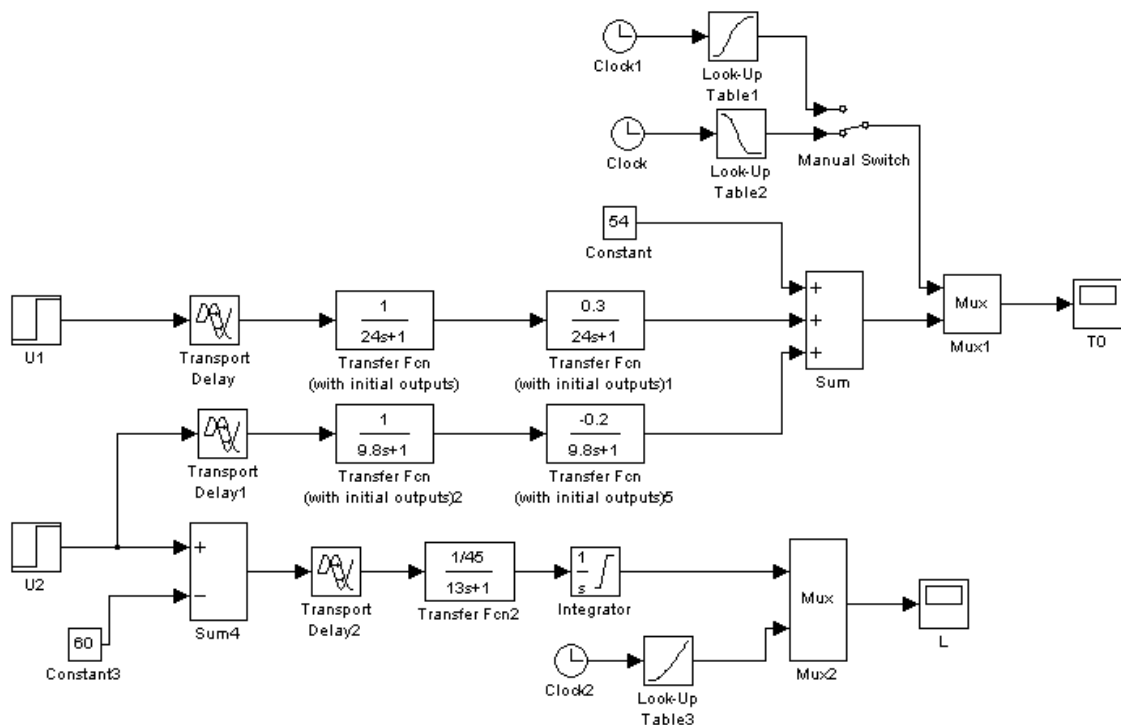


Рис. 1.5 – Схема моделювання повної моделі ОК

1.5 Типові структура і алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, розроблені раніше. Результати їх параметричної оптимізації та перевірки на грубість

Розробка на основі обраного загального принципу побудови САР, її базової конкретної структури. Координатна схема процесу підігріву води в нагрівачі наведена була раніше

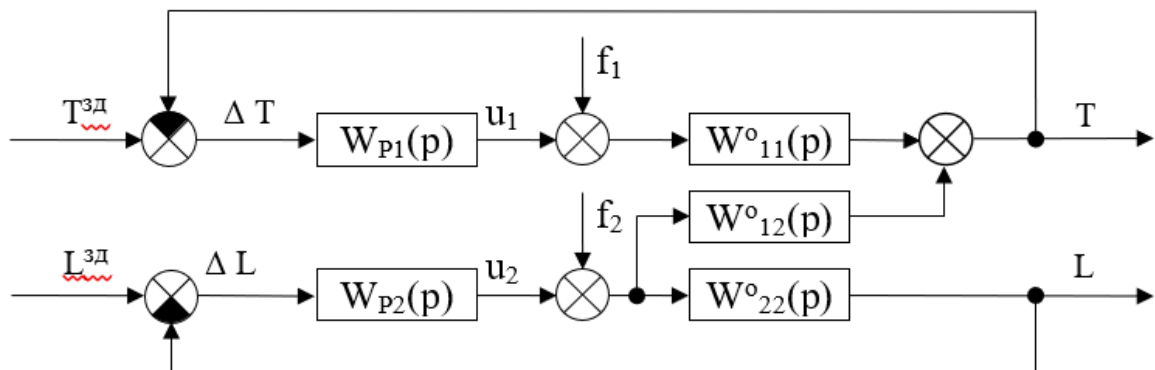


Рис 1.6 - Структурна схема САР базової (найпростішої) структури

На рисунку:

U_1 – потужність нагрівача;

U_2 – положення регулюючого органу;

T – температура підігріву води;

L – рівень води в системі;

f_1 – вектор неконтрольованих збурень 1;

f_2 – вектор неконтрольованих збурень 2;

$W_P(p)$ – передаточна функція регулятора;

$T^{3Д}$ - задане значення температура

$L^{3Д}$ – задане значення рівня;

ΔT – помилка регулювання температури

ΔL - помилка регулювання рівня

Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання, запис їх рівнянь і передаточних функцій. В якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритми регулювання. Але нижче будуть приведені налаштування та розрахунки ПІД регулятора як кращого варіанта.

Передаточна функція ПІД-регулятора

$$W_P(p) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{I3}p} + T_{уп}p \right)$$

Параметричний синтез САР з різними варіантами типових алгоритмів регулювання і їх порівняльний аналіз для детермінованих вхідних дій

$$W_P(p) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{I3}p} + T_{уп}p \right)$$

Параметричний синтез САР з різними варіантами типових алгоритмів регулювання і їх порівняльний аналіз для детермінованих вхідних дій

Розрахунок початкових наближень налаштувань регуляторів.

$$W_{U1-T}^O(p) = \frac{0.3 \cdot e^{-36,5p}}{36,3p + 1};$$

Розрахунок налаштувань ПІД-регулятора статичного ОР:

Регулятор $W_{P1}(p)$

$$K_{P1} = \frac{1,0 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1,0 \cdot 36,3}{0,3 \cdot 36,5} = 3,32 \% \text{х.р.о.} / ^\circ\text{C}$$

$$T_{I31} = 2,0 \cdot \tau_O = 2,0 \cdot 36,5 = 73 \text{ с}$$

$$T_{уп1} = 1,0 \cdot \tau_O = 1,0 \cdot 36,5 = 36,5 \text{ с}$$

$$W_{U2-L}^O(p) = \frac{e^{-24p}}{45p}$$

Розрахунок налаштувань ПІД-регулятора астатичного ОР:

Регулятор $W_{P2}(p)$

$$K_{P2} = \frac{1,1 \cdot T_O}{\tau_O} = \frac{1,1 \cdot 45}{24} = 2,06 \% \text{х.р.о.} / \text{см}$$

$$T_{I32} = 2,0 \cdot \tau_O = 2,0 \cdot 24 = 48 \text{ с}$$

$$T_{уп2} = 1,0 \cdot \tau_O = 1,0 \cdot 24 = 24 \text{ с}$$

Для оптимального параметричного синтезу САР з ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рис. 1.7. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рис. 1.8.

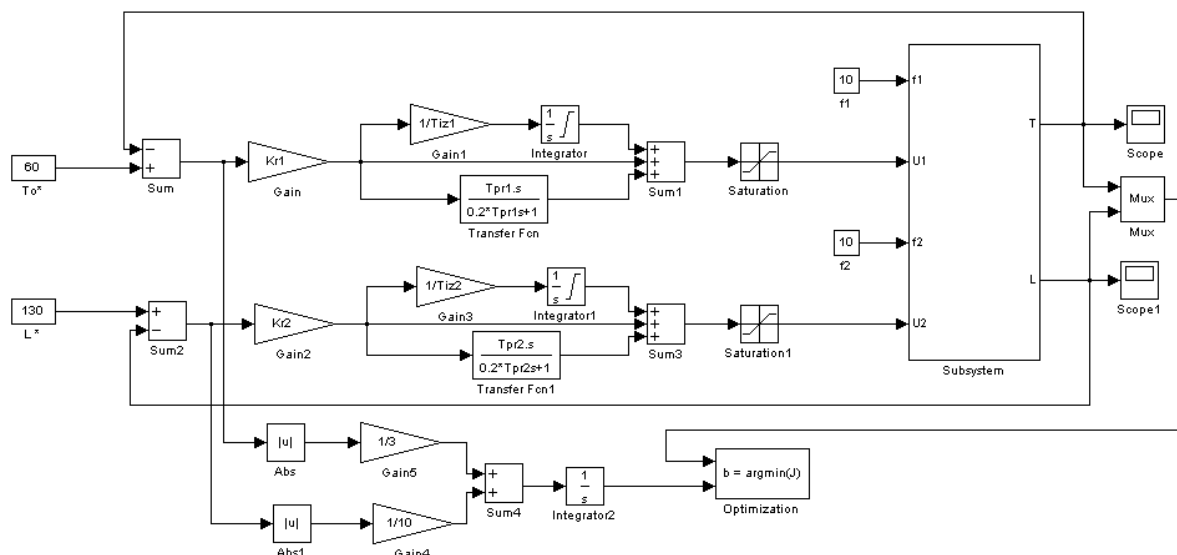
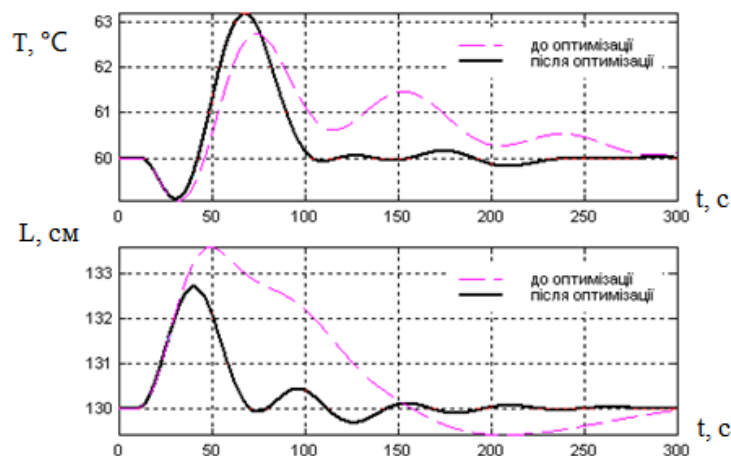


Рис. 1.7 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kr1	4.7394	0	3.32	30	до - 114.941
Tiz1	41.2864	1	73	500	після - 54.8368
Tpr1	17.0957	0	36.5	200	оптимізації.
Kr2	4.6574	0	2.06	20	Кількість кроків процедури оптимізації:
Tiz2	39.7693	1	48	300	максимальна - 1000
Tpr2	11.4548	0	24	200	фактична - 538

Рис. 1.8 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

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

Таблиця 1.3 - Результати порівняння САР з ПІД-регуляторами до і після оптимізації

САР з ПІД-регулятором	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{c}$	$\Delta L^{\text{МАКС}}, \text{cm}$	$T_{\text{пп2}}, \text{c}$	
до оптимізації	2,75	246,5	3,58	104,62	114,941
після оптимізації	3,2	94,65	2,7	50,56	54,8368

Далі проведемо перевірку на грубість САР з ПІД-регулятором

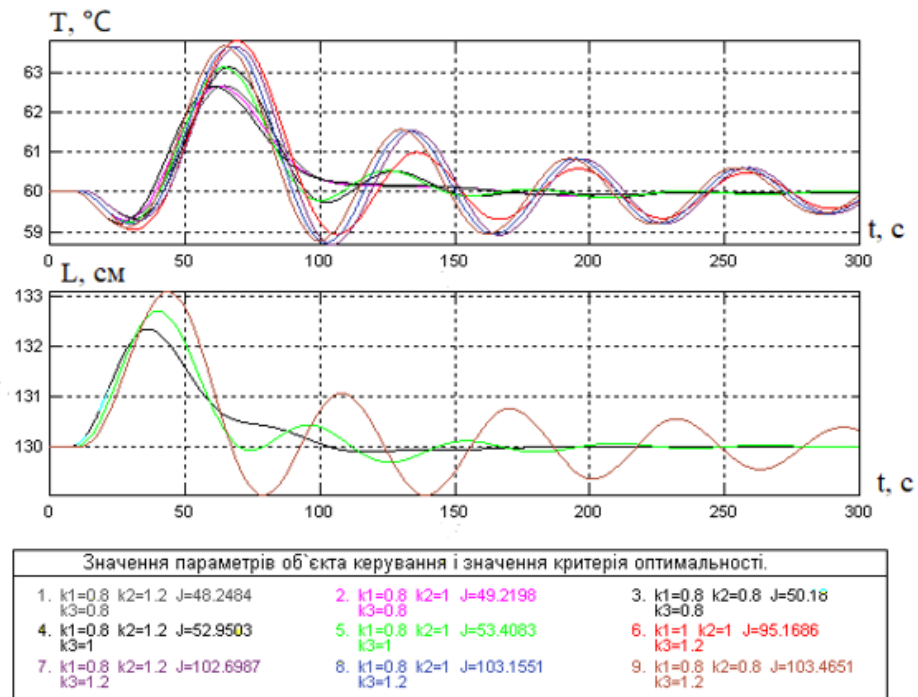


Рис. 1.9 – Результати перевірки на грубість САР з ПІД-регуляторами

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.

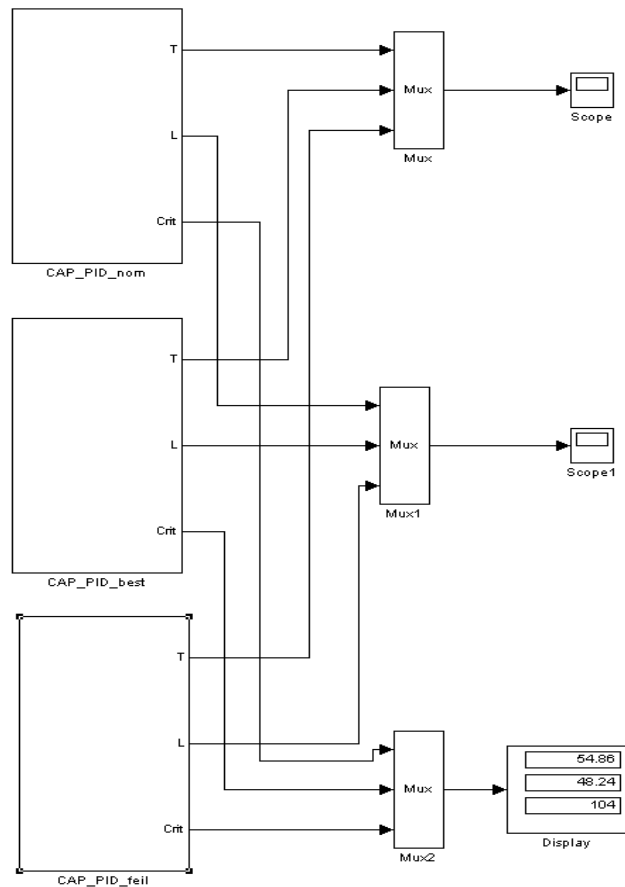


Рис. 1.10 – Схема моделювання CAP базової структури з ПД-регулятором для порівняння варіантів з номінальними, "найсприятливішими" та "найнесприятливішими" для керування параметрами ОК

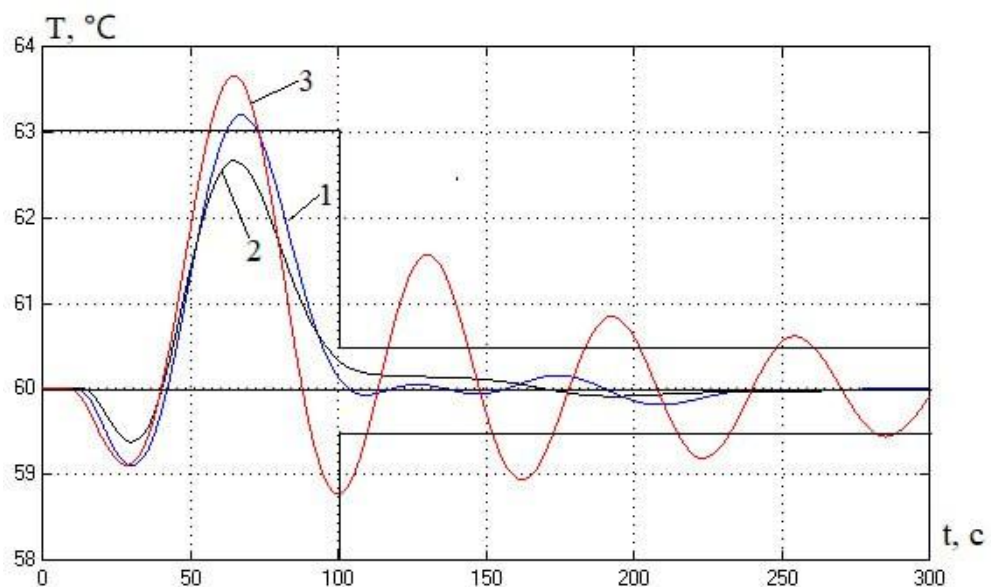


Рис. 1.11 Порівняльний аналіз CAP з ПД-регуляторами (Т). 1 – номінальні значення. 2 – найсприятливіші значення. 3 – найнесприятливіші значення

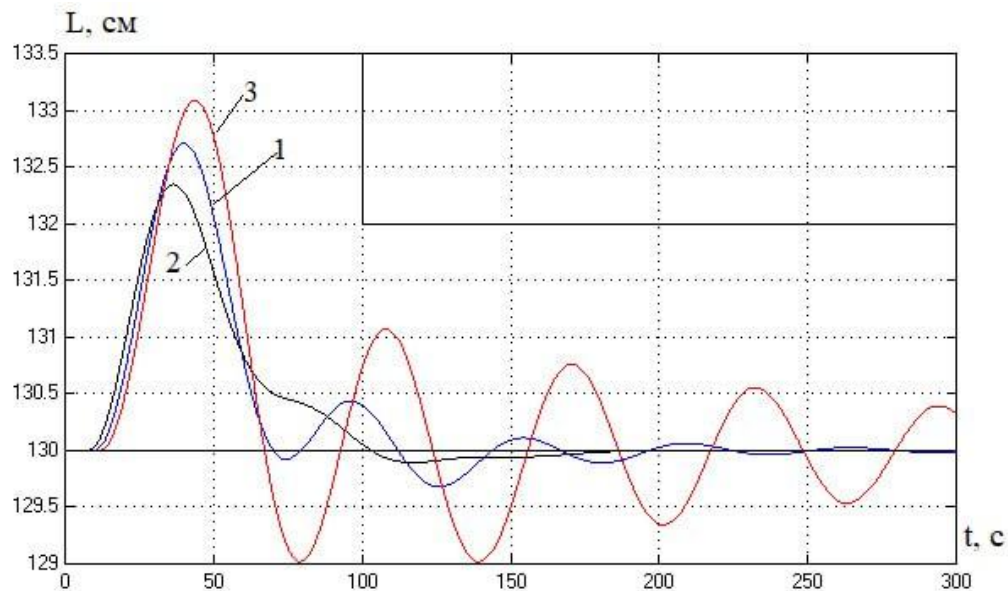


Рис. 1.12 Порівняльний аналіз САР з ПД-регуляторами (L). 1 – номінальні значення. 2 – найсприятливіші значення. 3 – найнесприятливіші значення

1.6 Висновки за розділом

САР з ПІ-регулятором не відповідає гранично припустимим вимогам по T за максимальним динамічним відхиленням та часом перехідного процесу, а по L не відповідає за часом. САР з ПД-регулятором по L гранично припустимим вимогам відповідає. Тому в подальших дослідженнях в якості базового алгоритму регулювання будемо застосовувати ПД-регулятор. Можна 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 якісно.

РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП ПІДГРІВУ ВОДИ

2.1. Специфічні особливості об'єкту регулювання і обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення динамічної точності

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 t_0 / T_0 , взаємний вплив каналів в багатовимірної САР).

2.2. Структурний та оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності

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

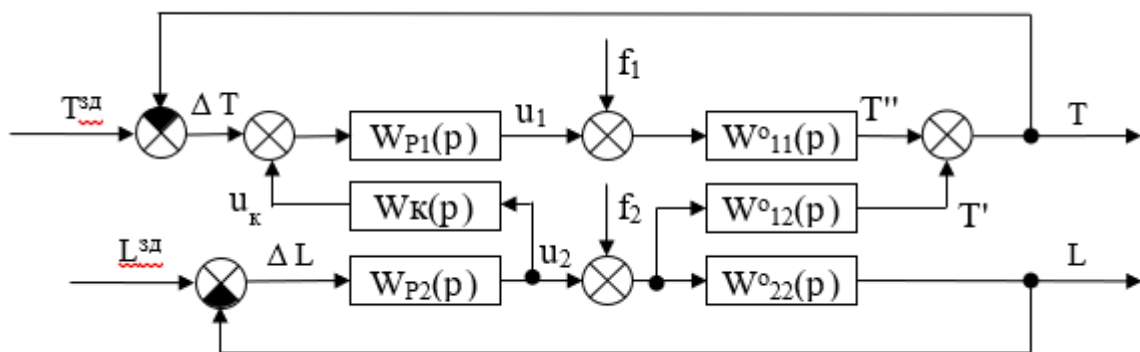


Рис. 2.1 - Структурна схема раціональної САР підвищеної динамічної точності
Передаточна функція ПІД-регулятора

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

$$W_K(p) = 0,14 \cdot \left(1 + \frac{16,7p}{1,7p + 1}\right) \cdot \frac{41,27p \cdot (36,3p + 1)}{(13,1p + 1) \cdot (705,72p^2 + 41,27p + 1)} =$$

$$= 0,14 \cdot \left(1 + \frac{16,7p}{1,7p + 1}\right) \cdot \frac{41,27p}{13,1p + 1} \cdot \frac{36,3p + 1}{705,72p^2 + 41,27p + 1}$$

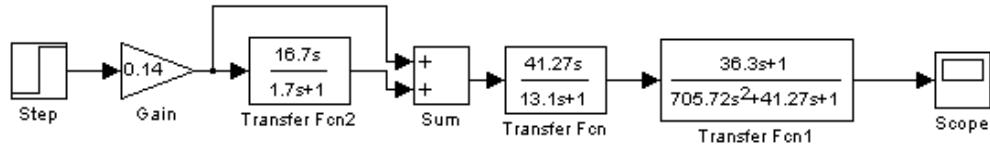


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку

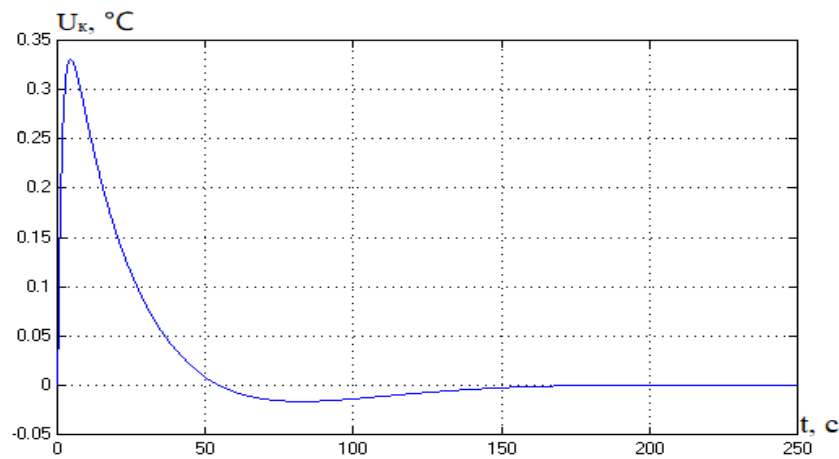


Рис. 2.3 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку Спрощення коригувальних зв'язків з урахуванням особливостей їх технічної реалізації та параметричний синтез САР при детермінованих вхідних впливах

Отримаємо параметри спрощеного коригуючого зв'язку та Спростуємо передаточну функцію коригуючого зв'язку. Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання.

$$K_k = 0,14; T_{K1} = 16,7; T_{K2} = 41,27.$$

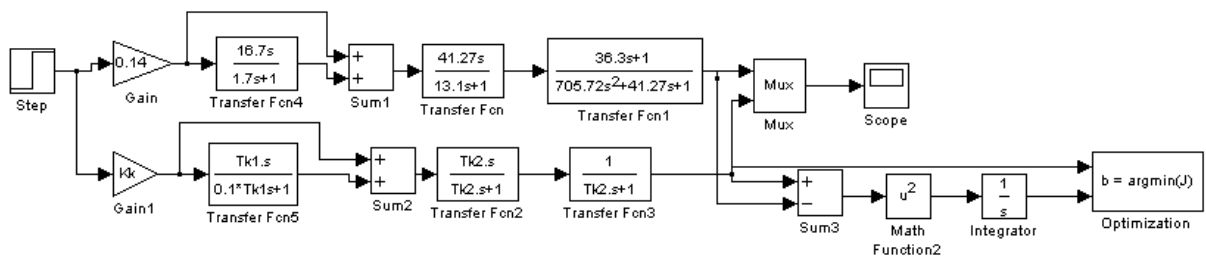
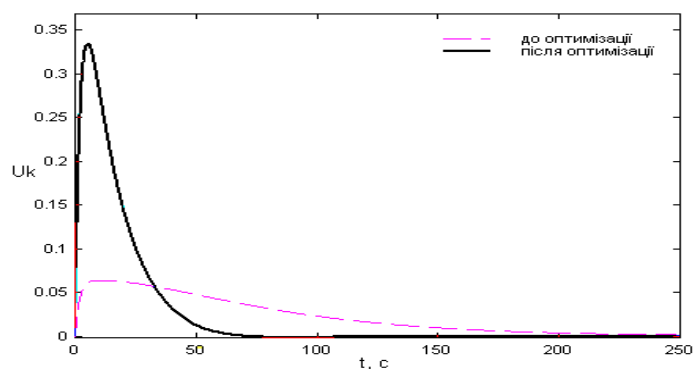


Рис. 2.4 – Схема моделювання СКЛ відносно НФРКЛ



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kk	0.33788	0	0.14	2	до - 0.94007
Tk1	25.0574	0	16.7	200	після - 0.01656
Tk2	19.5368	1	41.27	200	оптимізації.
					Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 1000
					фактична - 255

Рис. 2.5 – Результати оптимізації параметрів коригуючого зв'язку

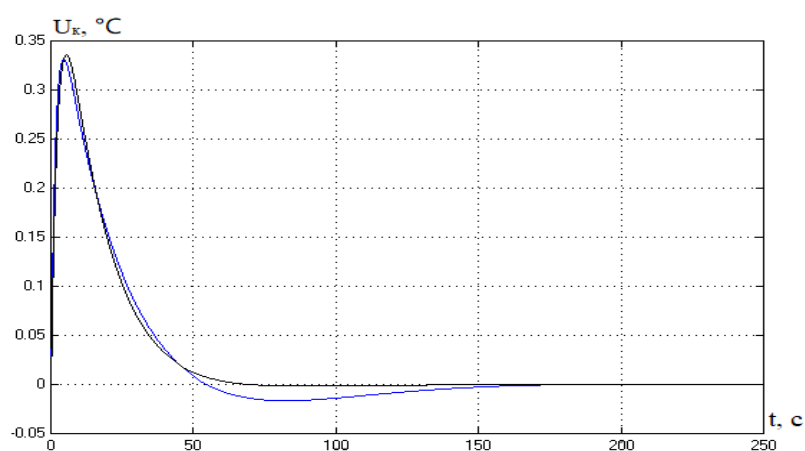


Рис. 2.6 – Перехідні характеристики розрахункового та спрощеного коригуючого зв'язку

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.

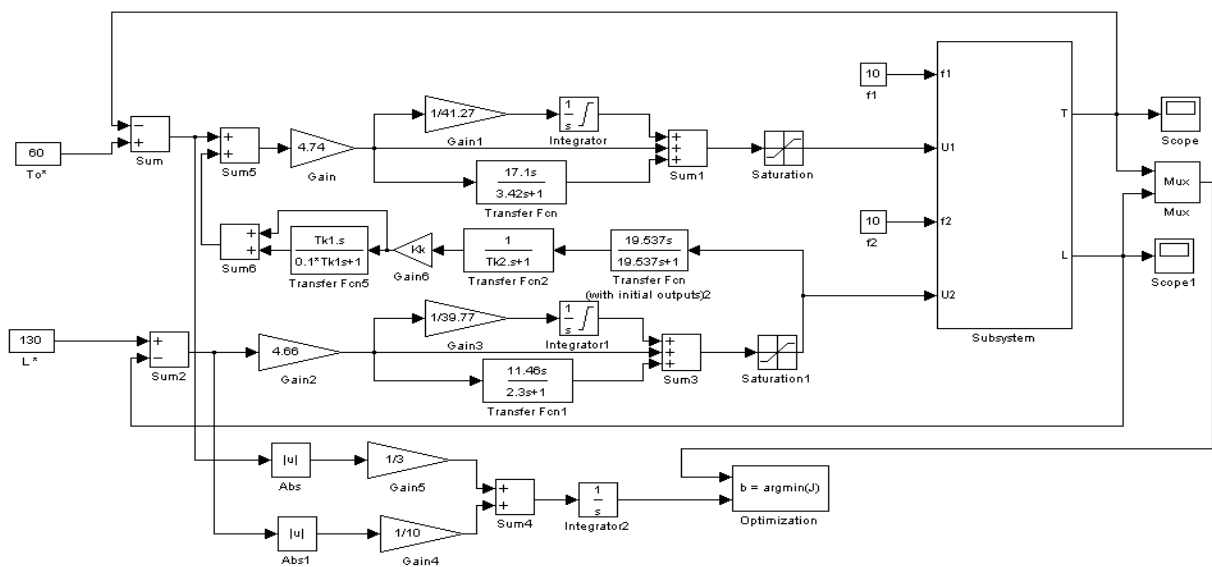
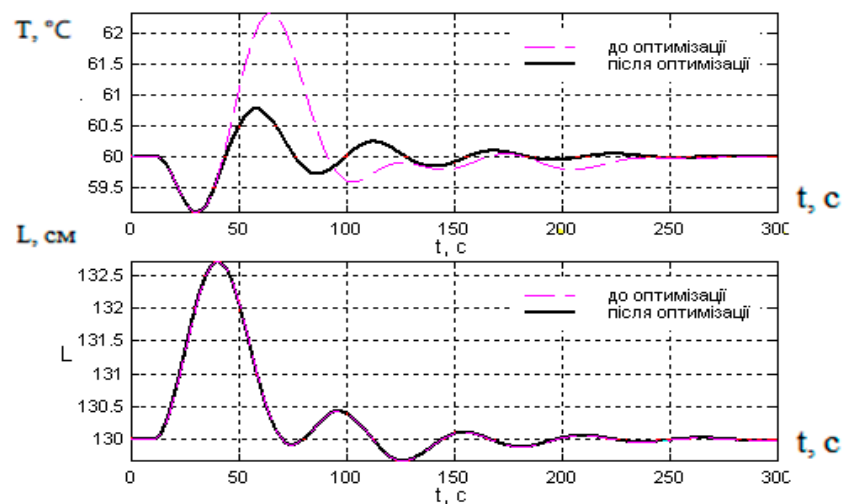


Рис. 2.7 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригувального зв'язку



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kk	0.10547	0	0.14	2	до - 45.3841
Tk1	37.8224	0	16.7	200	після - 26.1497
Tk2	12.8317	1	41.27	200	оптимізації.
Kr1	9.2255	0	4.74	40	Кількість кроків процедури оптимізації:
Tiz1	9.8635	1	41.27	200	максимальна - 1000
Tpr1	11.7733	0	17.1	200	фактична - 648

Рис. 2.8 – Результати оптимізації параметрів коригувального зв'язку Аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіацій параметрів об'єкта регулювання

2.3 Аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіацій параметрів ОК

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 $\pm 20\%$. А далі проаналізуємо САР на грубість.

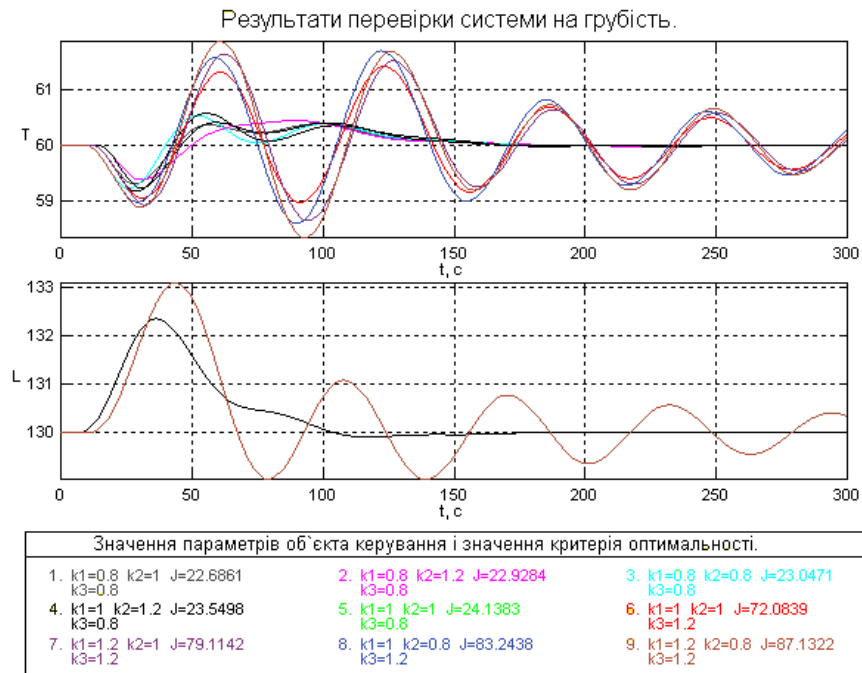


Рис. 2.9 – Аналіз САР підвищеної динамічної точності на грубість за умов варіації параметрів ОК

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 детермінованих та стохастичних збурень. «Найсприятливішою» для керування є САР з ПІД-регулятором з часами запізнення в каналах ОК, меншими на 20% від номінальних значень, і в перехресному каналі ОК номінальне. «Найнесприятливішою» для керування є САР з ПІД-регулятором з часами запізнення в прямих каналах ОК, на 20% більших від номінальних значень, і в перехресному каналі ОК на 20% менше.

2.4 Порівняння САР базової структури та підвищеної динамічної точності

Проведемо порівняльний аналіз САР базової структури і підвищеної динамічної точності.

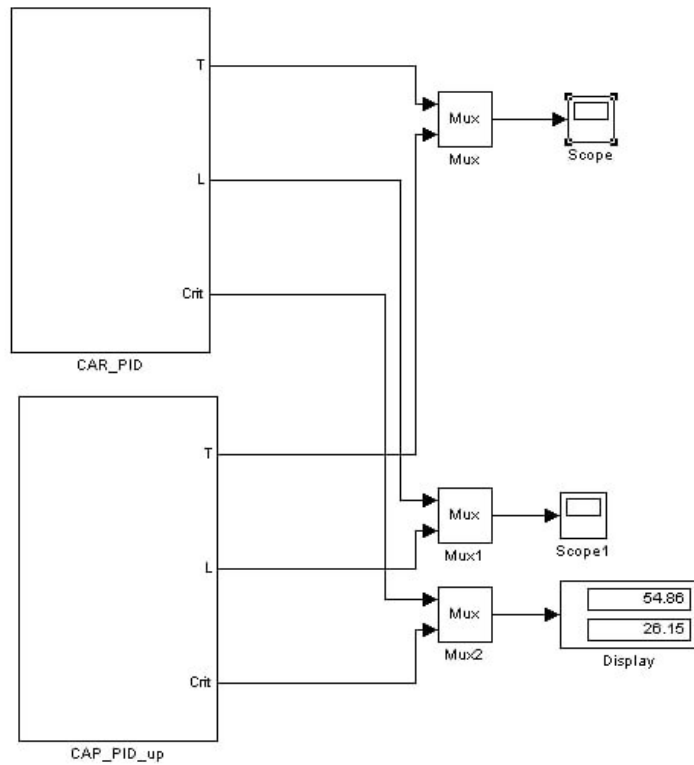


Рис. 2.10 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

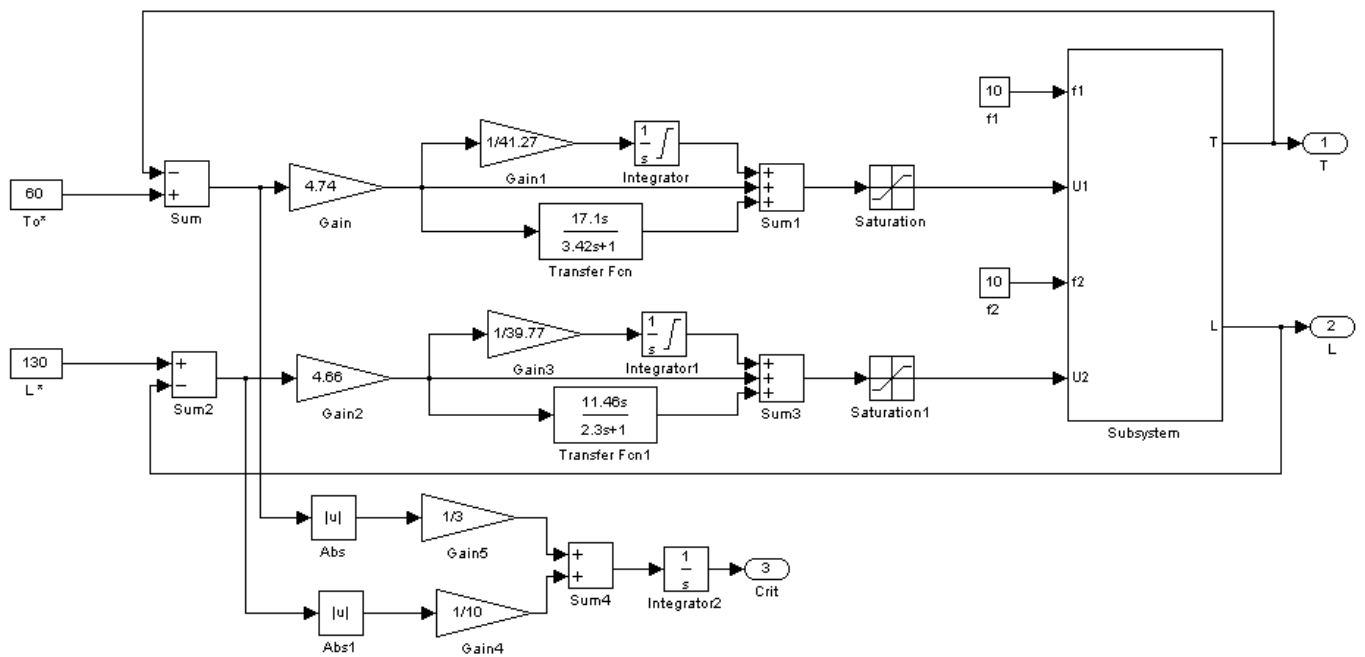


Рис. 2.11 – Структурна схема моделювання САР базової структури

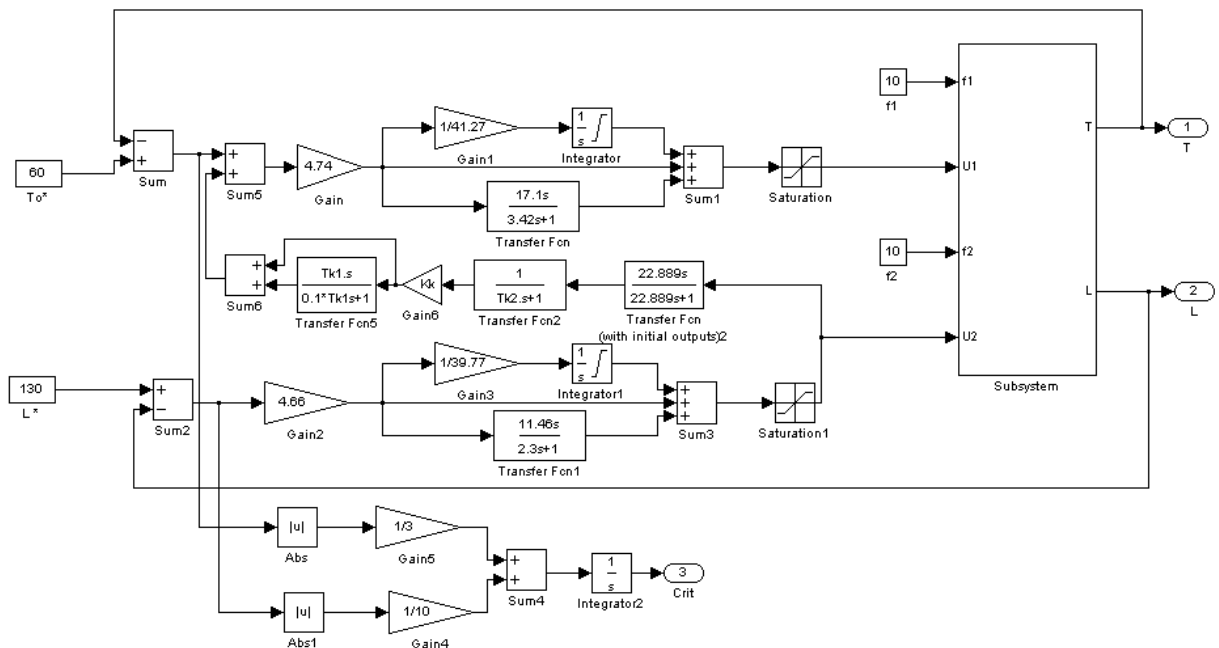


Рис. 2.12 – Структурна схема моделювання САР підвищеної динамічної точності

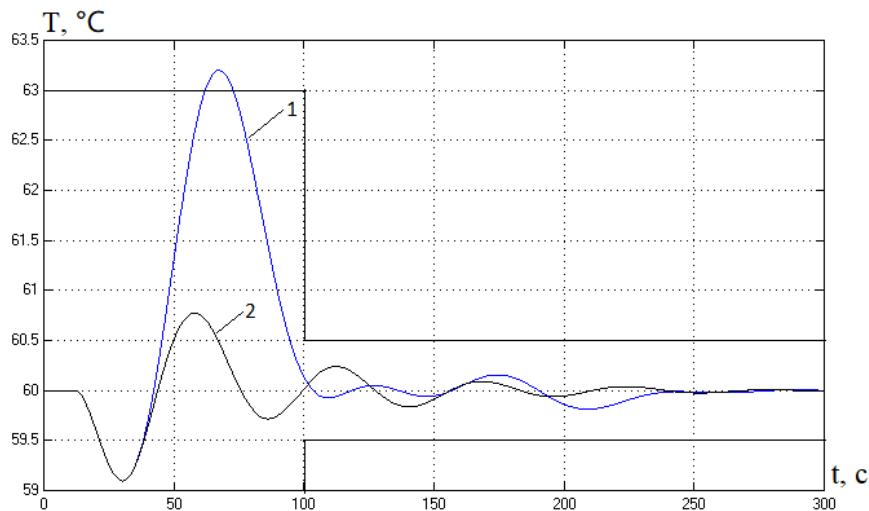


Рис. 2.13 – Результати порівняння САР з ПІД-регуляторами: 1 – САР базової структури; 2 – САР з підвищеною динамічною точністю

Таблиця 2.2 – Порівняння САР базової структури та САР підвищеної динамічної точності

САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{с}$	$\Delta L^{\text{МАКС}}, \text{см}$	$T_{\text{пп2}}, \text{с}$	
ПІД	3,2	94,65	2,7	50,56	54,86
ПІД підв.	0,9	123,4	2,7	50,56	26,15

2.5 Висновки за розділом

Можемо зробити висновок за результатом даного розділу. САР підвищеної динамічної точності задовольняє припустимі вимоги та показує себе значно краще. 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 ПІД-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.

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОНИХ МЕРЕЖ

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

Найбільш важливим застосуванням теорії нечітких множин є контролери нечіткої логіки. Їх функціонування дещо відрізняється від роботи звичайних контролерів; для опису системи замість диференціальних рівнянь використовуються знання експертів. Ці знання можуть бути виражені за допомогою лінгвістичних змінних, які описані нечіткими множинами. 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 ПІД-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 де яку невизначену нелінійності але є досвід управління в окремому випадку це процесом нагрівання води в системі опалення 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 моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійними статичними характеристиками

Якщо при розробки моделі процесу нагрівання води як об'єкту регулювання визначити нелінійний характер статичної характеристики за каналом регулювання, то для такого процесу доцільно виконати синтез системи управління на базі апарата нечіткої логіки.

Для представлення нелінійної моделі об'єкта управління, до відповідної моделі каналу регулювання була визначена відповідна нелінійна ланка. Нелінійність було реалізовано за допомогою включення блоку Look up Table у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта управління з додатковими блоками Look up Table, що визначають нелінійність статичних характеристик, представлена на рисунку 3.1. На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкту управління, яка є більш розширеною моделлю, завдяки включення

додаткової нелінійної ланки. 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 « $u_1 - T$ », яка має вигляд, представлений на рисунку 3.2.

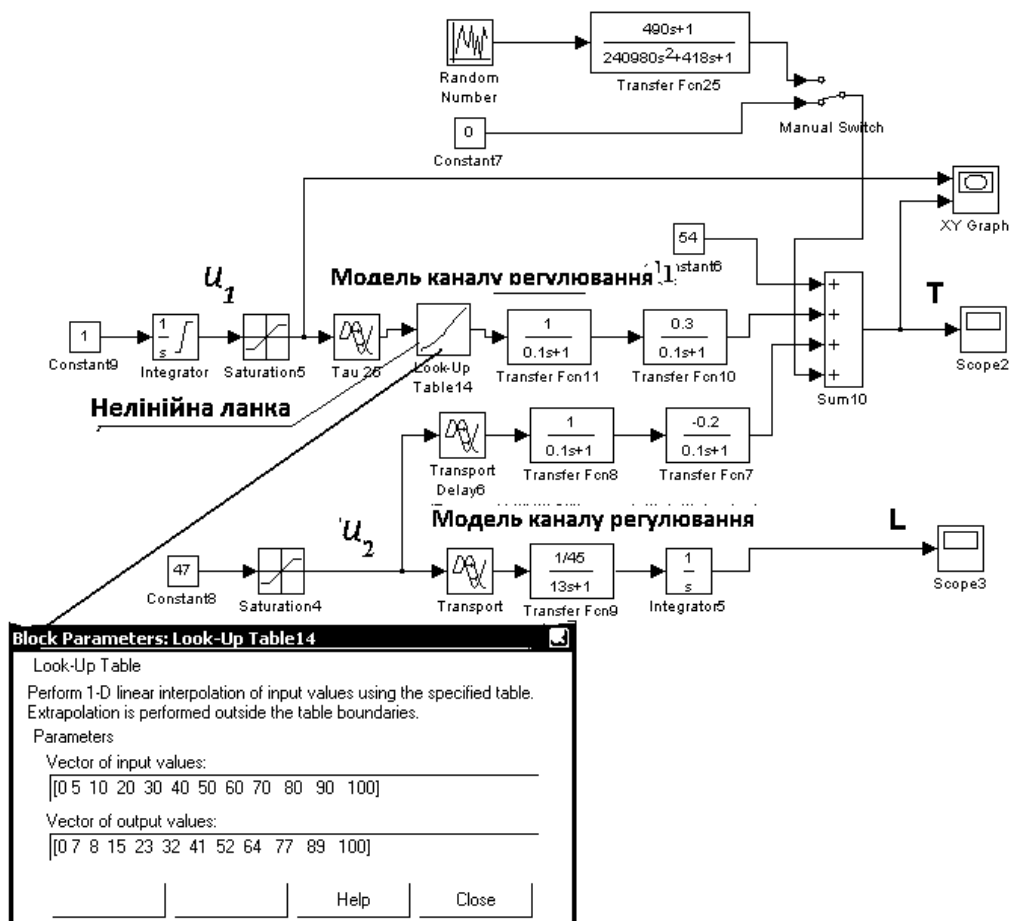


Рис 3.1. Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

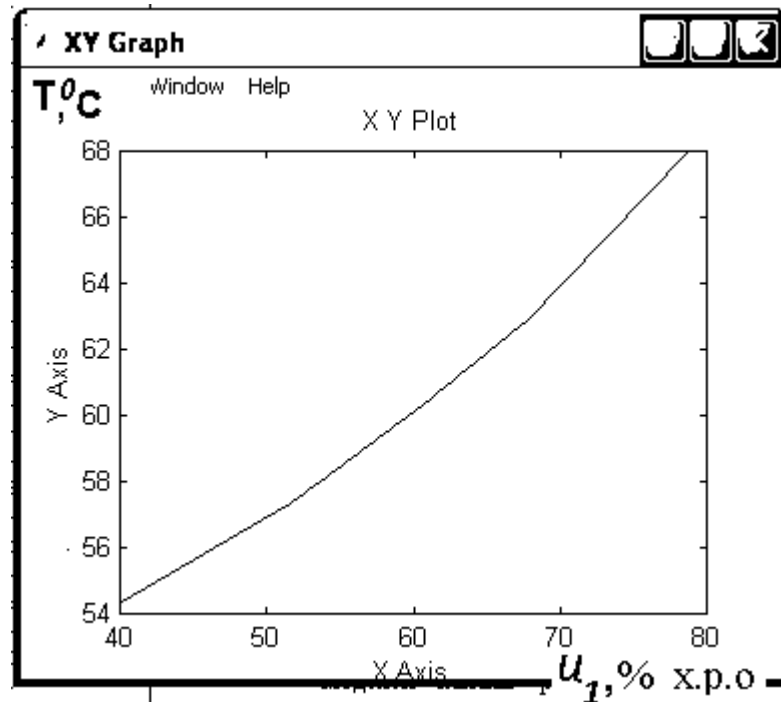


Рис. 3.2. Нелінійна статична характеристика моделі за каналом регулювання $u_1 - T$

З рисунку 3.2 видно, що статична характеристика несуттєво нелінійна, це дає можливість виконати синтез САУ з традиційними ПД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

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

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

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

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

$$J = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{3} |e_1(t)| + \frac{1}{10} |e_2(t)| \right) dt \rightarrow \min$$

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

$e_2(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням рівня води L в системі опалення.

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

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

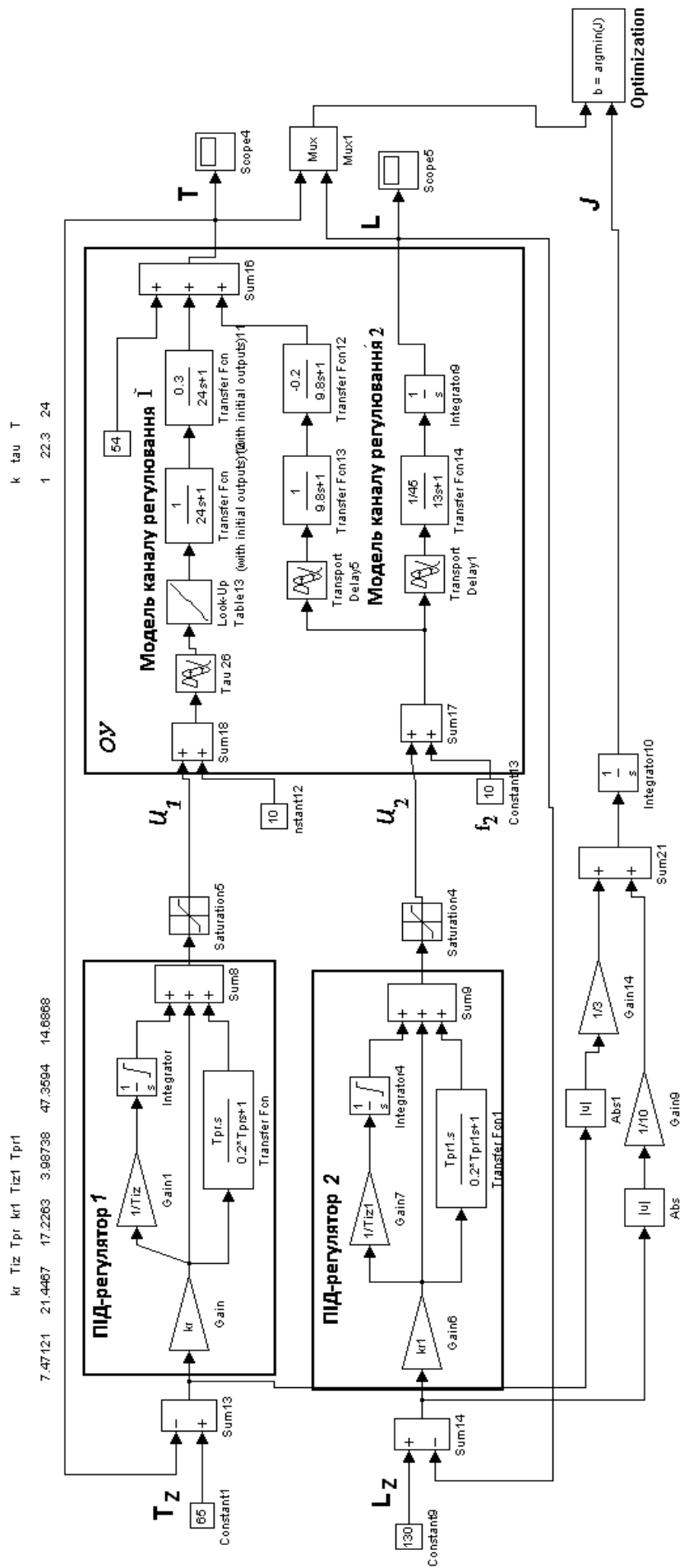


Рис 3.3. Структурна схема моделі САУ з традиційними ПІД-регуляторами і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink

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

Нечітка логіка в ПІД-регуляторах використовується переважно двома шляхами: для побудови самого регулятора і для організації підстроювання коефіцієнтів ПІД-регулятора. Обидва шляхи можуть використовуватися в ПІД-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.

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 розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.4.

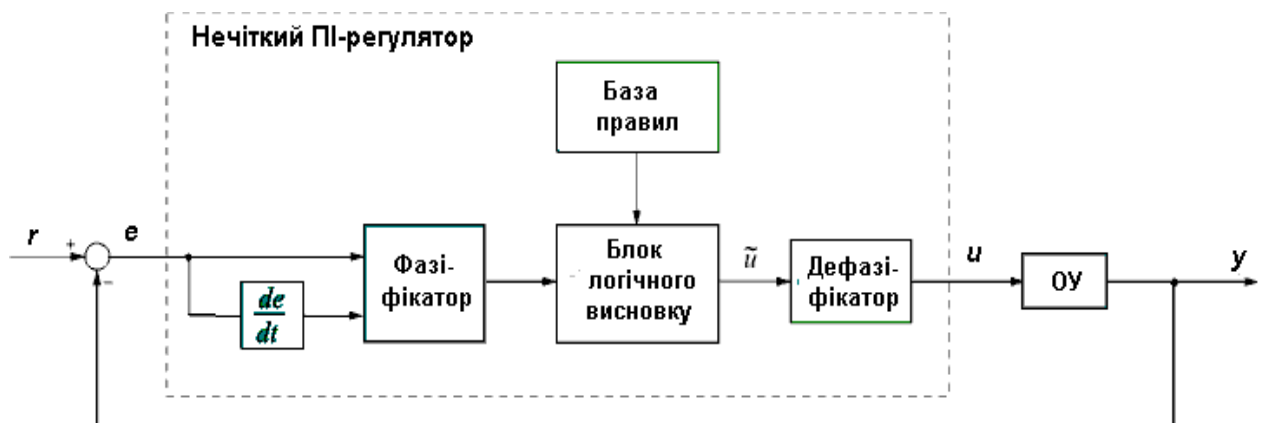


Рис 3.4. Спрощена структурна схема нечіткого регулятора у складі САР

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

Для запуску вікна *fis*-редактора в командному вікні MATLAB Window commander було прописано команду «Fuzzy». Після чого було вибрано алгоритм Sugeno та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рисунку 3.4 зображено вікно налаштування *fis*-файлу для нечіткого регулятора температури води T 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.

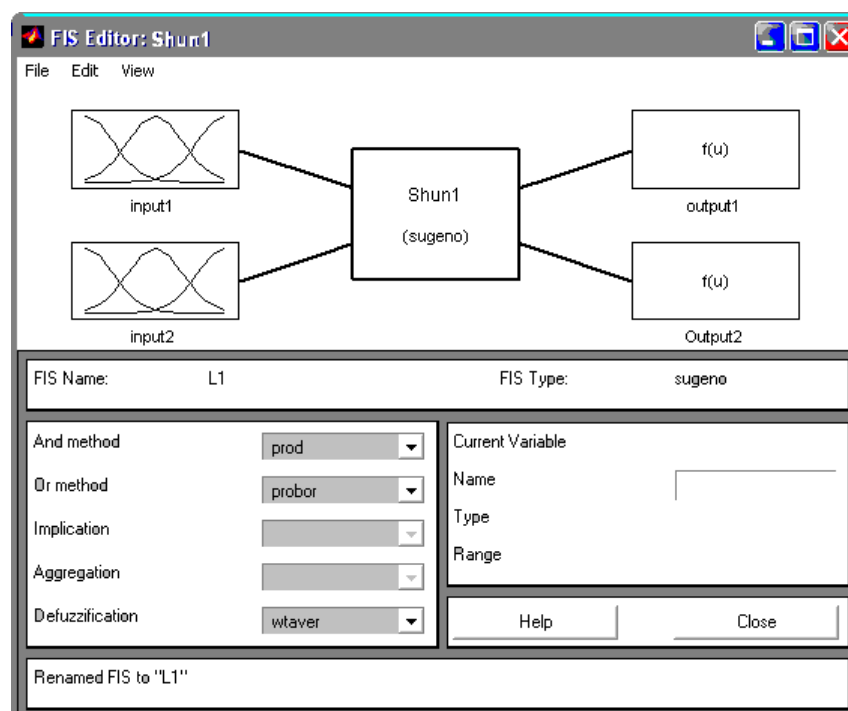


Рисунок 3.5. Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

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.

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 3.6 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 3.7.

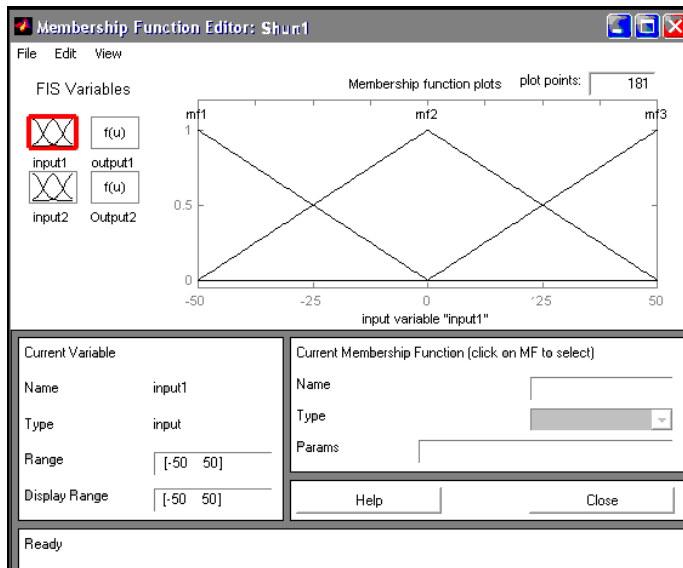


Рисунок 3.6. Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

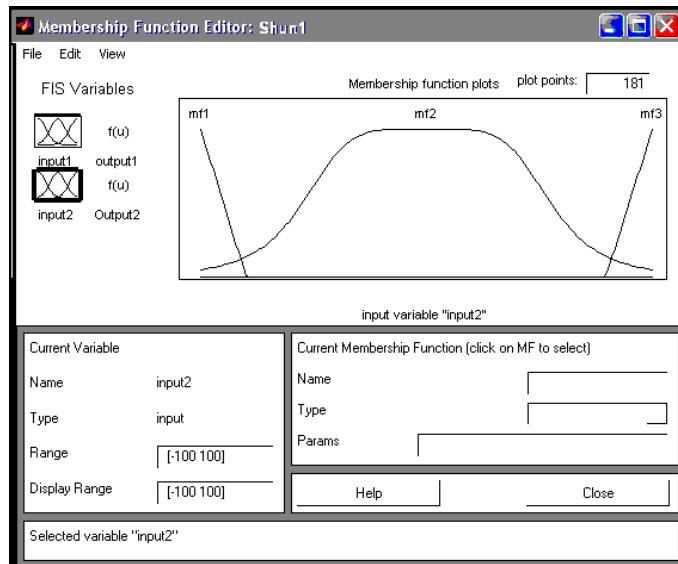


Рисунок 3.7. Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATnK

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятору температури води T

$e_1 \backslash \Delta e_1$	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	—	$u_1 = -31;$ $\Delta u_1 = -0,6;$	—
Z	$u_1 = -31;$ $\Delta u_1 = -0,6;$	$u_1 = 0;$ $\Delta u_1 = 0;$	$u_1 = 32;$ $\Delta u_1 = 0,6;$
PE	—	$u_1 = 32;$ $\Delta u_1 = 0,6;$	—

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 3.8.

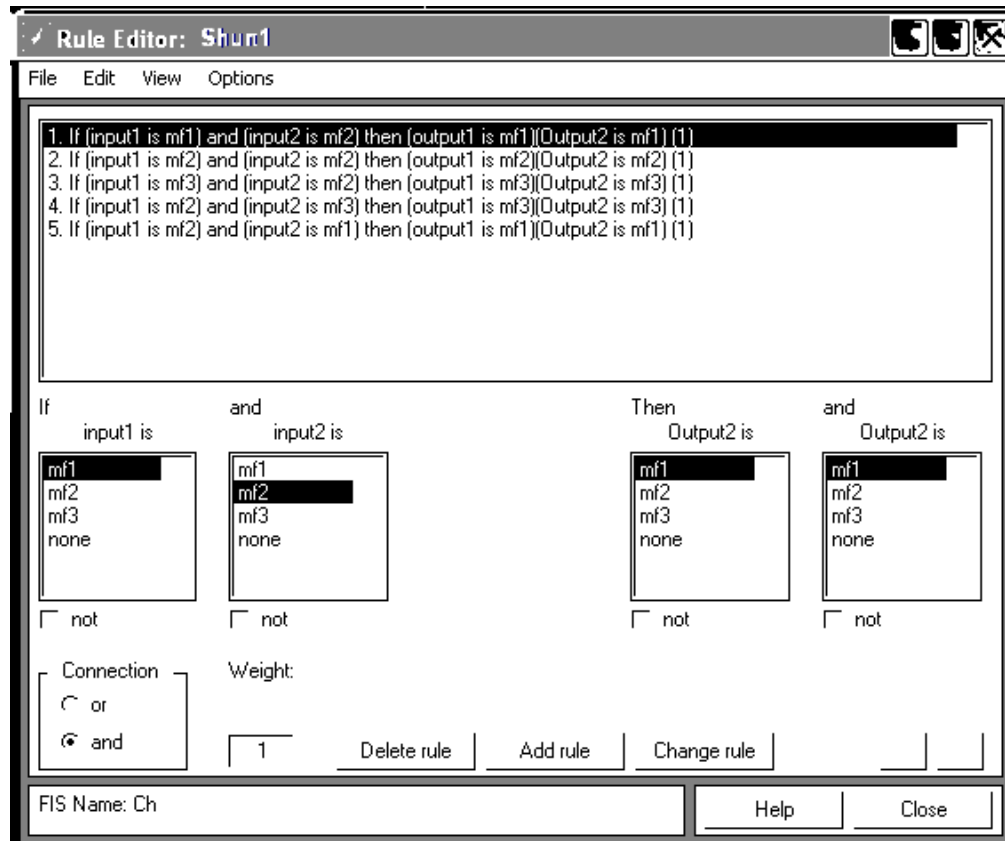


Рисунок 3.8. Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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

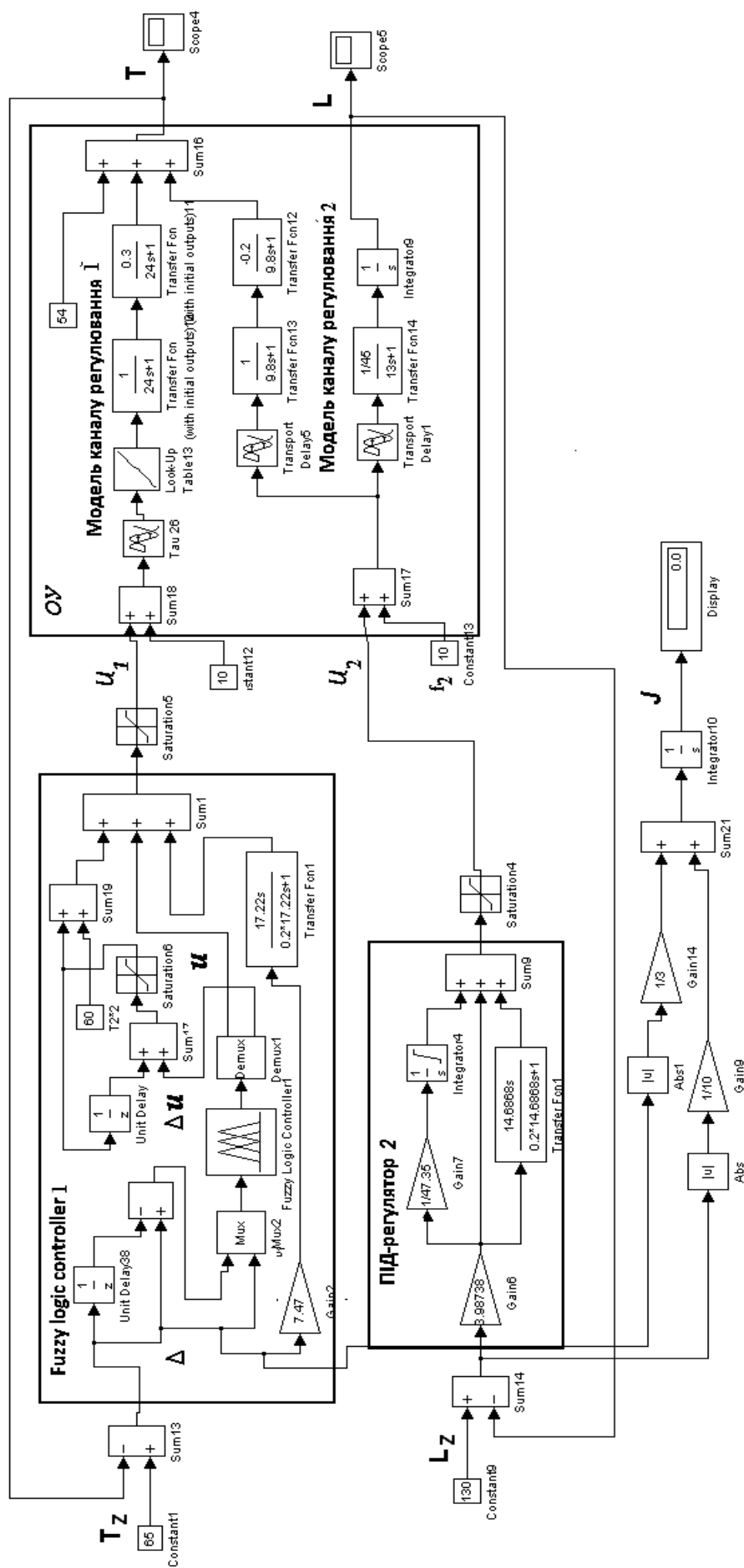


Рисунок 3.9 – Структурна схема моделі САУ з нечіткими регуляторами за температурою води Т і ПД-регулятором рівня L, що реалізована засобами середовища MATLAB\Simulink

Аналогічним чином можливо синтезувати нечіткий регулятор для регулювання рівня L води в системі опалення, однак відповідний канал регулювання згідно з представленою моделлю має лінійну статичну характеристику та точно визначені параметрами. Таким чином актуальність синтезу нечіткого регулятора відсутня.

Слід зазначити, що на рисунку 3.9 представлена схема моделювання САР з ПД регулятором та з нечітким регулятором якій відтворює ПІ складову ПД регулятора. Як можна побачити з рисунку диференціальна Д- складова однакова в різних системах управління. Такі системи були представлені паралельно для визначення відповідних перехідних характеристик для порівняльного аналізу за прямими показниками якості регулювання.

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

$$\alpha_1 = A1(x0) \wedge B1(y0)$$

$$\alpha_2 = A2(x0) \wedge B2(y0)$$

де через $\wedge$ позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

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

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

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

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

Таким чином, для переходу від Сугено 0-го порядку до алгоритму Мамдані необхідно визначити вихідні функції приналежності $C_1(z)$, $C_2(z)$, $C_3(z)$ замість відповідних значень W_2 , $-W_2$, та C_1 , C_2 .

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

Для виконання чисельних розрахунків на етапі дефазифікації для алгоритму Мамадані використана формула центру ваги або центроїд площі що розраховується за формулою:

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

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

Таким чином, на рисунку 3.10 представлені графіки перехідних процесів при східчастому збурюванні. Згідно з графіками перехідних процесів можна зробити висновок що завдяки використанню нечіткого регулятора в системі, не дало покращати якість регулювання за температурою води T . Таким чином, робота далі буде пов'язана з перетворенням системи з нечітким регулятором в нейромережеву систему управління для подальшої процедури оптимізації.

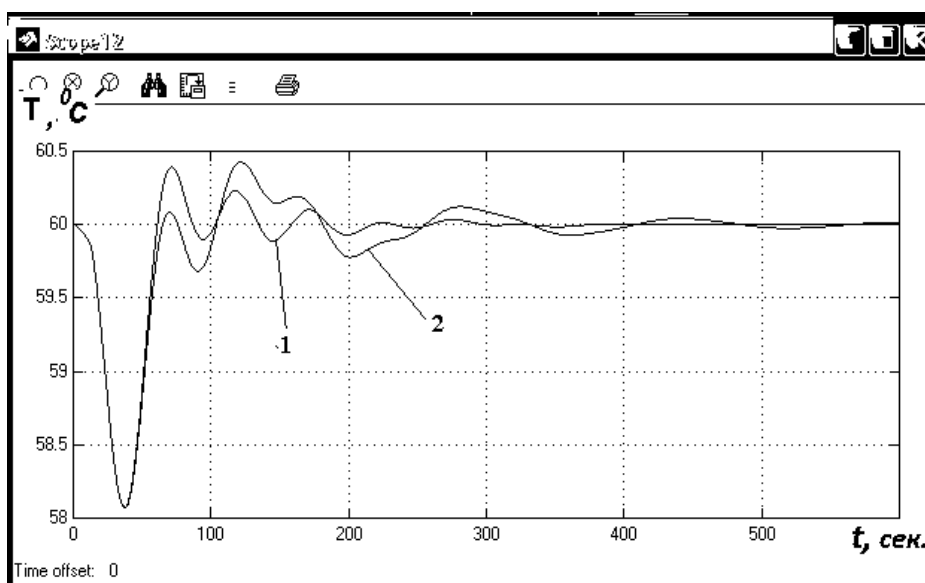


Рисунок 3.10 Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1– перехідний процес у САУ з ПІД регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором температури T ;

3.5. Синтез САР з нелінійним об'єктом на основі нейронного регулятора

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. Нейронна мережа – це послідовність нейронів - нейронелементів, з'єднаних між собою синапсами. Структура нейронної мережі прийшла в світ програмування прямо з біології. Найбільш поширена структура – багат шарова, застосовується в якості регуляторів нейромережевих алгоритмів управління.

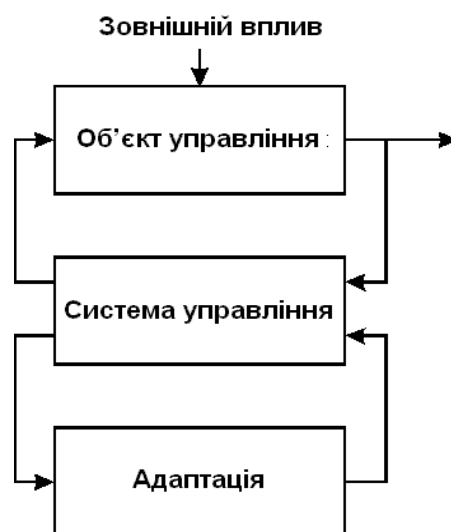


Рисунок 3.11. Загальна схема адаптивної системи керування

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятора визначає приріст управляючої дія як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейронрегулятора необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку буде використано гіперболічну тангенціальну функцію. 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 3.12.

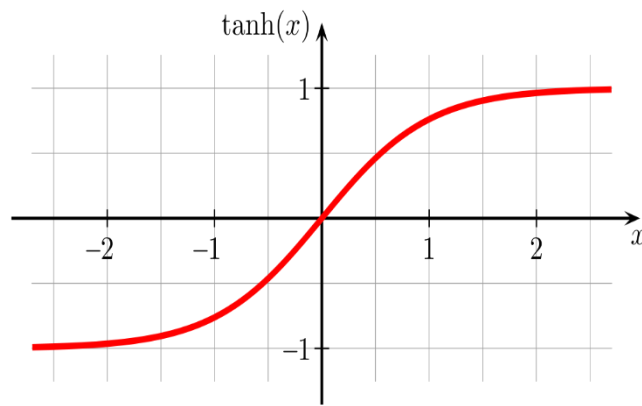


Рисунок 3.12. Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

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

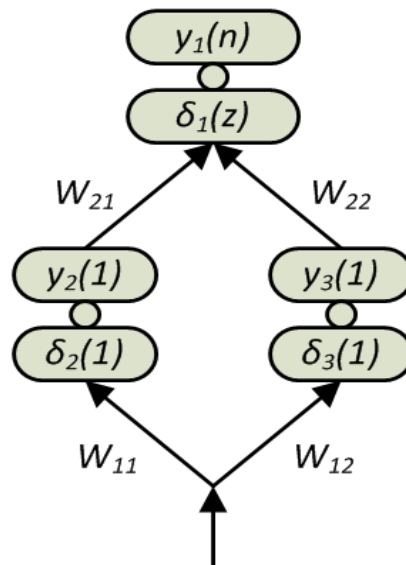


Рисунок 3.13 Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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, представленої на рисунку 3.22.

Таблиця 3.3 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	l	u	Δu
1	-70	-52,2	-2.49
2	-10	-7,4	-0.3557
3	-1	-0,747	-0.0355
4	0	0	0
5	1	0,747	-0.0355
6	10	7,4	-0.355
7	70	52,2	2.49
8			

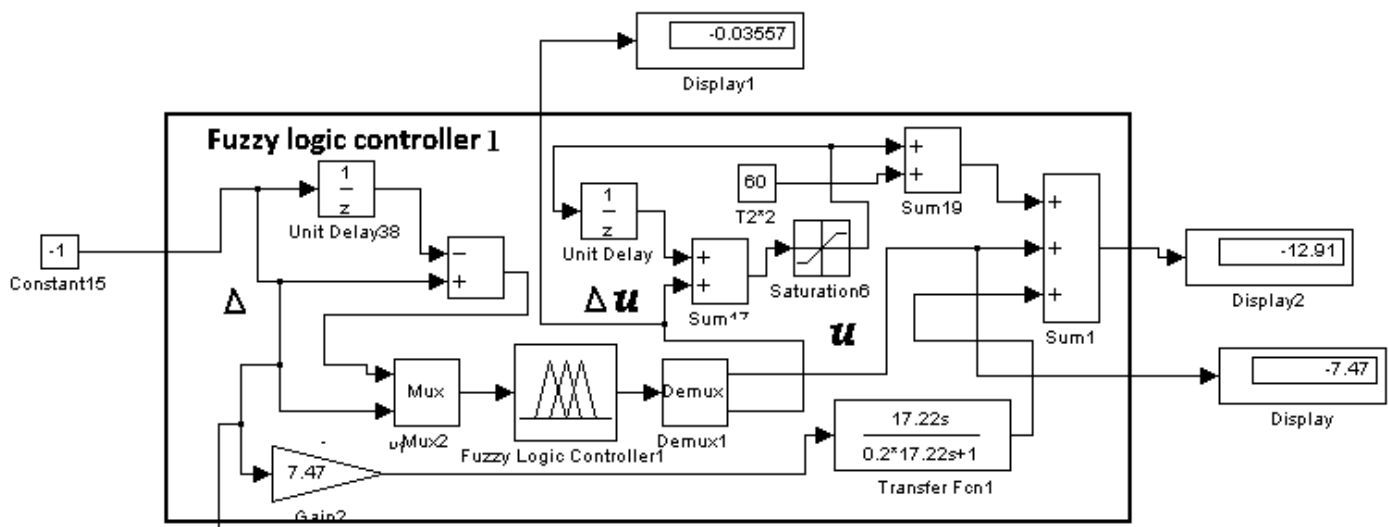


Рисунок. 3.14 – Схема моделювання для отримання даних для навчання нейронної мережі

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.15, з яких можливо побачити, що десь на 150-м кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями було закінчено.

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі. На рисунках 3.29 та 3.30 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює І – складову та П – складову нейрорегулятора температури.

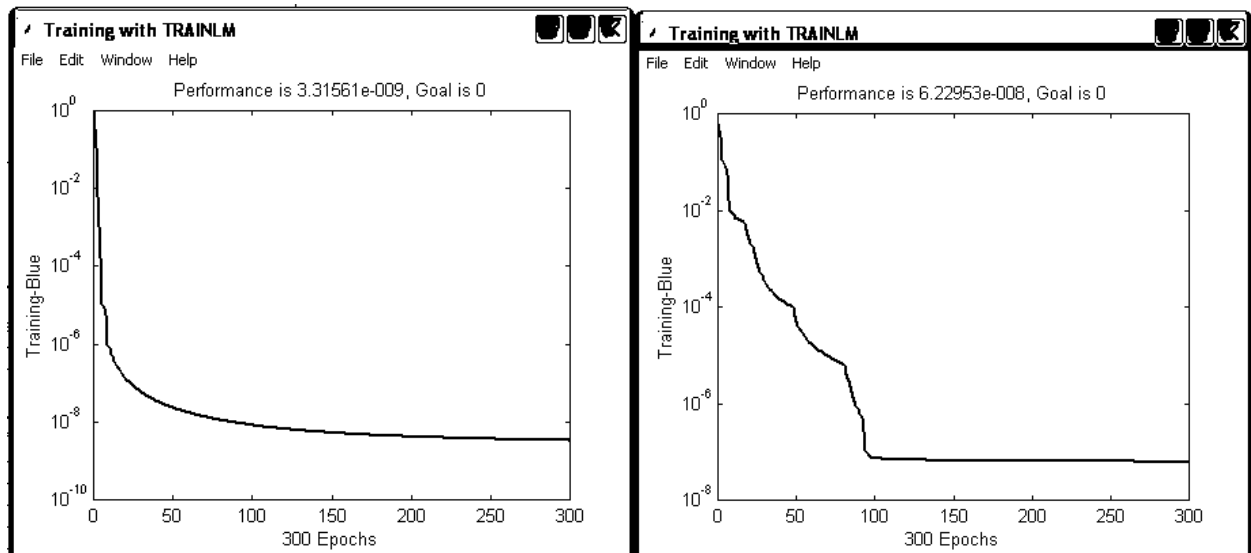


Рисунок 3.15 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених в програмах на рисунках 3.23 і 3.24, 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 навчанню штучної нейронної мережі за методом зворотного розповсюдження похибки, похибка для вихідного шару нейронної мережі визначається за наступною формулою (1):

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

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 3.23:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0074 - 0.00747) * (0.0074) * (1 - 0.0074) = 0.000009966648 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) * 0.000009966648 = \\ &= -0.0000000143 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) * 0.000009966648 = \\ &= 0.0000000351 \end{aligned}$$

Розрахунок помилок для I – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0359 - 0.0355) * (0.0359) * (1 - 0.0359) = 0.03330085 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

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

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

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

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

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.16

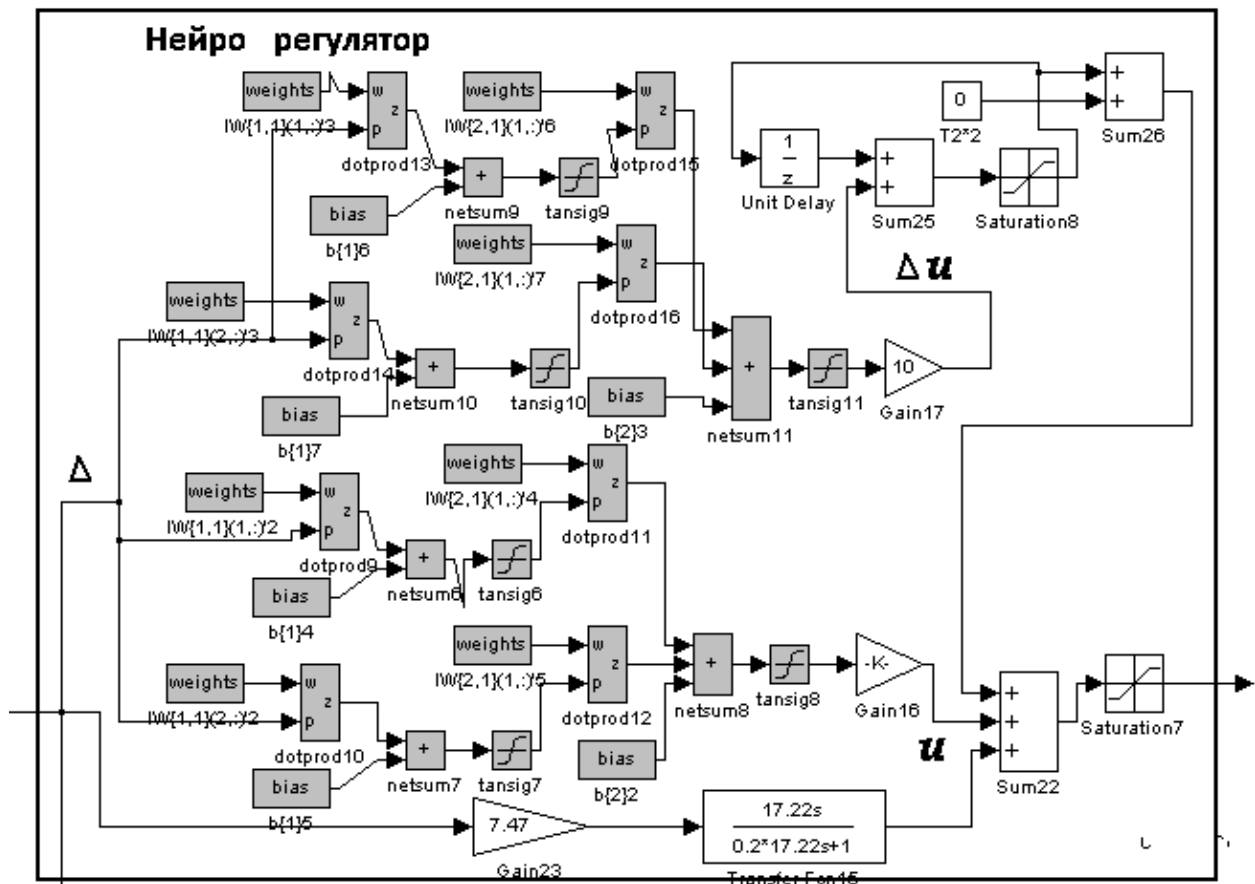


Рисунок 3.16 – Схема моделювання нейронного регулятора

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.

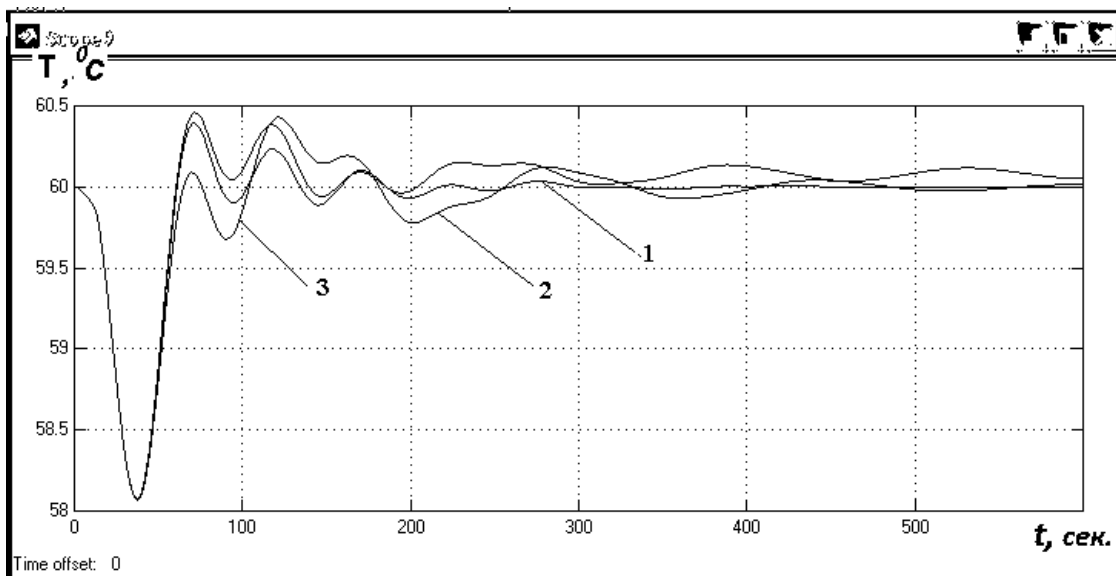


Рисунок 3.17 Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нейро регулятором

Аналогічним чином бути також само може бути синтезований нейрорегулятор рівня води в системі водопостачання.

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

На заключному етапі розробки САУ був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САУ за виходом системи на номінальний режим функціонування та при східчастому впливі що збурює. З графіків перехідних процесів що представлені на рисунку 3.41 можливо побачити, що час регулювання при САУ з нейронним регулятором та ПД регулятором одноковий але максимальне динамічне відхилення в САУ 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.

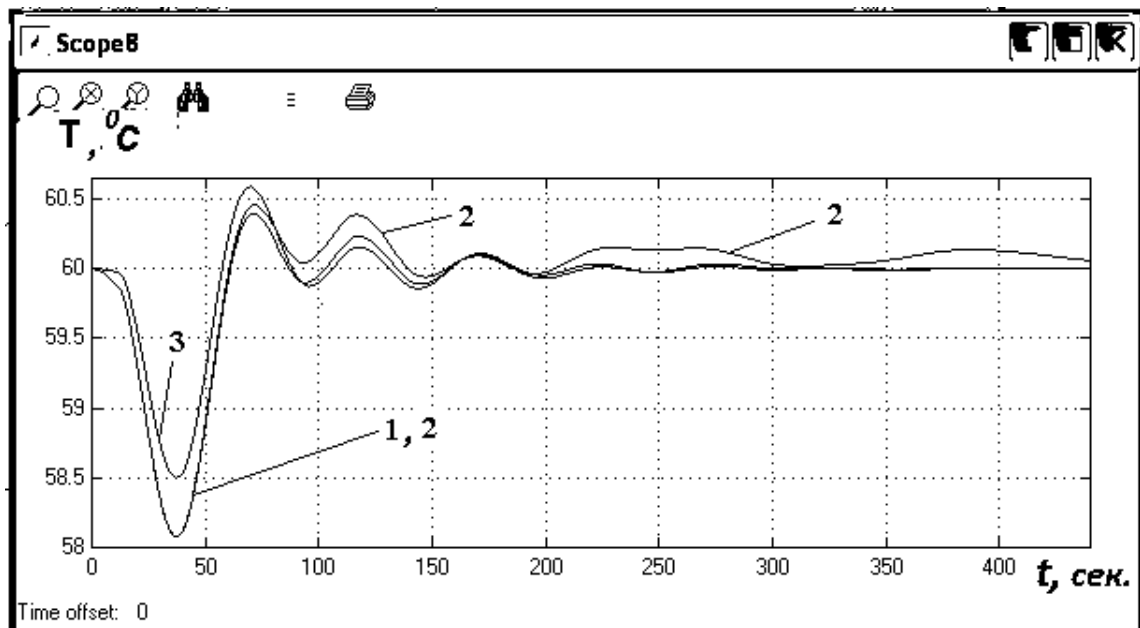


Рисунок 3.18 Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 –перехідний процес у САУ з нечітким регулятором; графік 3 – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучної 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 3.42, де зображені вікно результату аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень змінних регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.42 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням найкраще функціонує САУ з нейрорегулятором. З рисунку 3.42 видно що САУ з нечітким регулятором за температурою води T 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 ПІД-регуляторами та САУ з нейрорегуляторами.

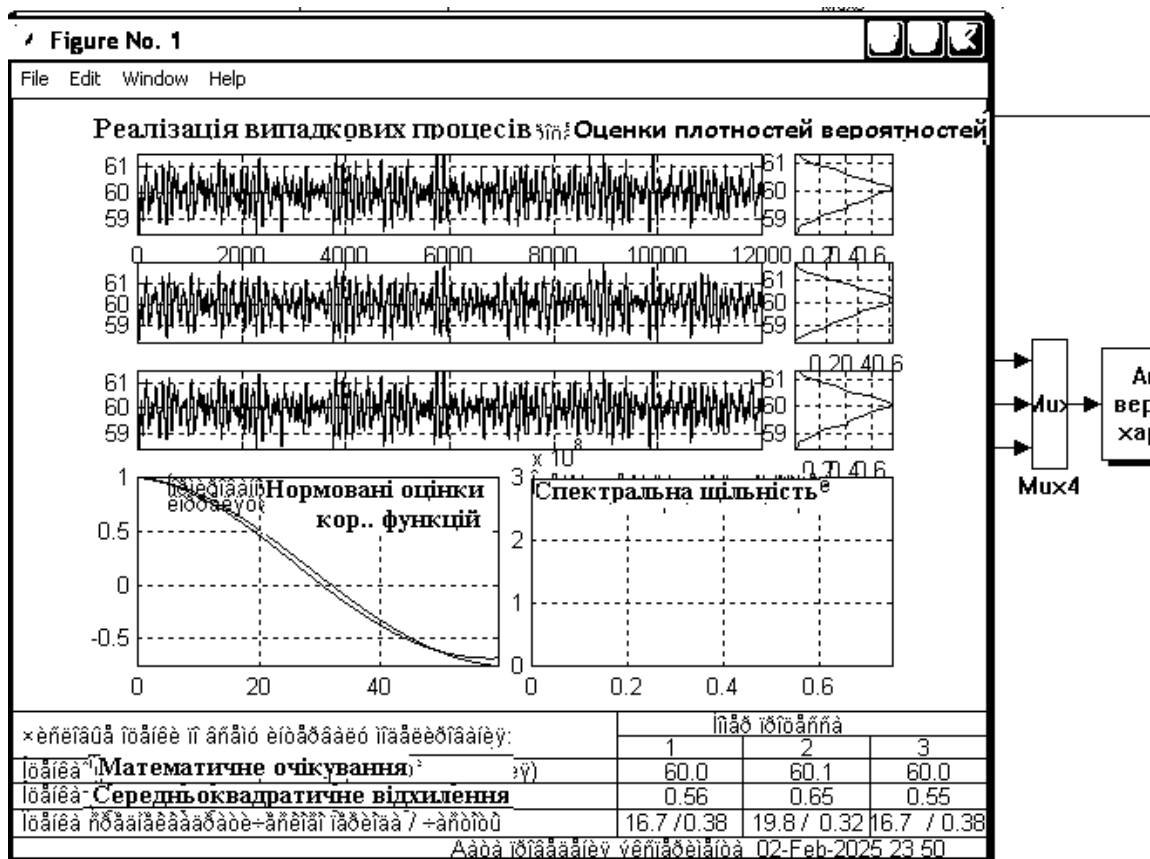


Рисунок 3.19 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик за каналом регулювання температури води Т

Таблиця 3.4 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПД-регулятором	САУ з нечітким регулятором	САУ з регулятором представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈250 с	300 с	≈250 с
Максимальне динамічне відхилення	1,9 °C	1,9 °C	1,5 °C
Інтегральний показник	38,5	40,1	33,8
Математичне очікування	60,0 °C	60,1 °C	60,0 °C
Середньоквадратичне відхилення	0,56	0,65	0,55

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 наданно в додатку №1.

3.7. Висновки за розділом

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

4. АНАЛІЗ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІДГРІВУ ВОДИ, ВИЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, ОБҐРУНТУВАННЯ НОВИХ ФУНКЦІЙ, ЯКІ МАЮТЬ БУТИ РЕАЛІЗОВАНІ В САК

4.1. Обґрунтування нової функції, яка має бути реалізована в САК цього технологічного процесу.

Технологічним регламентом процесу підігріву води встановлені верхнє та нижнє обмеження на температуру і рівень води у резервуарі. Підтримка необхідної температури води в заданих межах без їх порушення, при одночасном виконанні інших регламентів процесу підігріву води, дозволяє досягти необхідного режиму без зайвих витрат електричної енергії. В умовах діючих нестационарних збурень випадкового характеру, що призводять до постійної зміни температури, а також враховуючи значну інерційність та зміну коефіцієнту передачі в каналі регулювання U_1-T , рішення поставленого завдання є не тривіальним. Розглянемо більш детально особливості процесу підігріву води як об'єкту керування, які обумовлюють актуальність реалізації САК нових функцій керування.

Якщо говорити про властивості об'єкту керування: так, коефіцієнт передачі (Gain) об'єкта керування буде змінюватися, і досить істотно. Теоретично автоматичного управління коефіцієнт передачі об'єкта K_o показує, на скільки зміниться вихідна величина при зміні вхідного впливу на одиницю.

Ось основні фактори, які впливають на динаміку нашої системи:

1. Змінне навантаження

Коли в систему починає надходити холодна вода ($8\text{ }^{\circ}\text{C}$), вона виступає як потужний вплив, що збурює.

При відсутності розбору: Система працює в режимі рециркуляції. Тепловтрати мінімальні, і системі потрібно лише «підтримувати» температуру. Коефіцієнт передачі в цьому випадку високий: невелике включення нагріву швидко піднімає температуру.

При активному заборі води: Холодне підживлення різко збільшує теплове навантаження. Тепер та сама порція енергії від теплообмінника розподіляється на більшу масу води з нижчою початковою ентальпією. У цей момент ефективний коефіцієнт передачі падає, тому що реакція системи на той самий керуючий вплив стає більш «м'явою».

2. Зміна постійної часу (T_0) Важливо враховувати як коефіцієнт передачі, а й інерційність. У разі великої протоки води через ємність час повного оновлення води в баку скорочується. Це зменшує постійний час об'єкта. Система стає менш інерційною, але вимагає набагато більшої потужності для підтримки уставки.

3. Вплив рециркуляції Рециркуляція допомагає вирівняти температурне поле всередині ємності, що робить об'єкт більш передбачуваним. Це впливає на логарифмічну різницю температур в теплообміннику і, отже, на його миттєву ефективність.

Таким чином якщо налаштовувати ПІД-регулятор то виникає наступна проблема. Якщо налаштувати коефіцієнти за відсутності розбирання води, то при включенні підживлення регулятор може працювати занадто повільно. Якщо налаштувати "жорстко" під максимальний розбір, то в режимі рециркуляції система може піти в автоколивання через надмірне посилення. Для рішення такої проблеми може застосовуватися наприклад системи адаптивного керування, або спеціальні регулятори змінної структури, які забезпечують належний запас стійкості у широкому діапазоні зміни параметрів ОК. При адаптивних системах може в ідеалі тут застосовуватися Gain Scheduling, адаптивна зміна коефіцієнтів. Тобто розімкнена адаптація. Якщо є датчик протоки на лінії підживлення, можливо програмно збільшувати коефіцієнт посилення регулятора (K_p) пропорційно витраті холодної води, щоб компенсувати падіння коефіцієнта передачі об'єкта.

Використання адаптивного керування в системах тепlopостачання — це, питання переходу від «приблизної» підтримки температури до прецизійного енергоефективного регулювання.

У теплових об'єктах, подібних до нашого, класичний ПД-регулятор з жорсткими коефіцієнтами неминуче стикається з фізичними обмеженнями. Нижче наведено докладне інженерне обґрунтування, чому компенсація коефіцієнта передачі та використання адаптивних систем є критично важливими.

У нашому об'єкті коефіцієнт передачі об'єкта K_o значно вищий у режимі рециркуляції і різко падає при включенні підживлення холодної води (8 °C).

Як тільки піде холодна вода, регулятор не зможе оперативно компенсувати просідання. Температура впаде нижче за уставку, і системі знадобиться занадто багато часу на відновлення. У ГВП це може призвести до порушення техпроцесу або дискомфорту.

Якщо налаштувати ПД на режим підживлення: Коефіцієнти будуть «агресивними», щоб швидко нагрівати холодну воду. Але як тільки підживлення припиниться, контур стане надчутливим. У режимі рециркуляції це призведе до автоколивань і перегріву, оскільки надмірна потужність вкидатиметься в малий об'єм води.

Адаптація дозволяє регулятору змінювати свою жорсткість в реальному часі, забезпечуючи стабільність в обох режимах. Додатково окрім адаптації може застосовуватись також динамічна компенсація збурень. Такий принцип вже реалізован при побудові автономної САР температури води.

У звичайних регуляторах реакція починається лише тоді, коли датчик температури вже побачив відхилення. В системі з великою ємністю це відбувається із затримкою. Використання сучасних систем дозволяє реагувати на підживлення превентивно. збільшує потужність ТЕНів або витрати через теплообмінник.

Економія енергоресурсів і ресурс обладнання

Перерегулювання: Постійні проскоки вище заданої температури - це прямі втрати тепла. Знос виконавчих механізмів: Якщо система схильна до коливань, клапани або контактори ТЕНів спрацьовують у рази частіше, ніж потрібно.

Адаптивні системи, або системи зі спеціальними регуляторами, наприклад регулятори змінної структури або на базі MPC - Model Predictive Control

розраховують оптимальну траєкторію нагріву, мінімізуючи кількість перемикачів і зайву витрату енергії.

В ідеальній інженерній практиці динамічна компенсація збурень (Feed-forward) і алгоритми підвищення запасу стійкості системи як правило не виключають, а доповнюють одне одного. Однак вони вирішують різні завдання. Тому ми можемо доповнити вже існуючу в нас систему алгоритмами що підвищать запас стійкості САК.

4.2. Допрацювання моделі технічного процесу, розробка структурної схеми модернізованої САК.

Актуальність забезпечення запасу стійкості та компенсації збурень підвищується, якщо:

1. Великий діапазон витрат: Якщо розбір води змінюється від 0 до 100%.
2. Жорсткий допуск за температурою: Якщо вам потрібно тримати 60°C і падіння до 50°C неприпустимо за санітарними чи технологічними нормами.
3. Потужний нагрівач: Якщо теплообмінник має великий запас потужності. Без адаптації в режимі малого розбору такий нагрівач буде перенавантажуватись то вмикаючись, то вимикаючись.

Виходячи з вище сказаного та особливостей процесу підігріву води як ОК підвищення ефективності роботи ОК в режимах нестабільного споживання води може бути досягнуто при реалізації системи зі спеціальним регулятором змінної структури для об'єктів технологічного типу. Регулятор розроблен проф. Хобіним В.А. і добре підходить для технологічних ОК з нестаціонарними параметрами.

Використання цього регулятора в системі регулювання T підвищить запас стійкості та динамічну точність САК. А це дасть можливість виконувати обмеження технологічного регламенту у нестационарних умовах та підтримувати необхідний тепловий режим.

4.3. Вибір регулятора змінної структури.

Розглянемо структуру та алгоритми регулятора змінної структури для об'єктів технологічного типу з конспектів Хобіна В.А.

Конструктивним для об'єктів технологічного типу є евристичний підхід, заснований на досвіді, накопиченому розробниками САР та поглиблених дослідженнях вже випробованих на практиці алгоритмів, їх вдосконалення, об'єднання в цілісні альтернативні варіанти алгоритмів з подальшою їх параметричною оптимізацією та порівняльними дослідженнями в різних умовах у ході спеціальних експериментів. Як такі алгоритми використовувалися: а) базовий ПД-алгоритм регулювання; б) алгоритми комутації структури регулятора, зокрема комутації його настрюювальних параметрів; в) алгоритми прогнозування вільного руху САР у замкнутому контурі на час запізнення вперед; г) алгоритми «ненаголошеного» замикання та розмикання контуру регулювання.

Відповідно до такого підходу, після попередніх досліджень структуру регулятора, як того що претендує на альтернативу ПД-регулятора, зображено на рис. 4.1.

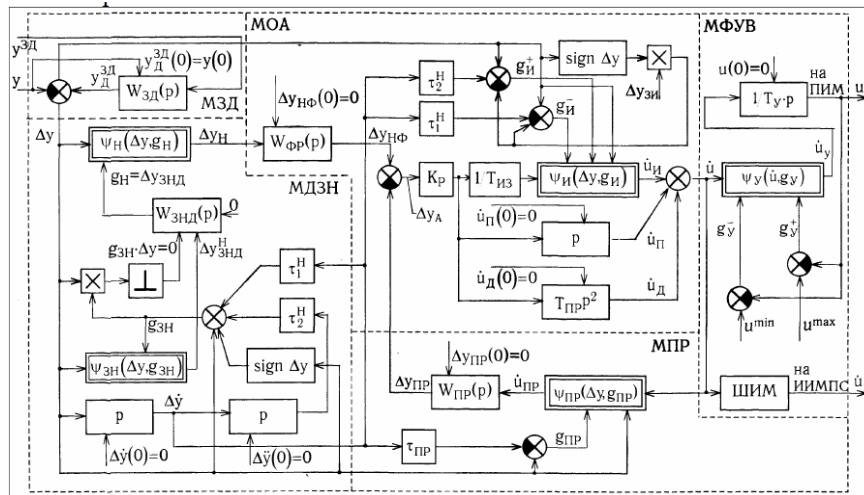


Рис. 4.1 Структурна схема базового регулятора змінної структури - (РПС).

4.4. Розробка структурної схеми САР з регулятором змінної структури.

Розроблена САР температури та рівня води у резервуарі, що передбачає регулювання

цих параметрів на основі регулятора змінної структури та типового ПІД регулятора. В САР реалізована «автономність» контуру регулювання температури відносно керуючої дій у контурі регулювання рівня води у резервуарі. Застосування регулятора змінної структури та «автономності» направлено на підвищення точності стабілізації температури води у широких діапазонах зміни її витрат споживачами. Структурна схема САК представлена на рис. 4.2.

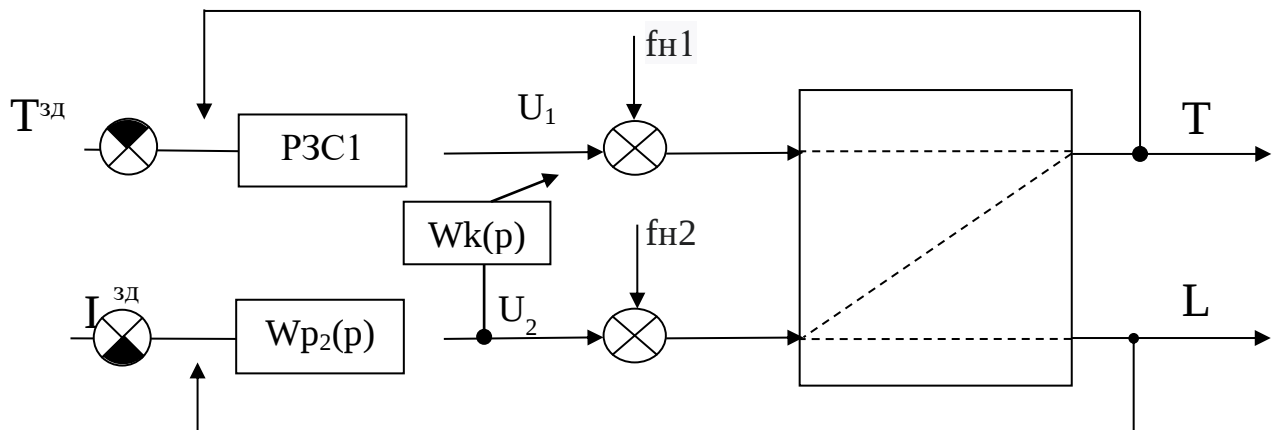


Рис. 4.2 Структурна схема САР температури та рівня води у резервуарі з регулятором змінної структури.

На рисунку:

T – температура води в резервуарі, $^{\circ}C$;

L – рівень води в резервуарі, см;

U_1 – положення регулюючого органу зміни напруги на нагрівачі, %х.р.о.;

U_2 – положення регулюючого органу подачі води з системи центрального водопостачання, %х.р.о.;

$P3C1$ – регулятор температура води в резервуарі змінної структури;

$Wp_2(p)$ – ПІД регулятор рівня води у резервуарі;

$T^{зд}$ - задане значення температури води у резервуарі, $^{\circ}C$;

$L^{зд}$ – задане значення рівня води у резервуарі, см;

$fn1, fn2$ – вектори неконтрольовані збурення, що приведені до входу ОК.

4.5. Розробка імітаційної моделі САР температури та рівня води у резервуарі з регулятором змінної структури та дослідження її роботи.

Дослідження роботи САР з регулятором змінної структури будемо проводити у порівнянні з роботою САР з типовим ПІД регулятором. Модель динаміки ОК не змінена тому на першому етапі дослідження оптимальний параметричний синтез САР з ПІД регулятором не здійснювались, а оптимальні значення параметрів регулятора беремо з раніше отриманих. Налаштування регулятора змінної структури проводимо на основі параметрів моделі ОК першого порядку. Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором та регулятором змінної структури в середовищі Simulink для порівняльного аналізу наведена на рис. 4.3. Інтегральний критерій оптимальності залишається незмінним – інтегральний модульний.

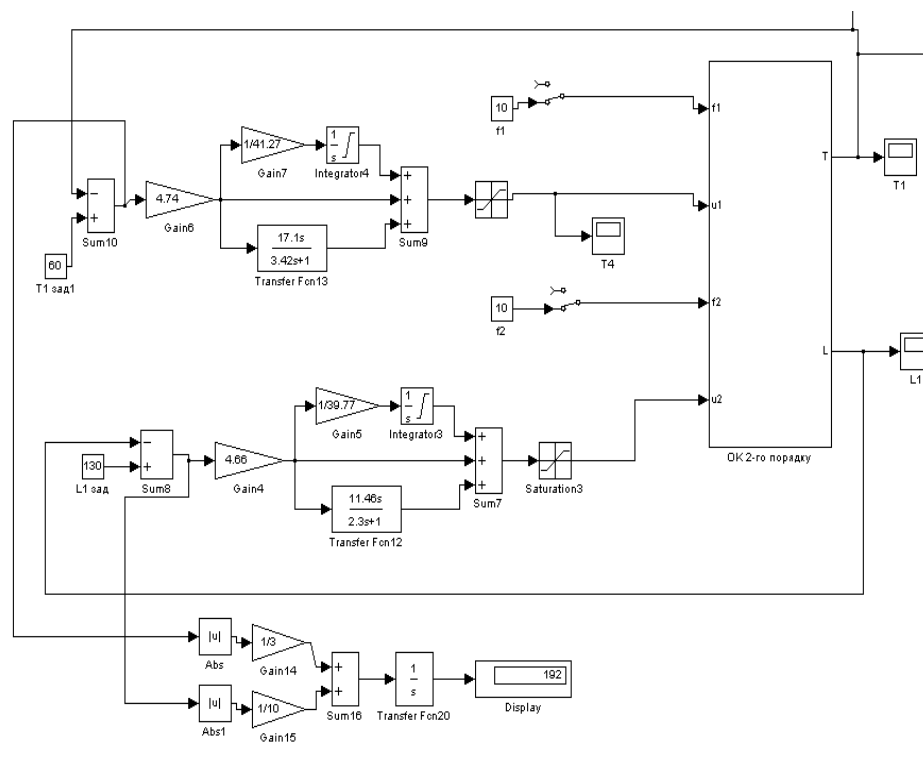


Рис. 4.3 Структурна схема моделювання САР температури та рівня води у збірнику з ПІД регуляторами.

За результатами попередньої перевірки САР з ПІД регулятором є грубою, тобто спроможною і може використовуватися для проведення порівняльного аналізу.

Замінемо у системі регулювання ПІД регулятор температури води у резервуарі на регулятори змінної структури. Схема моделювання САР з регулятором змінної структури наведена на рис. 4.4. Налаштування регуляторів змінної структури проведемо на основі моделей динаміки першого порядку. Тобто параметри моделі будуть задані як налаштовувальні параметри без проведення оптимального параметричного синтезу.

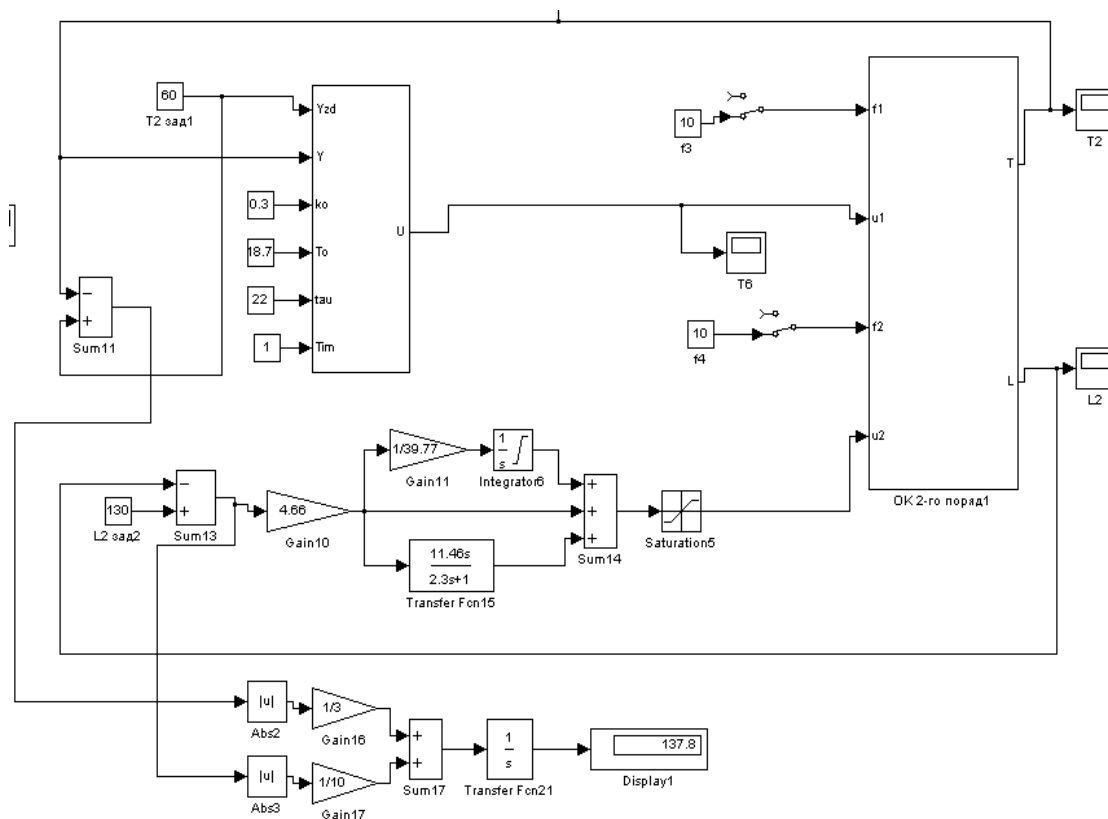


Рис. 4.4 Схема моделювання САР з регулятором змінної структури температури води у резервуарі та ПІД регулятором рівня води у резервуарі.

Регулятор змінної структури має більш складну реалізацію з декількох взаємопов'язаних підсистем. Загальний вид внутрішньої структури моделі регулятора наведено на рис. 4.5, а внутрішня структура підсистеми розрахунку керуючої дії наведено на рис. 4.6.

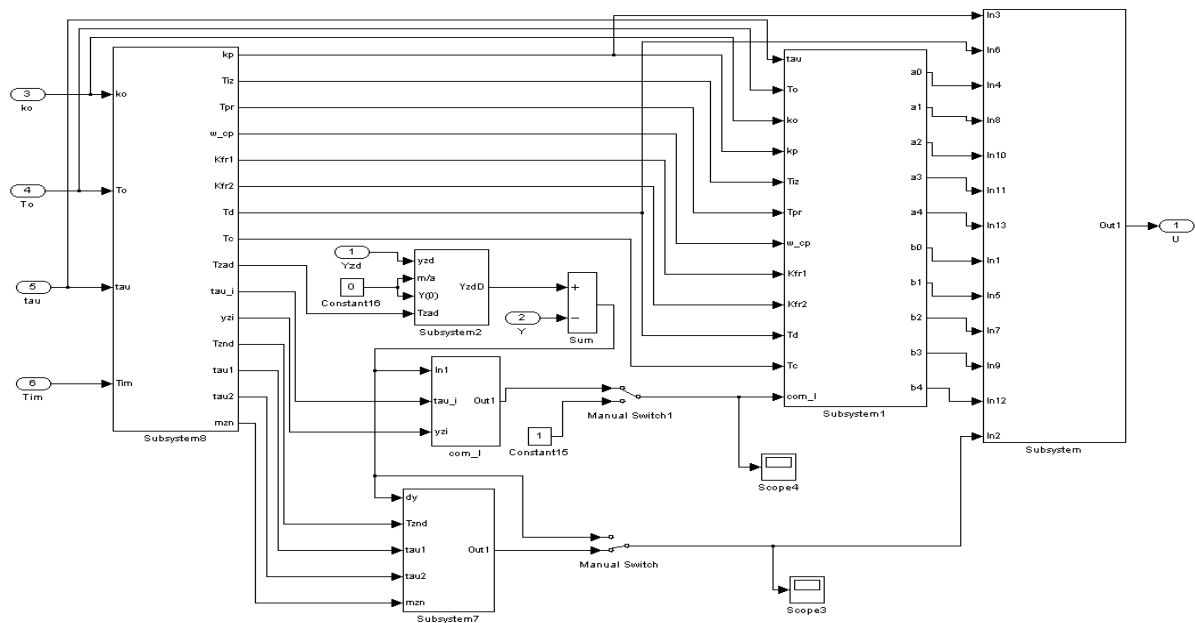


Рис. 4.5 Схема моделювання регулятора змінної структури.

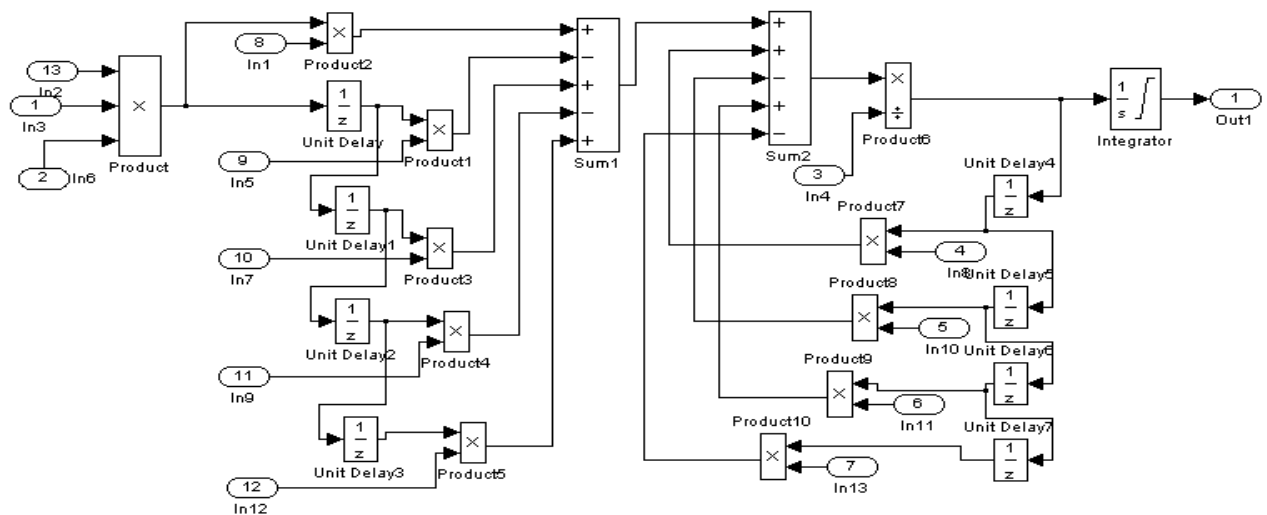


Рис. 4.6 Внутрішня структура блоку розрахунку керуючої дії регулятора змінної структури.

Дослідження роботи систем проводиться двох в перехідних режимах роботи. В ПД регуляторах встановлюємо оптимальні значення параметрів регуляторів, які отримані за результатами оптимального параметричного синтезу. В РЗС на входах задаємо параметри відповідних моделей динаміки першого порядку таких, як коефіцієнт передачі, постійну часу, час запізнення. На основі цих параметрів моделей

в регуляторі розраховуються значення внутрішніх його параметрів - коефіцієнт передачі, час ізодрому, час попередження.

Проведемо дослідження роботи отриманих систем керування в умовах дії детермінованих ступінчастих збурень за каналами дії неконтрольованих збурень. На рис. 4.7 наведено схему моделювання для проведення досліджень

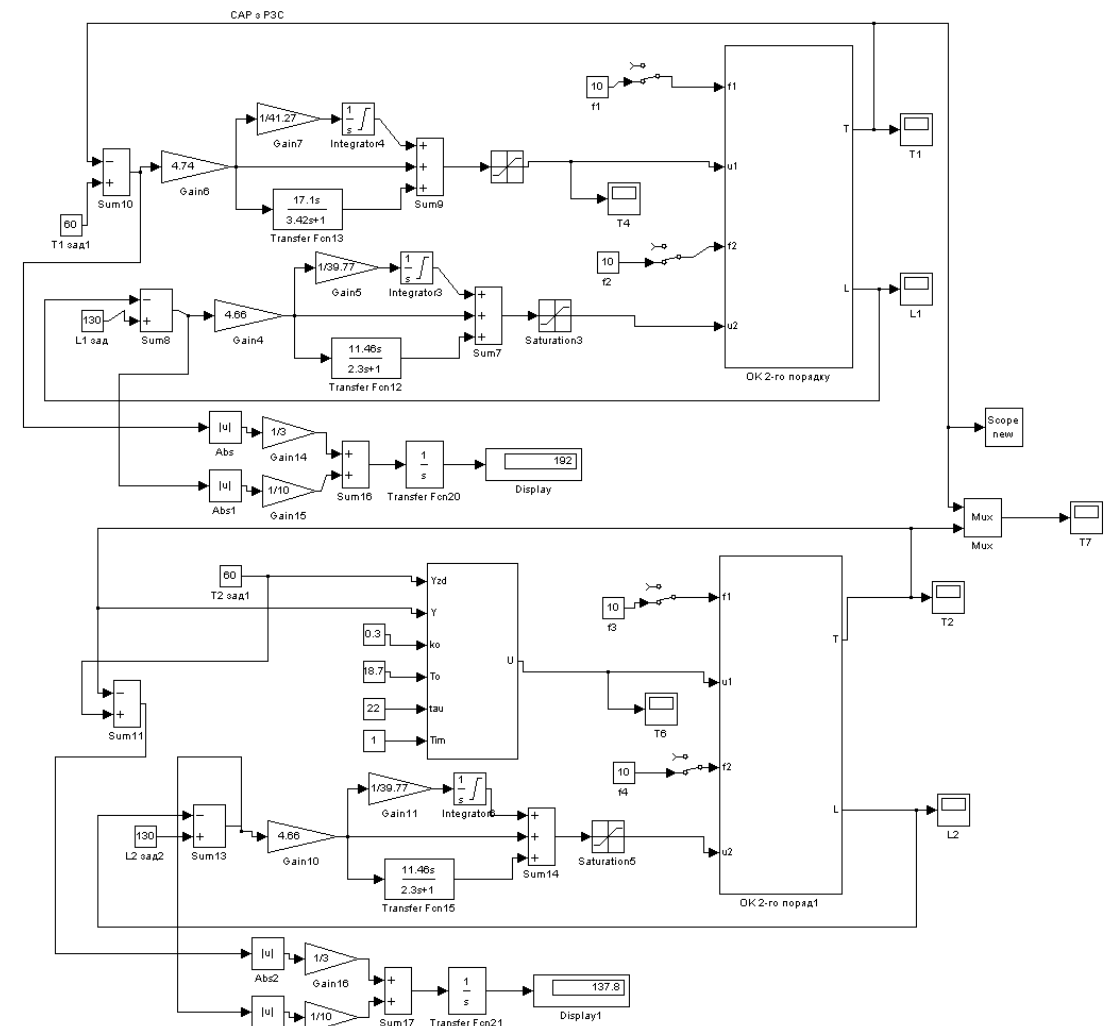


Рис. 4.7 Схема моделювання для проведення порівняльного аналізу.

На рис 3.8 наведено результати моделювання САР з ПД-регулятором та з регулятором змінної структури в перехідних режимах при дії ступінчастого збурення за каналом дії неконтрольованих збурень. Параметри моделі ОК встановлені номінальні. Перехідні характеристики САР з ПД регулятором мають синій колір, а перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури мають зелений колір.

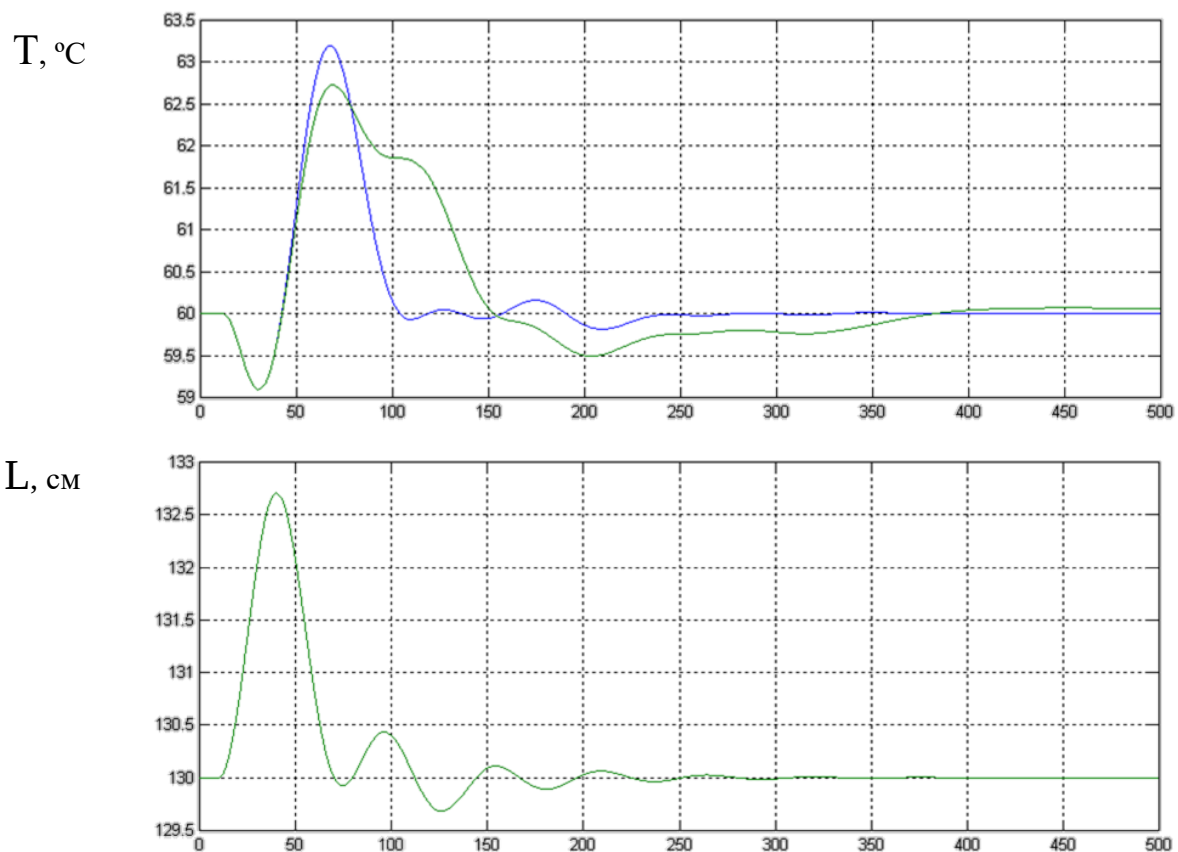


Рис. 4.8, 4.9 Перехідні характеристики САР з ПІД регулятором (синій колір) і перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури (зелений колір) при номінальних параметрах ОК.

За результатами моделювання бачимо що САР з ПІД регуляторами працює трошки краще, забезпечуючи менший час перехідного процесу. Хоча максимальне динамічне відхилення в САР з РЗС менше. При цьому критерій оптимальності має наступні значення ($I_{\text{під}} = 55,2$, $I_{\text{рзс}} = 93,7$).

Проведемо дослідження роботи систем у несприятливих умовах коли коефіцієнт передачі в каналі керування температури води можуть збільшуватися. На рис. 4.9 наведені перехідні характеристики САР при збільшенні коефіцієнта передачі в каналі керування температурою води в 1.6 рази. При цьому критерій оптимальності має наступні значення ($I_{\text{під}} = 192$, $I_{\text{рзс}} = 138$). Тобто якість роботи САР з ПІД регулятором погіршилася.

T, °C

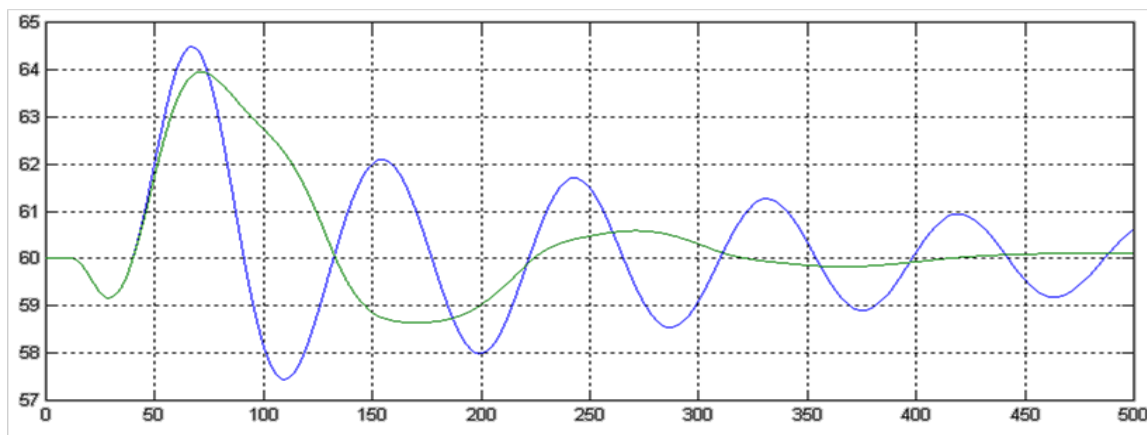


Рис.4.10 Перехідні характеристики САР з ПІД регулятором (синій колір) і перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури (зелений колір) при збільшенні коефіцієнта передачі в каналі керування температури води в 1.6 рази.

Далі розглянемо роботу систем при дії параметричних збурень у більш широкому діапазоні, тобто при зміні параметрів моделі ОК до критичних значень, коли одна з систем стає нестійкою. На рис. 4.11 наведено перехідні характеристики САР для експерименту де коефіцієнт передачі збільшено до критичних значень. Коефіцієнт передачі змінюється в каналі керування $U_1 - T$. При цьому критерій оптимальності має наступні значення ($I_{\text{під}} = 988$, $I_{\text{рзс}} = 134,8$)

T, °C

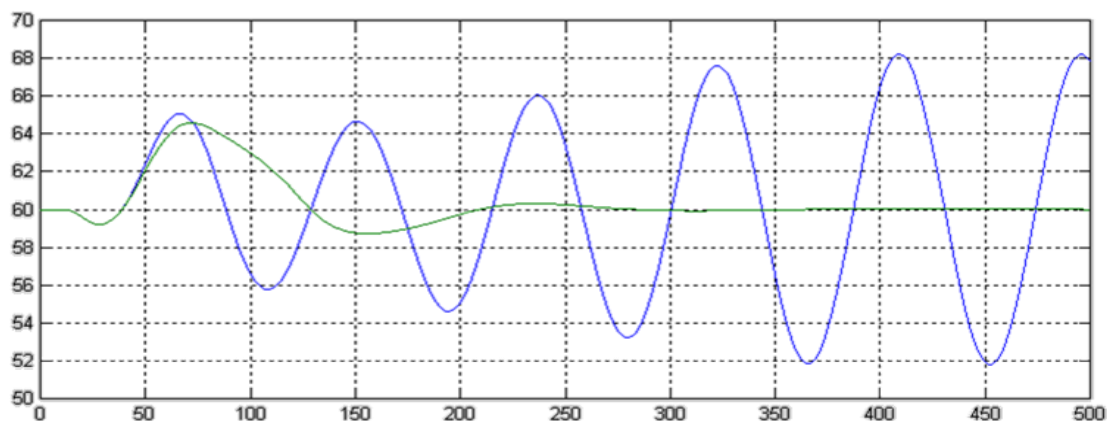


Рис.4.11 Перехідні характеристики САР з ПІД регулятором (синій колір) і перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури (зелений колір) при збільшенні коефіцієнта передачі в каналі керування температури води в 2 рази.

Провівши порівняльний аналіз роботи базових САР з ПІД регулятором та РЗС. На наступному етапі розглянемо САР яка реалізує автономність контуру регулювання температури води у резервуарі відносно контуру регулювання рівня води. Така система забезпечує більш високу динамічну точність підтримання температури на заданому рівні. На рис. 4.12 наведено схему моделювання Автономної САР.

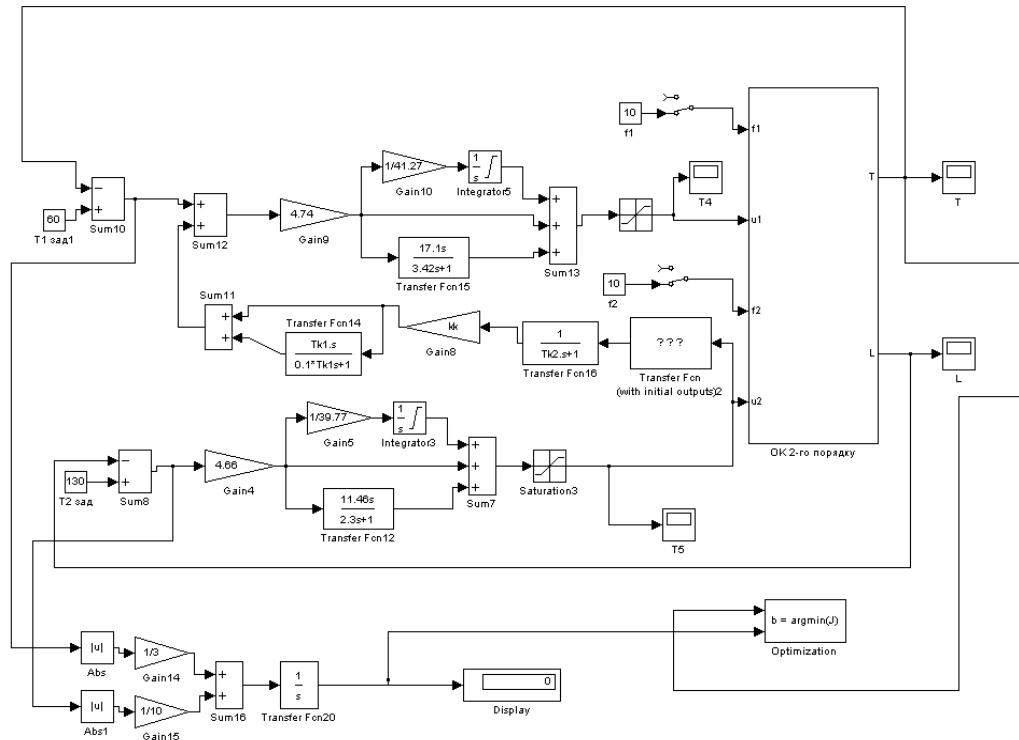
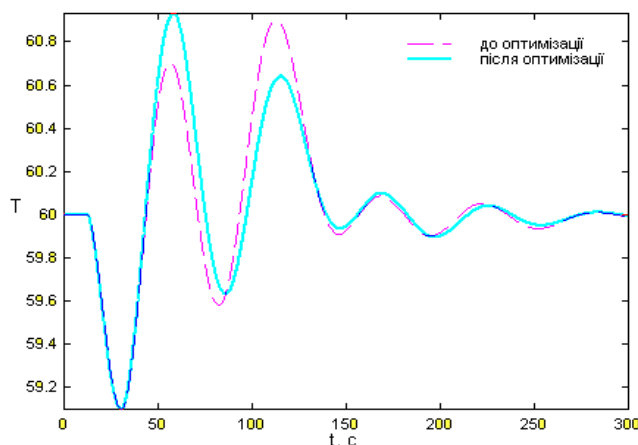


Рис. 4.12 Схема моделювання автономної САР температури води у резервуарі у якій коригуюча дія приведена до входу регулятора.

Налаштування системи проводимо використовуючи процедуру оптимального параметричного синтезу САР. Передаточна функція коригуючого зв'язку у цьому випадку не входить до власного оператора системи та не впливає на стійкість САР. Фактично керуюча дія в контурі регулювання рівня впливає на температуру, а керуюча дія в контурі регулювання температури не впливає на рівень води у резервуарі. В такому випадку можна залишати параметри регуляторів вже на знайдених раніше оптимальних значеннях, а провести оптимізацію параметрів тільки

коригуючого зв'язку. Результати оптимального параметричного синтезу параметрів коригуючого зв'язку наведено на рис. 4.13.



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
kk	0.17869	0.05	0.182907	2	до - 32.1893
Tk1	14.9962	1	18.9989	70	після - 31.2072
Tk2	22.9387	5	22.9408	150	оптимізації:
Tk3	42.5089	1	41.5271	50	Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 750
					фактична - 144

Рис. 4.13 Результати оптимального параметричного синтезу параметрів коригуючого зв'язку в автономній САР.

На рис 4.14 наведено результати моделювання САР з ПІД-регулятором та автономної САР з ПІД-регулятором в перехідних режимах при дії ступінчастого збурення за каналом дії неконтрольованих збурень. При цьому критерій оптимальності має наступні значення ($I_{\text{під}} = 54,9$, $I_{\text{авт}} = 31,2$).

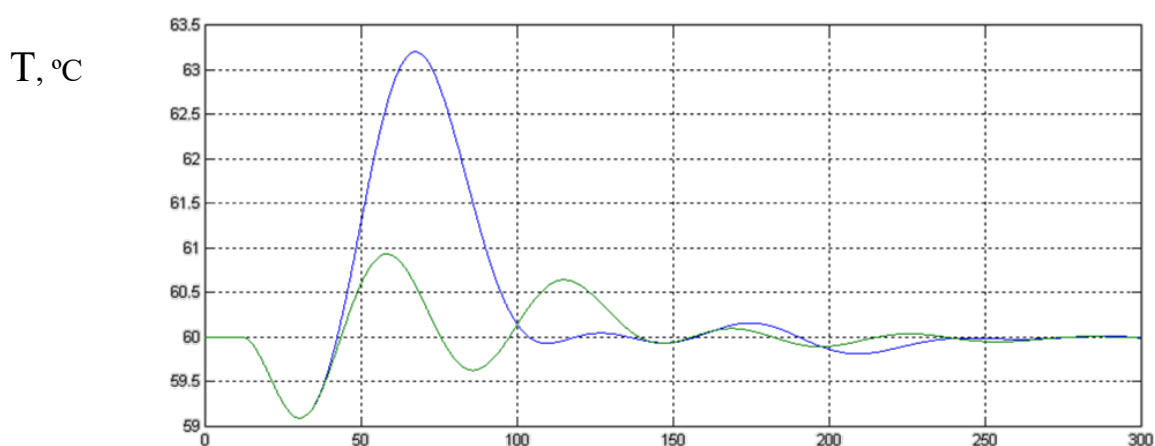


Рис. 4.14 Перехідні характеристики САР з ПІД регулятором (синій колір) і перехідні характеристики автономної САР з ПІД регулятором (зелений колір) при номінальних параметрах ОК.

Побудова автономної САР значно покращує динамічну точність САР і є актуальною для застосування.

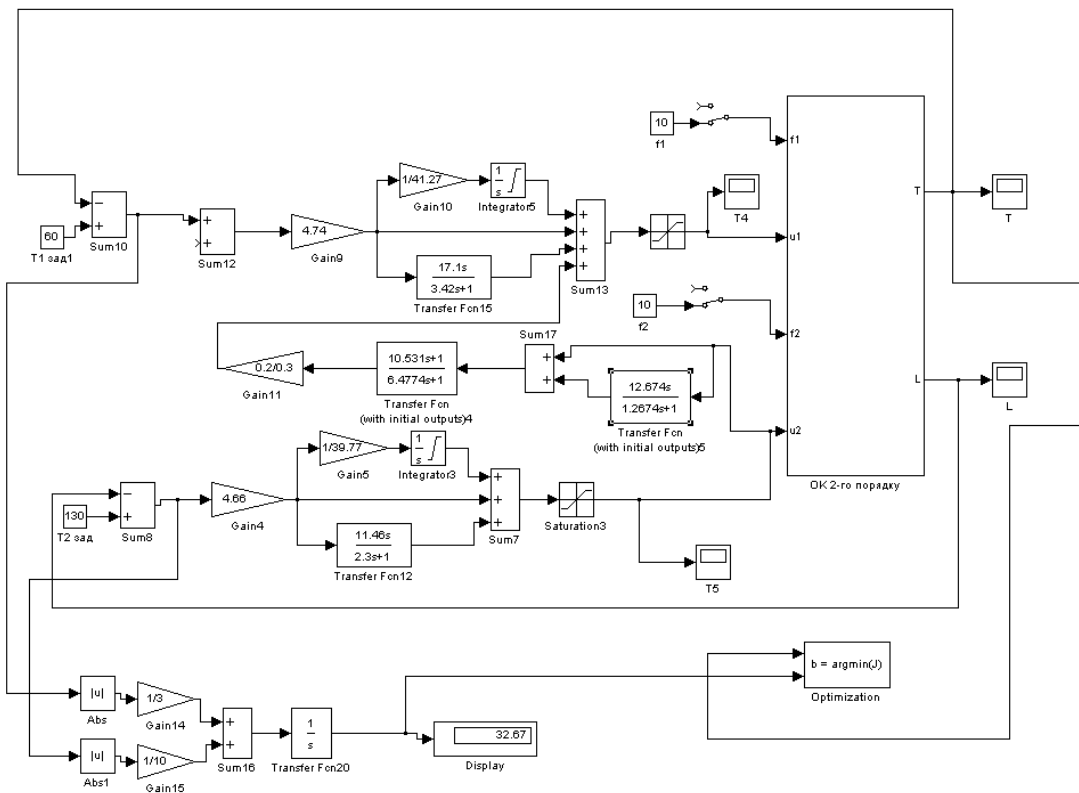


Рис. 4.15 Схема моделювання автономної САР температури води у резервуарі у якій коригуюча дія приведена до виходу регулятора.

Результати оптимального параметричного синтезу параметрів коригуючого зв'язку наведено на рис. 4.16.

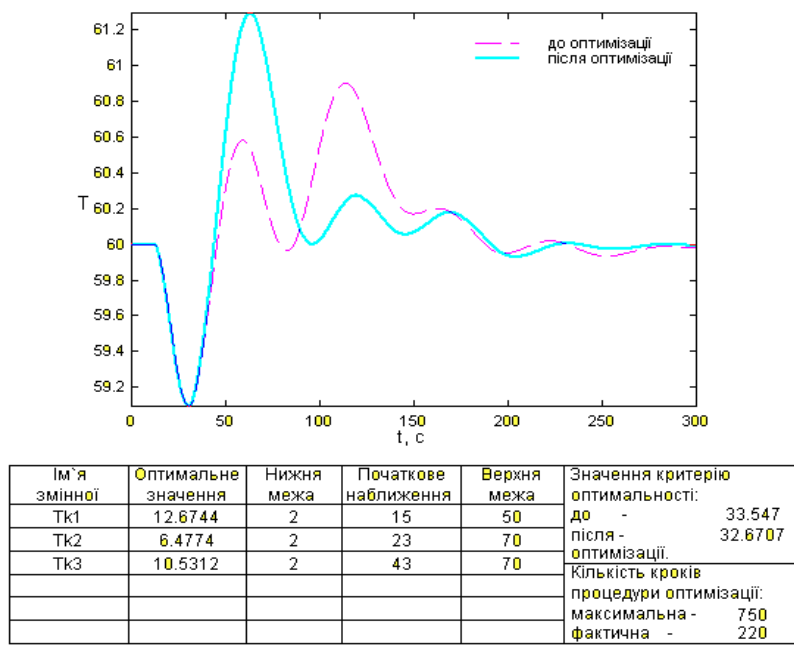


Рис. 4.16 Результати оптимального параметричного синтезу параметрів коригуючого зв'язку в автономній САР у якій коригуюча дія приведена до виходу регулятора.

На рис 4.17 наведено результати моделювання САР з ПІД-регулятором та автономної САР з ПІД-регулятором в перехідних режимах при дії ступінчастого збурення за каналом дії неконтрольованих збурень. При цьому критерій оптимальності має наступні значення ($I_{\text{під}} = 54,9$, $I_{\text{авт}} = 32,7$).

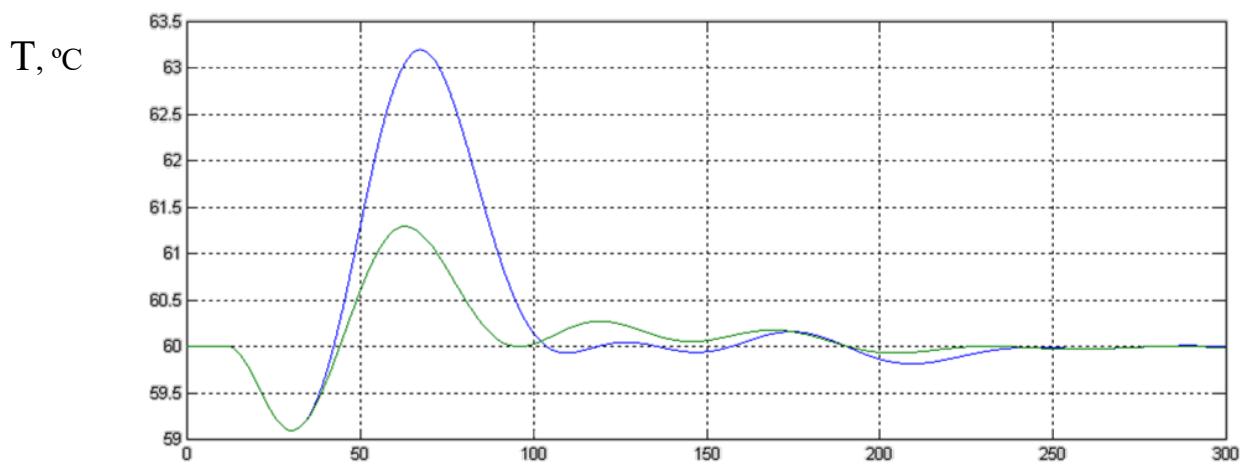


Рис. 4.17 Перехідні характеристики САР з ПІД регулятором (синій колір) і перехідні характеристики автономної САР з ПІД регулятором (зелений колір) при номінальних параметрах ОК.

Побудова автономної САР, у якій коригуюча дія приведена до виходу регулятора теж значно покращує динамічну точність САР і є актуальною для застосування. В ідеальному варіанті результати повинні майже збігатися.

Замінімо в автономній САР, у якій коригуюча дія приведена до виходу регулятора, ПІД регулятор температури на регулятор змінної структури і проведемо дослідження. Проведемо дослідження роботи отриманих систем керування в умовах дії детермінованих ступінчастих збурень за каналами дії неконтрольованих збурень. На рис. 4.18 наведено схему моделювання для проведення досліджень

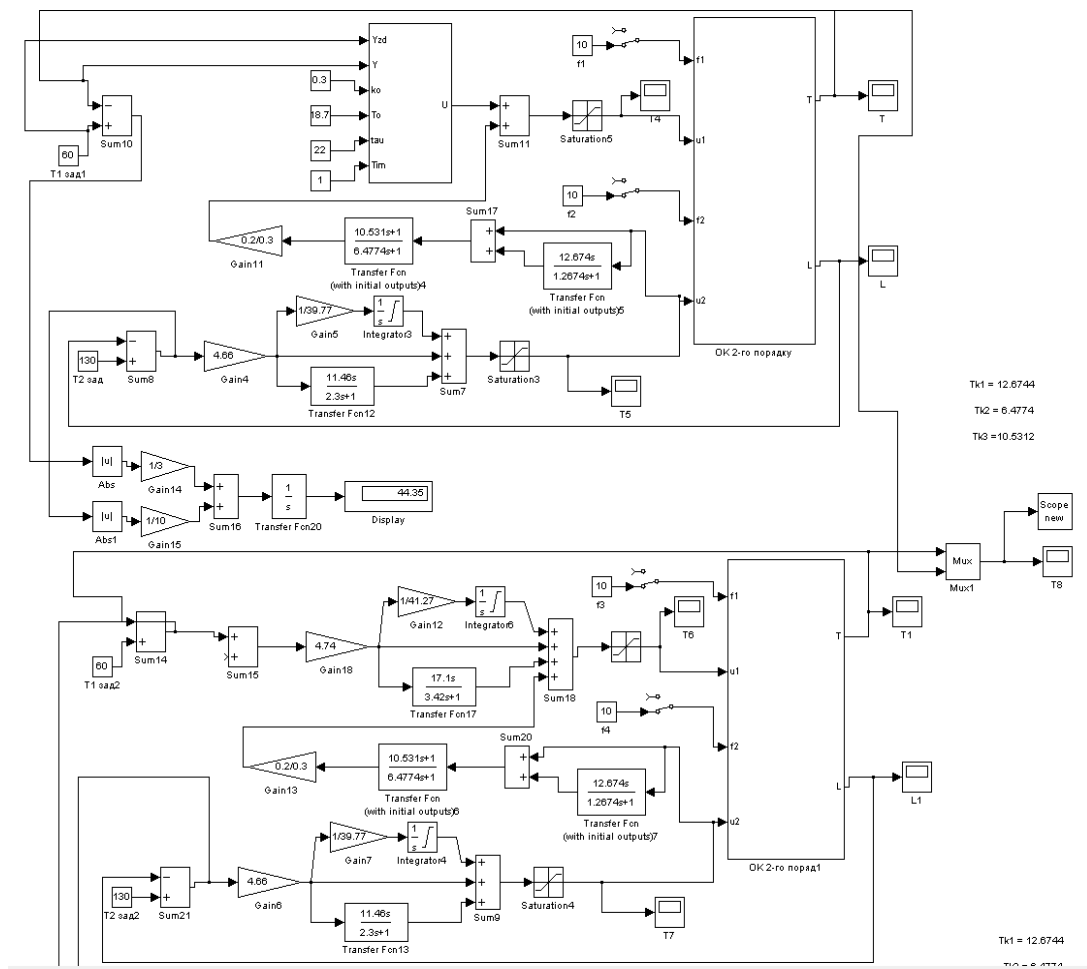


Рис. 4.18 Схема моделювання для проведення порівняльного аналізу автономних САР.

На рис 4.19 наведено результати моделювання САР з ПІД-регулятором та з регулятором змінної структури в перехідних режимах при дії ступінчастого збурення за каналом дії неконтрольованих збурень. Параметри моделі ОК встановлені

номінальні. Перехідні характеристики САР з ПІД регулятором мають синій колір, а перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури мають зелений колір.

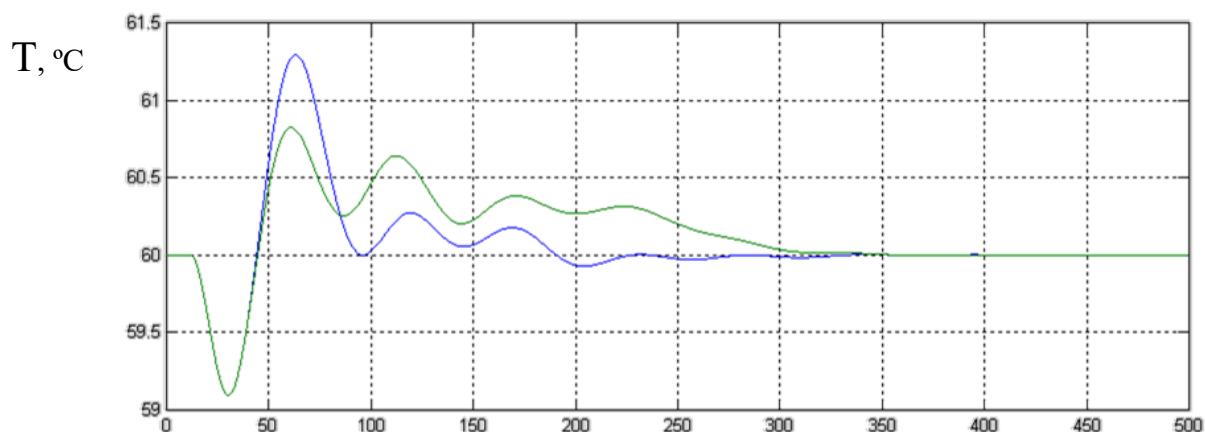


Рис. 4.19 Перехідні характеристики САР (канал регулювання температури води) з ПІД регулятором (синій колір) і перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури (зелений колір) при номінальних параметрах ОК.

За результатами моделювання бачимо що САР з ПІД регуляторами працює краще, забезпечуючи менший час перехідного процесу. Хоча максимальне динамічне відхилення в САР з РЗС менше. При цьому критерій оптимальності має наступні значення ($I_{\text{під}} = 32,9$, $I_{\text{рзс}} = 44,4$).

Проведемо дослідження роботи систем у несприятливих умовах коли коефіцієнт передачі в каналі керування температури води можуть збільшуватися. На рис. 4.20 наведені перехідні характеристики САР при збільшенні коефіцієнта передачі в каналі керування температурою води в 1.6 рази. При цьому критерій оптимальності має наступні значення ($I_{\text{під}} = 52$, $I_{\text{рзс}} = 51,9$). Тобто якість роботи САР з ПІД регулятором погіршилася більше ніж з РЗС.

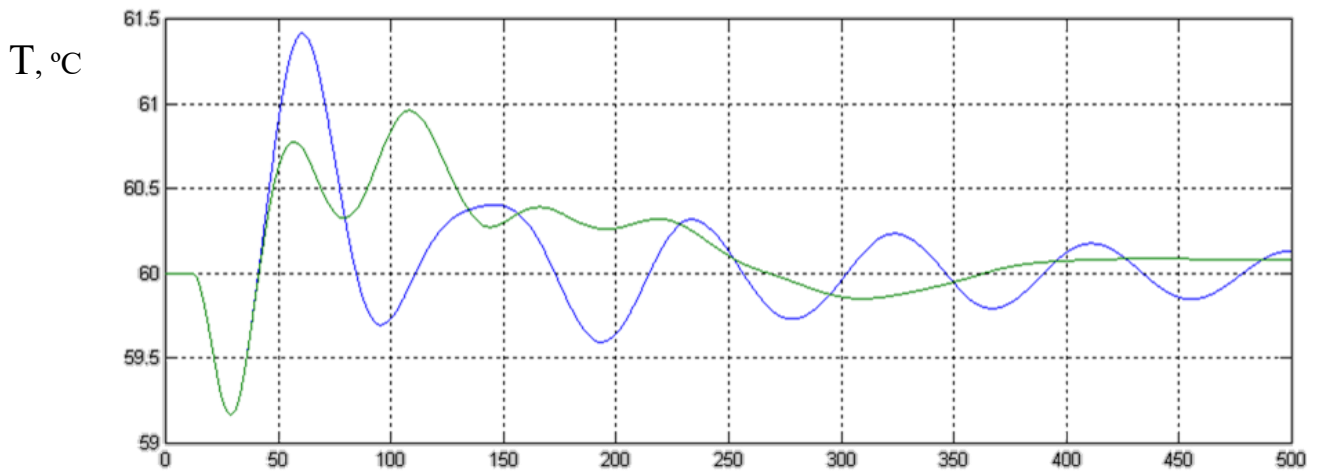


Рис. 4.20 Перехідні характеристики автономної САР з ПД регулятором (синій колір) і перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури (зелений колір) при збільшенні коефіцієнта передачі в каналі керування температури води в 1.6 рази.

Далі розглянемо роботу автономної систем при дії параметричних збурень у більш широкому діапазоні, тобто при зміні параметрів моделі ОК до критичних значень, коли одна з систем стає нестійкою. На рис. 4.21 наведено перехідні характеристики автономної САР для експерименту де коефіцієнт передачі збільшено до критичних значень. При цьому критерій оптимальності має наступні значення ($I_{\text{під}} = 136$, $I_{\text{рзс}} = 61,6$)

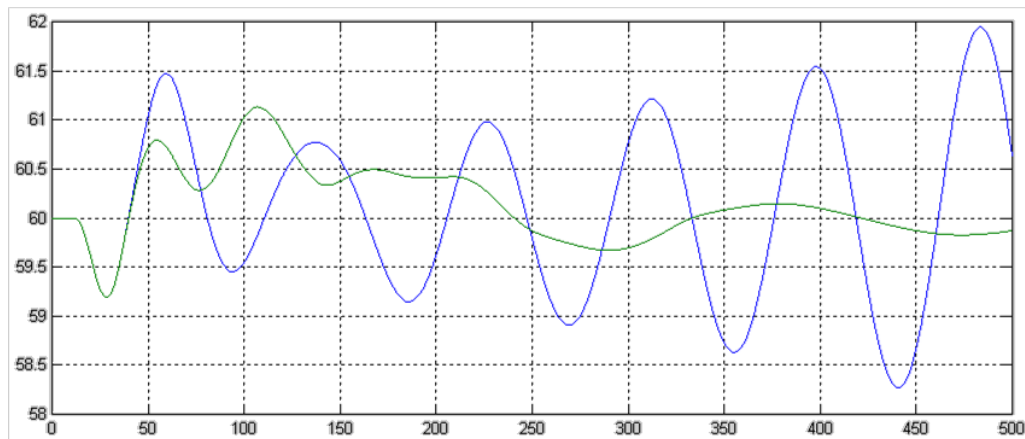


Рис. 4.21 Перехідні характеристики автономної САР з ПД регулятором (синій колір) і перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури (зелений колір) при збільшенні коефіцієнта передачі в каналі керування температури води в 2 рази.

4.6 Висновки за розділом

За результатами експериментів можна зробити висновок, що САР з лінійним ПД – регулятором при дії інтенсивних параметричних збурень може становитися нестійкою, САР з регулятором зі змінною структурою залишається стійкою при усіх варіантах експериментів. А також ефективним є поєднання побудови автономної САР з регулятором змінної структури. Отже - САР із регулятором зі змінною структурою має більший запас стійкості і в умовах зміни параметрів ОК може забезпечувати більш високу динамічну точність за каналом регулювання температури води у резервуарі. Також регулятор зі змінною структурою може краще підійти для керування об'єктами з високим рівнем невизначеності початкових значень їх параметрів. Коли номінальні параметри моделі ОК визначені приблизно.

Загалом за результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що система керування з регулятором змінної структури має більший запас стійкості ніж звичайна САР з ПД регулятором і при дії параметричних збурень забезпечує високу динамічну точність в порівнянні з САР з типовим ПД регулятором, особливо в умовах, коли параметри ОК (коефіцієнт передачі) є найбільш несприятливими для керування. Все це робить актуальним застосування в контурі регулювання температури при підігріві води спеціального регулятора змінної структури.

РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ НА ПІДПРИЄМСТВІ «ТОВ ТЕПЛОЕНЕРГОНАЛАДКА»

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

Систему керування процесом підігріву води розроблено на базі розподіленої системи WAGO I/O. Для реалізації алгоритмів управління в модулях ПЗО контролера передбачені 2- аналогових входів, 2-аналогових виходи, 10-дискретних входів і 4-дискретних виходів.

Для реалізації алгоритмів керування використовується контролер WAGO PFC200 750-8212 з модулями ПЗО: AI WAGO 750-455, AO WAGO 750-559, DI WAGO 750-1400 та DO WAGO 750-1504. Центральний процесор WAGO PFC200 750-8212 характеризується наступними показниками: мікропроцесор Cortex A8 1 ГГц, програмна сумісність з WAGO-I/OPRO V2.3 та з CODESYS V3.5, годинник реального часу, Основна пам'ять (RAM) 512 Мб, Внутрішня пам'ять (флеш) 4096 Мб, інтегрований Web-інтерфейс. Загальний вид контролера та схема його підключення наведені на рис.5.1.

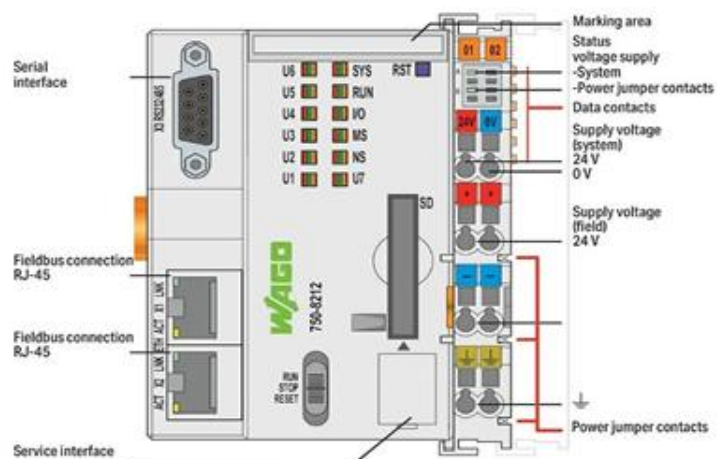


Рис. 5.1 Загальний вигляд контролера WAGO 750-8212.

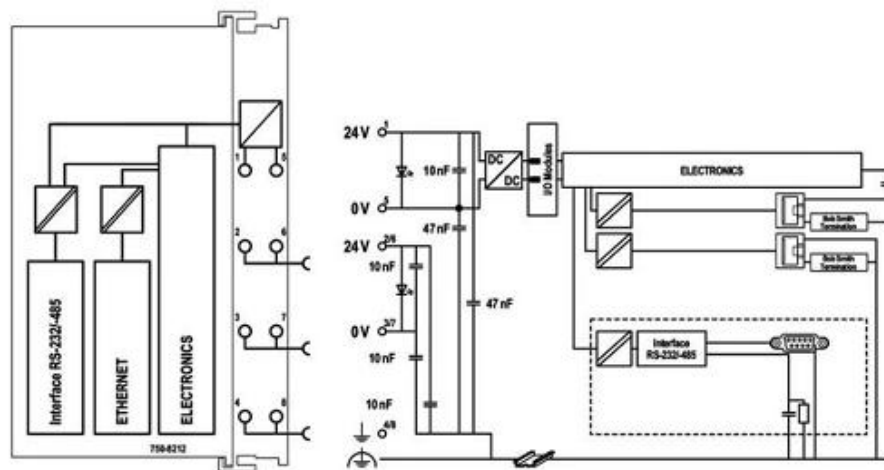


Рис. 5.2 Схема підключення контролера WAGO 750-8212.

Для введення аналогових сигналів у контролер використовується 4 каналний модуль аналогового введення WAGO 750-455 (рис. 5.3).

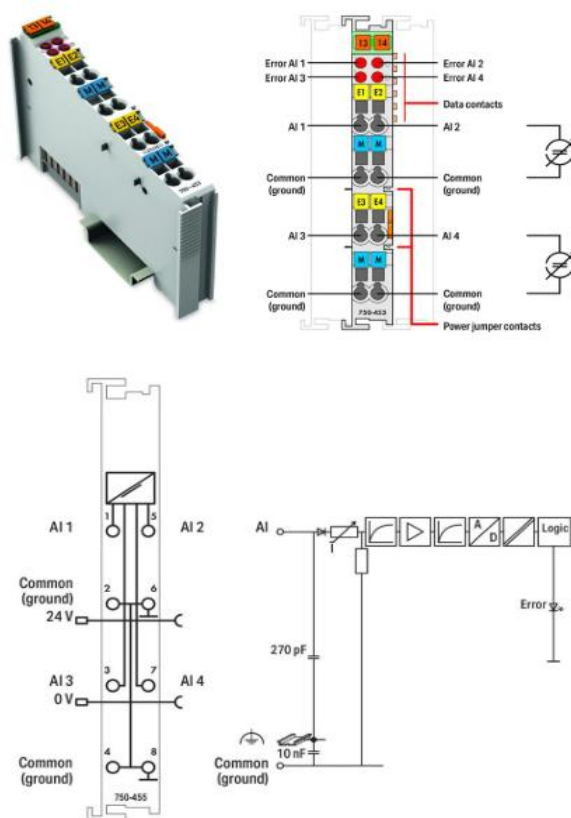


Рис. 5.3 Загальний вигляд та схема підключення модуля ПЗО WAGO 750-455.

Модуль аналогового введення обробляє сигнали зі стандартизованим розміром 4 ... 20 мА. Вхідний сигнал гальванічно відокремлений від системної шини та обробляється з роздільною здатністю 12 біт. Для живлення використовується напруга внутрішньої системної шини. Вхідні канали модуля мають спільний потенціал заземлення.

Для виведення аналогових сигналів з контролера (формування аналогових керуючих дій) використовується 4-канальний модуль аналогового виводу WAGO 750-559 (рис. 5.4). Цей аналоговий вихідний модуль генерує стандартні сигнали 0–10 В. Вихідний сигнал електрично ізольований і передається з роздільною здатністю 12 біт. Живлення модуля здійснюється від внутрішнього джерела живлення. Вихідні канали модуля мають спільний потенціал заземлення.

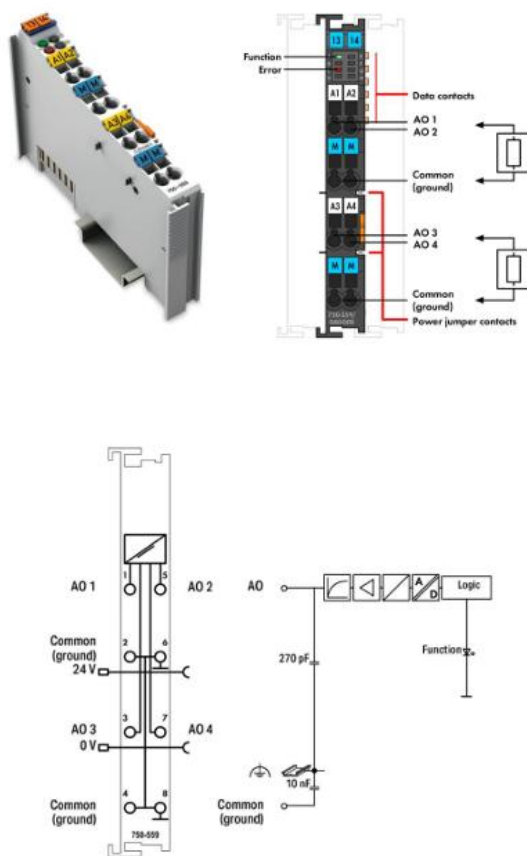


Рис. 5.4 Загальний вигляд та схема підключення модуля ПЗО WAGO 750-559.

Для вводу дискретних сигналів до контролера використовуються два 16-канальних модулі дискретного вводу WAGO 750-1400 (рис. 5.5). Цей цифровий

вхідний модуль має 16 каналів завширшки всього 12 мм (0,47 дюйма). Він отримує двійкові сигнали керування від цифрових польових пристроїв (наприклад, датчиків, кодерів, перемикачів або датчиків наближення). Модуль підключається до електронних модулів за допомогою 20-контактного стрічкового кабелю. Напруга 24 В подається на електронні модулі через два роз'єми CAGE CLAMP. Кожен вхідний канал має RC-фільтр шумозаглушення з постійною часу 3,0 мс. Зелений світлодіод вказує на стан сигналу кожного каналу. Польовий і системний рівні електрично ізольовані.

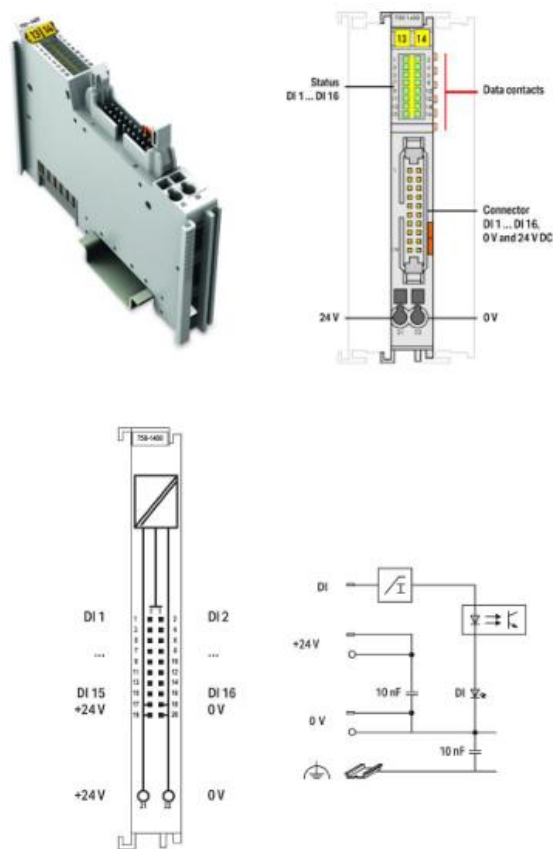


Рис. 5.5 Загальний вигляд та схема підключення модуля ПЗО WAGO 750-1400

Для виводу дискретних сигналів з контролеру будемо використовувати 16 канальний модуль дискретного виводу WAGO 750-1504 (рис. 5.6). Цей цифровий вихідний модуль має 16 каналів шириною всього 12 мм (0,47 дюйма). Він передає двійкові керуючі сигнали від пристрою автоматизації до підключених виконавчих механізмів (наприклад, магнітних клапанів, контакторів, передавачів, реле або інших

електричних навантажень). Модуль має з'єднання Push-in CAGE CLAMP ® , що дозволяє підключати суцільні провідники, просто просуваючи їх. Зелений світлодіод вказує на стан сигналу кожного каналу.

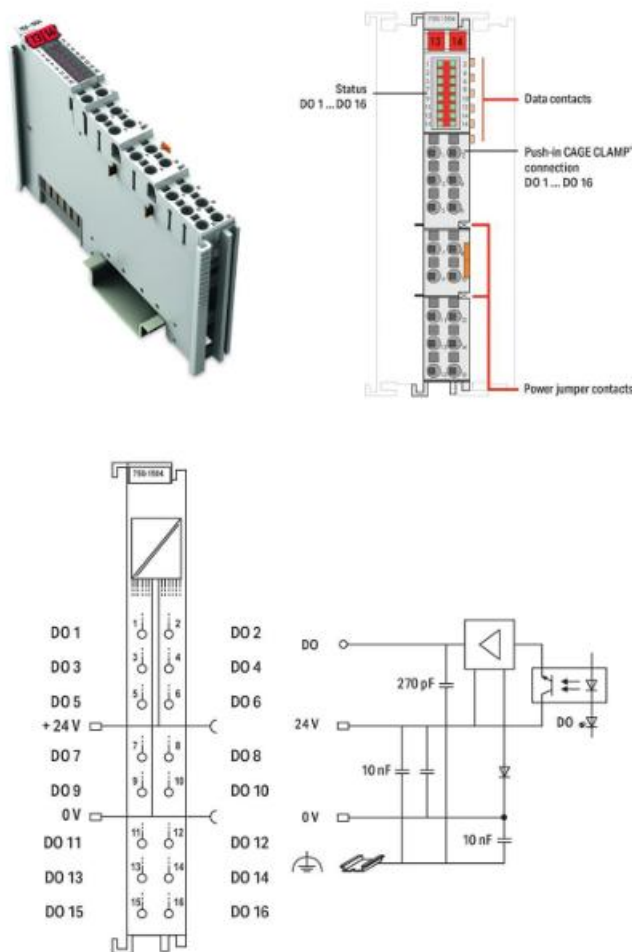


Рис. 5.6 Загальний вигляд та схема підключення модуля ПЗО WAGO 750-1504.

Додатково нам знадобиться кінцевий модуль шини 750-600. Зв'язок контролера з комп'ютером здійснюється за допомогою інтерфейсу Ethernet.

Враховуючи обраний контролер, модулі ПЗО до нього, та список змінних, які необхідно вводити та виводити з контролеру схема технічною структури мікропроцесорного ядра системи автоматичного керування прийме вигляд на рис. 5.7.

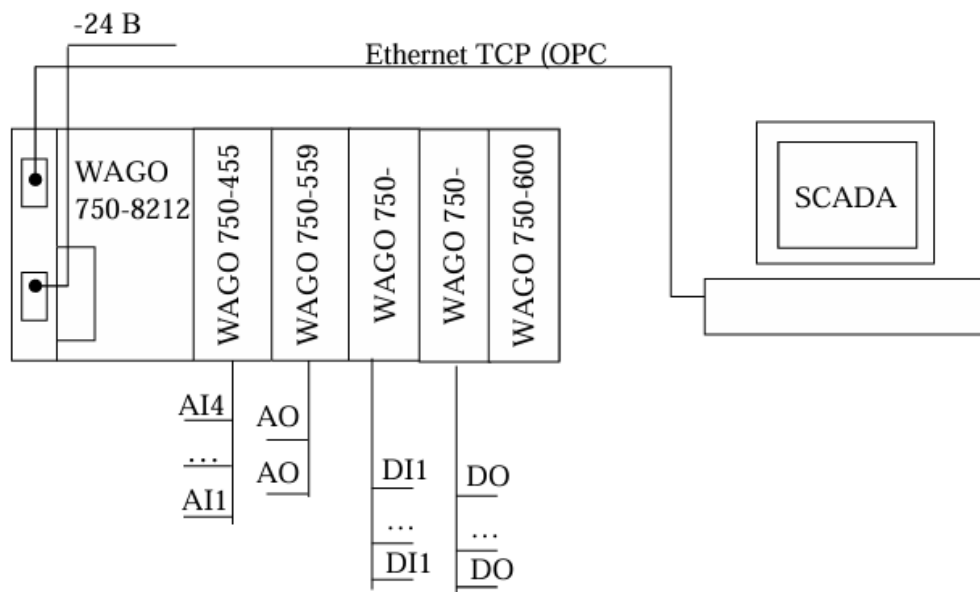


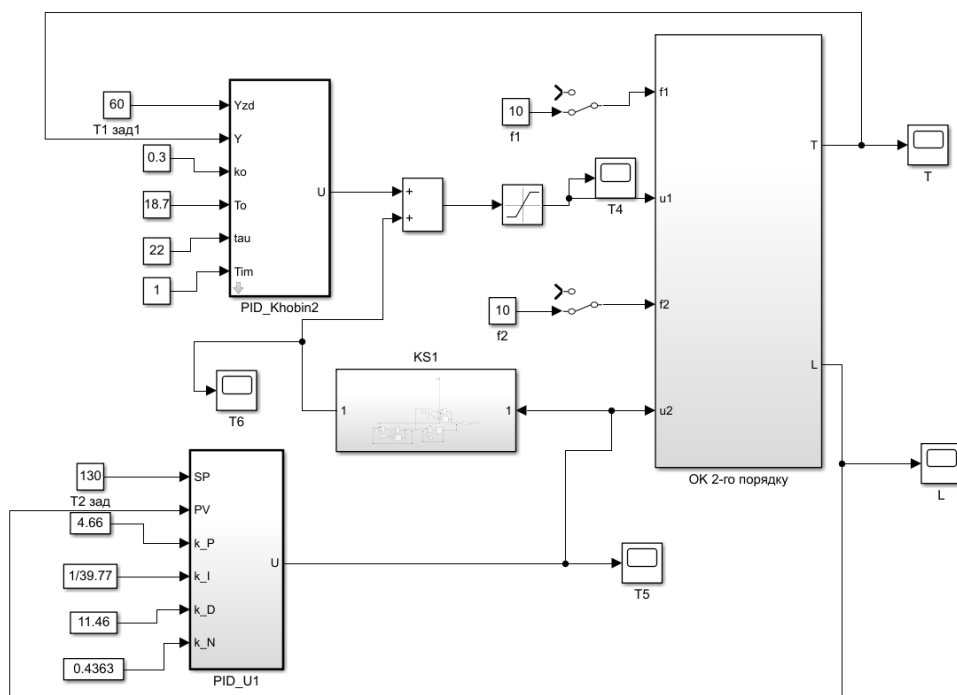
Рис. 5.7 Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом підігріву води.

Існуюча система керування процесом підігріву води була доповнена функцією регулювання з алгоритмом зі змінною структурою який забезпечує підвищення динамічної точності регулювання в умовах дії параметричних збурень. Також САР була доповнена алгоритмами на основі нейронних мереж. Інтегровані алгоритми не потребують істотного збільшення обчислюваних ресурсів. Існуюча система не потребує технічних доповнень та реалізації додаткових каналів вимірювання.

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

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені складні алгоритми керування процесом підігріву води може розроблятися безпосередньо у середовищі Simatic Step 7 з використанням стандартних мов програмування контролерів. Наприклад мовами STL та SCL. Для цього потрібно розроблені у системі Simulink алгоритми керування перевести у цифрову форму та вид придатний для програмування (наприклад різнищеві рівняння у рекурентній формі), а потім написати

відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загальні такий підхід потребує багато часу. Альтернативою цьому є варіант прямої конвертації отриманих алгоритмів з системи Simulink у середу програмування контролерів Simatic Step 7. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.



Регулятор змінної структури має складну реалізацію з декількох взаємопов'язаних підсистем. Загальний вид внутрішньої структури моделі

регулятору який підготовлено до конвертації наведено на рис. 5.9, а внутрішня структура підсистеми розрахунку керуючої дії, комутації інтегральної складової, динамічної зони нечутливості наведено на рис.5.10-5.12. В кожній підсистемі виконано цифрову реалізацію алгоритмів з використанням дискретних динамічних ланок з бібліотеки PLCLib. Це є запорукою відсутності помилок при конвертації.

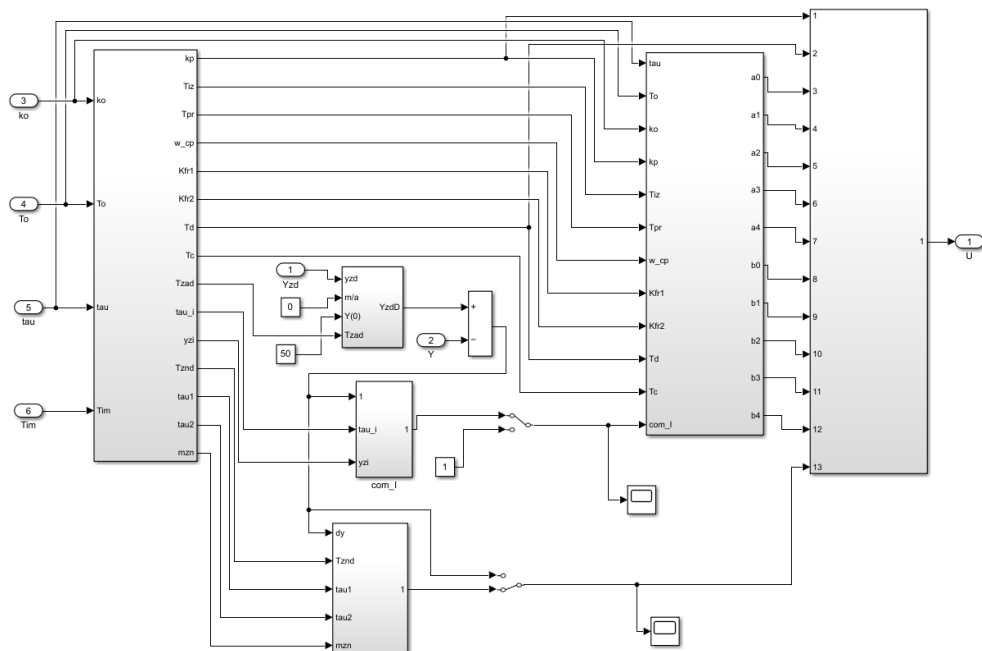


Рис. 5.9 Загальна схема цифрового ПІД-регулятора змінної структури.

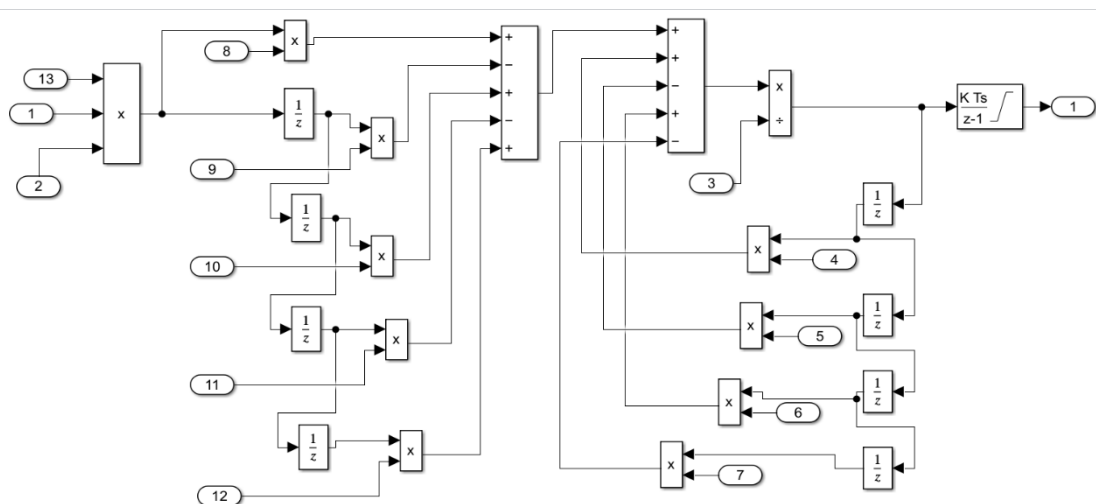


Рис. 5.10 Внутрішня структура цифрового варіанту блоку розрахунку керуючої дії регулятора змінної структури.

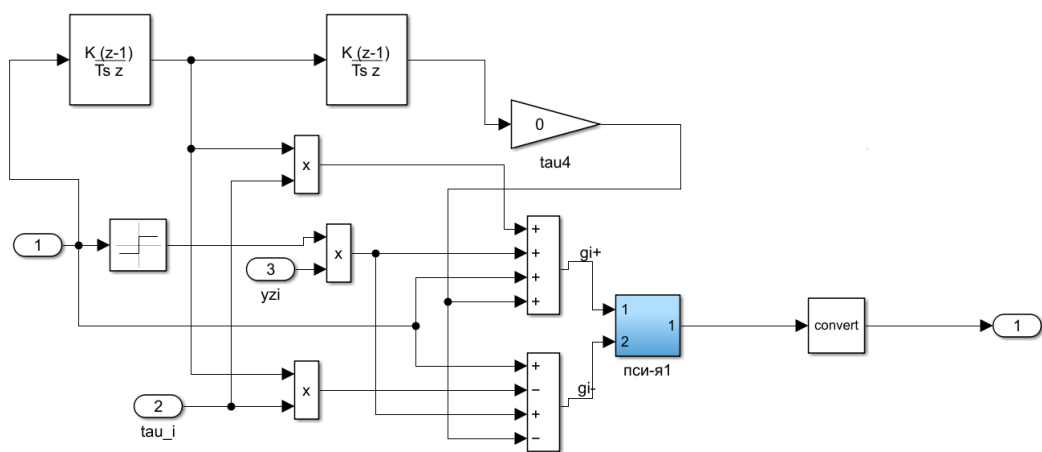


Рис. 5.11 Внутрішня структура цифрового варіанту блоку комутації інтегральної складової регулятора змінної структури.

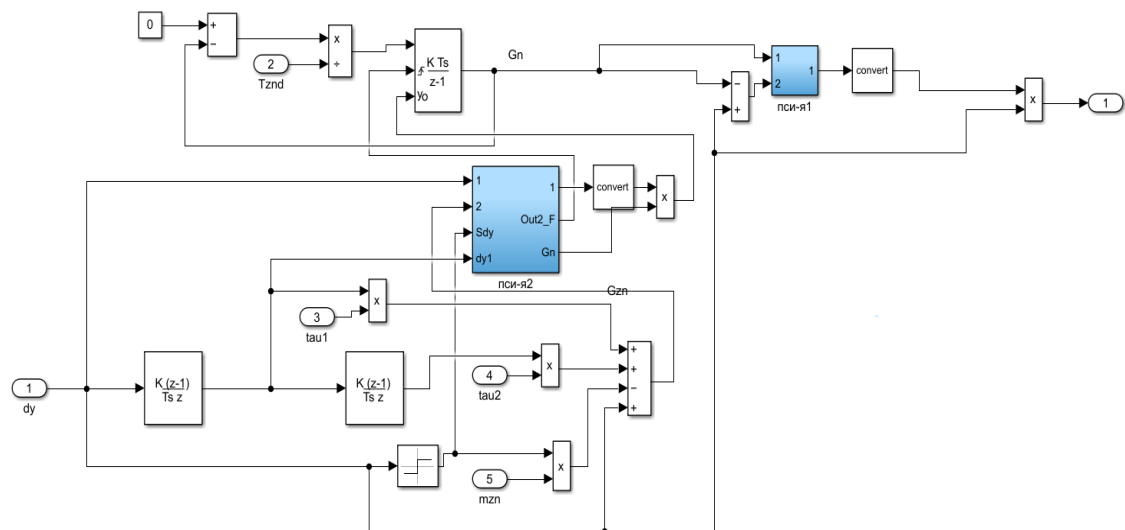


Рис. 5.12 Внутрішня структура цифрового варіанту блоку динамічної зони нечутливості регулятора змінної структури.

Коригуючий зв'язок між регуляторами рівня води та температури води приведений до цифрового вигляду. На рис. 5.13 наведена схема моделювання для оцінювання результатів роботи цифрового та неперервного варіантів коригуючого зв'язку. На рис. 5.14 та 5.15 наведено внутрішню структуру цифрового варіанта коригуючого зв'язку та результати моделювання, за якими видно що відмінності між цифровим та неперервним варіантами майже немає.

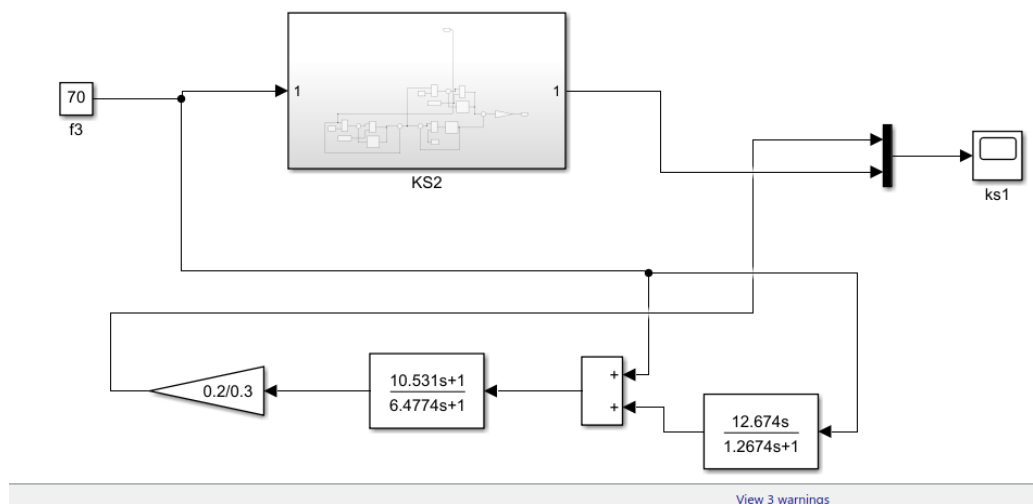


Рис. 5.13 Схема моделювання для оцінювання результатів роботи цифрового та неперервного варіантів коригуючого зв'язку.

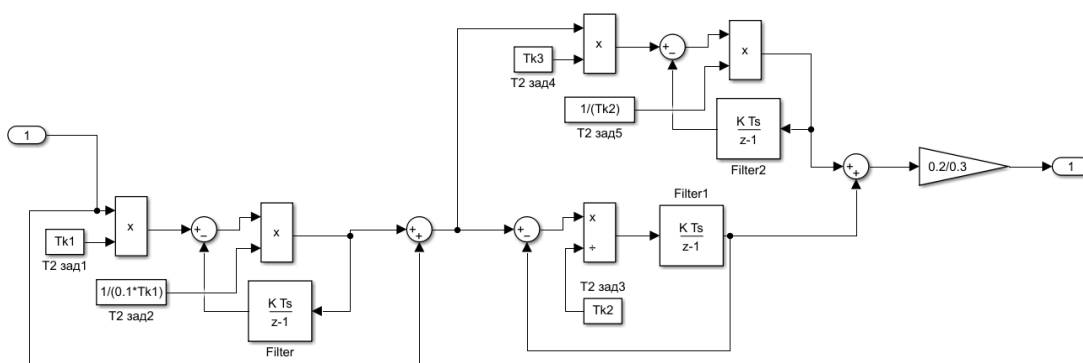


Рис. 5.14 Внутрішня структура цифрового варіанта коригуючого зв'язку.

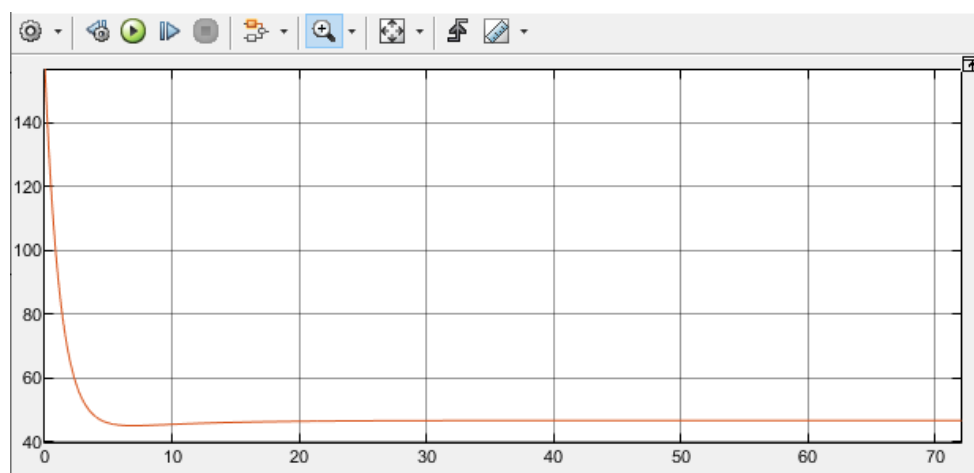


Рис. 5.15. Результати роботи цифрового та неперервного варіантів коригуючого зв'язку.

Результати моделювання системи керування при використанні цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис.5.16. Вони повністю відповідають попереднім результатам і підтверджують правильність цифрової реалізації алгоритмів регулювання при підготовці до конвертування.

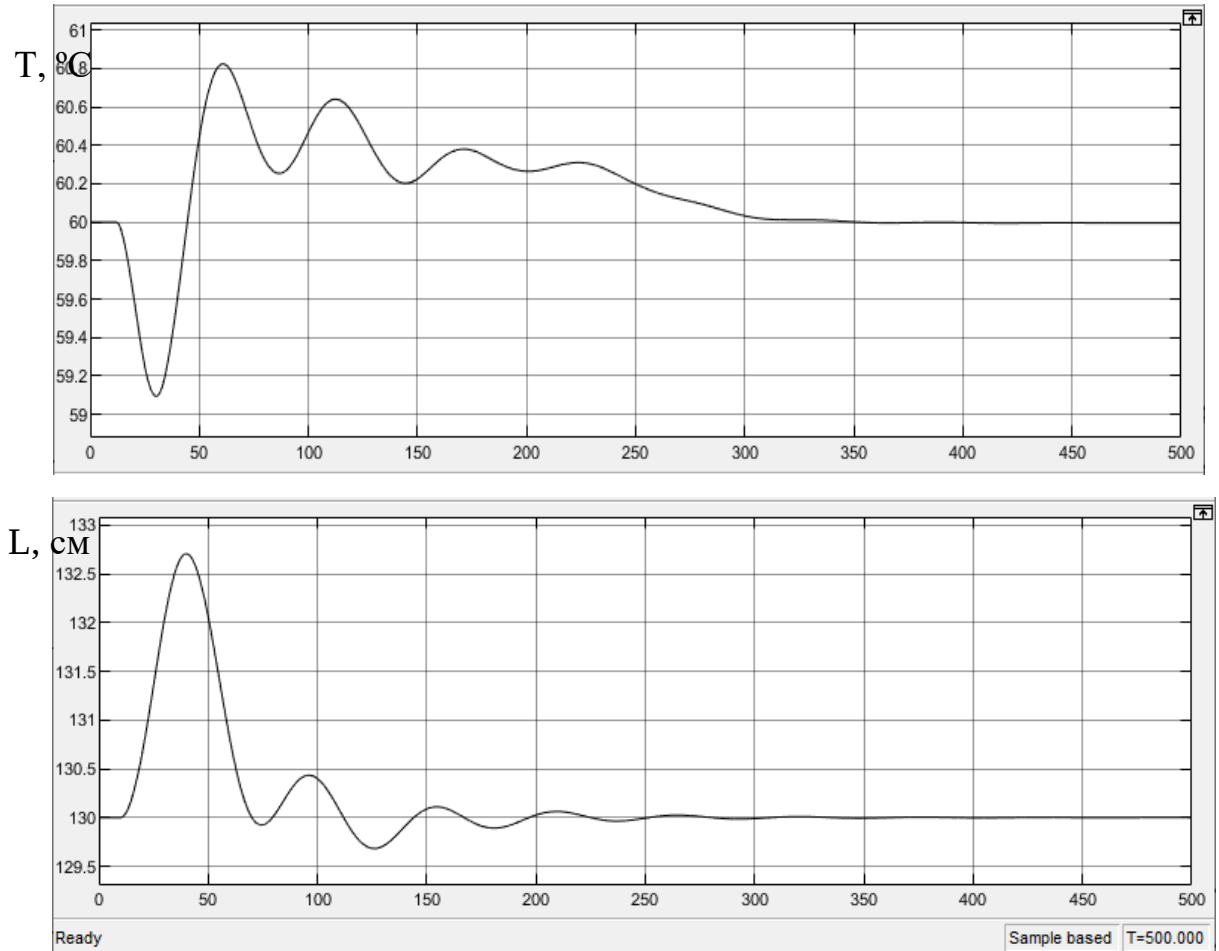


Рис. 5.16 Перехідні характеристики САР з регулятором змінної структури алгоритми якого підготовлені до конвертації при номінальних параметрах ОК.

Для кожної підсистеми яка буде конвертуватися у мову SCL середовища Step 7 проведемо налаштування рис 5.17.

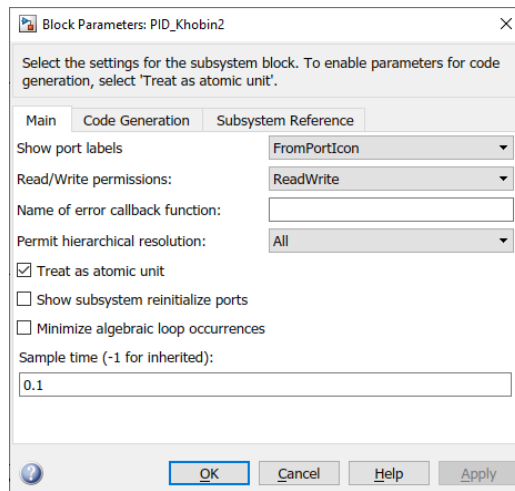


Рис. 5.17 Вікно налаштування підсистем для їх конвертації.

Пакет Simulink PLC Coder налаштуємо для компіляції коду для середовища 3S CoDeSys 3.5 (рис. 5.18).

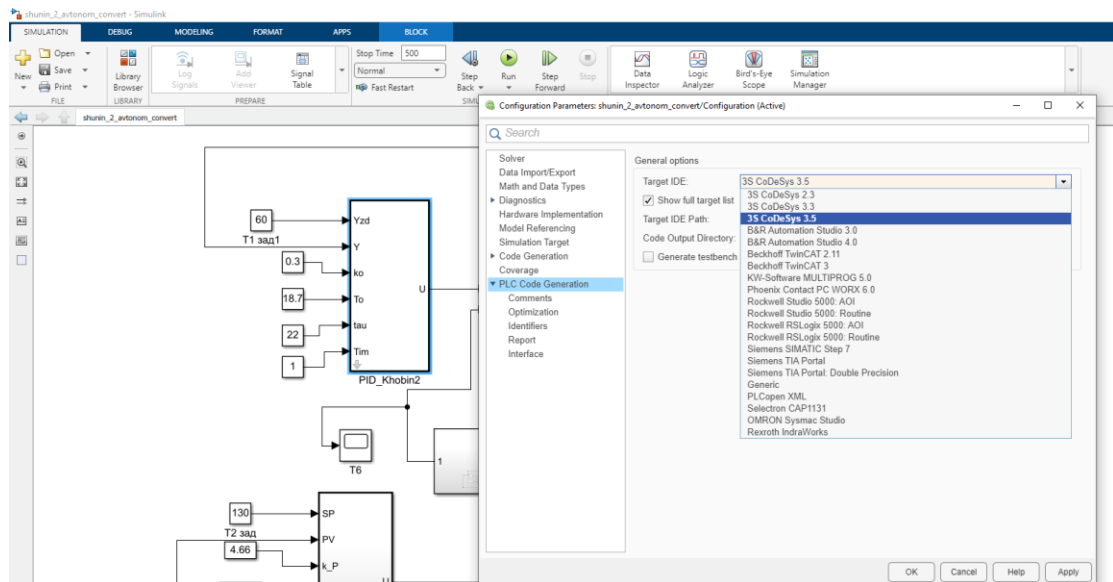


Рис. 5.18. Вікно налаштування пакету Simulink PLC Coder.

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для блоку ПІД регулятора та блоків коригуючих зв'язку та задатчика. На рис. 5.19 та 5.20 наведена процедура генерації коду для ПІД регулятора.

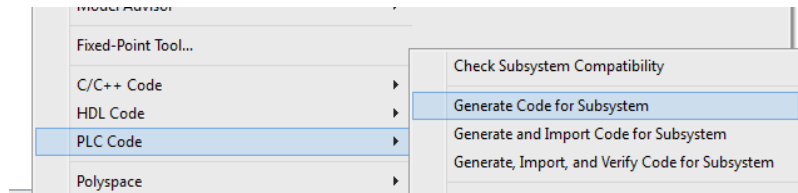


Рис 5.19 Компіляція коду.

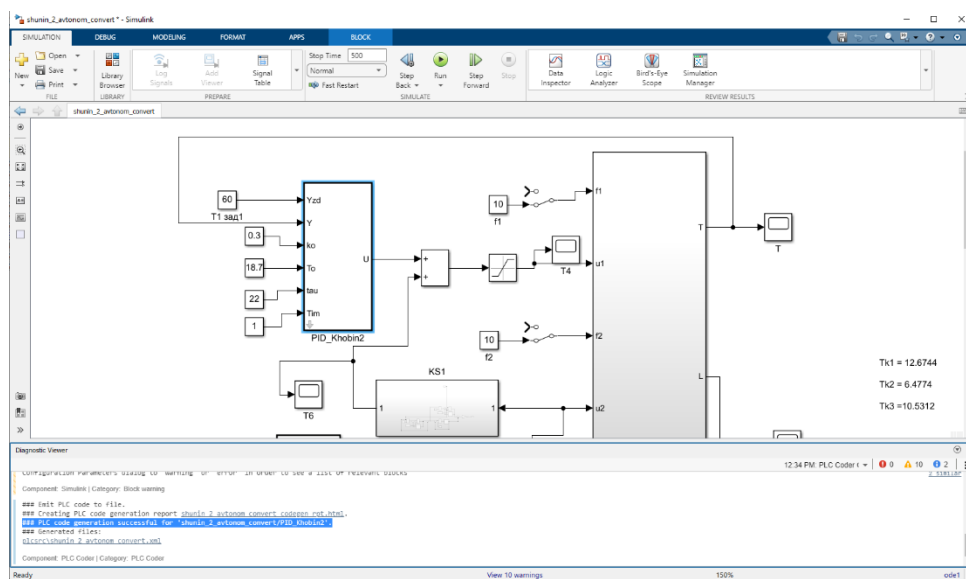


Рис. 5.20 Результати успішної генерації коду ПІД-регулятора змінної структури для середовища 3S CoDeSys 3.5.

```

301 shunin_2_autonom_convert.xml
302 <body>
303 <ST>
304 <xhtml xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml"><![CDATA[
305 CASE ssMethodType OF
306 SS_INITIALIZE:
307 (* ConstCode for Atomic SubSystem: 'cRoot/PID_Khobin2' *)
308 (* ConstCode for Constant: 'cS1/Constant1' *)
309 Constant1 := 60.0;
310 (* End of ConstCode for SubSystem: 'cRoot/PID_Khobin2' *)
311 (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: 'cRoot/PID_Khobin2' *)
312 (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: 'cS4/Discrete-Time Integrator' *)
313 d_DiscreteTimeIntegrator_DS := Constant1;
314 (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: 'cS2/Discrete-Time Integrator' *)
315 c_DiscreteTimeIntegrator_DS := 20.0;
316 (* InitializeConditions for Memory: 'cS22/Memory' *)
317 Memory_PreviousInput := FALSE;
318 (* InitializeConditions for UnitDelay: 'cS19/UD' *)
319 *
320 * Block description for 'cS19/UD':
321 *
322 * Store in Global RAM *)
323 UD_DSSTATE := 0.0;
324 (* InitializeConditions for UnitDelay: 'cS20/UD' *)
325 *
326 * Block description for 'cS20/UD':
327 *
328 * Store in Global RAM *)
329 UD_DSSTATE_p := 0.0;
330 (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: 'cS5/Discrete-Time Integrator' *)
331 c_DiscreteTimeIntegrator_Pr := 2;
332 c_DiscreteTimeIntegrator_IC := 1;
333 (* InitializeConditions for UnitDelay: 'cS2/Unit Delay' *)
334 UnitDelay_DSSTATE := 0.0;
335 (* InitializeConditions for UnitDelay: 'cS23/UD' *)
336 *
337 * Block description for 'cS23/UD':
338 *
339 * Store in Global RAM *)
340 UD_DSSTATE_n := 0.0;
341 (* InitializeConditions for UnitDelay: 'cS24/UD' *)
342

```

Рис. 5.21 Вихідний генерований код мовою ST блоку ПІД-регулятора змінної структури для середовища програмування 3S CoDeSys 3.5.

Програмну реалізацію алгоритмів керування на базі нейронних мереж проводимо аналогічним чином. На рис. 5.22 наведена схема моделювання нейронної мережі для регулятора.

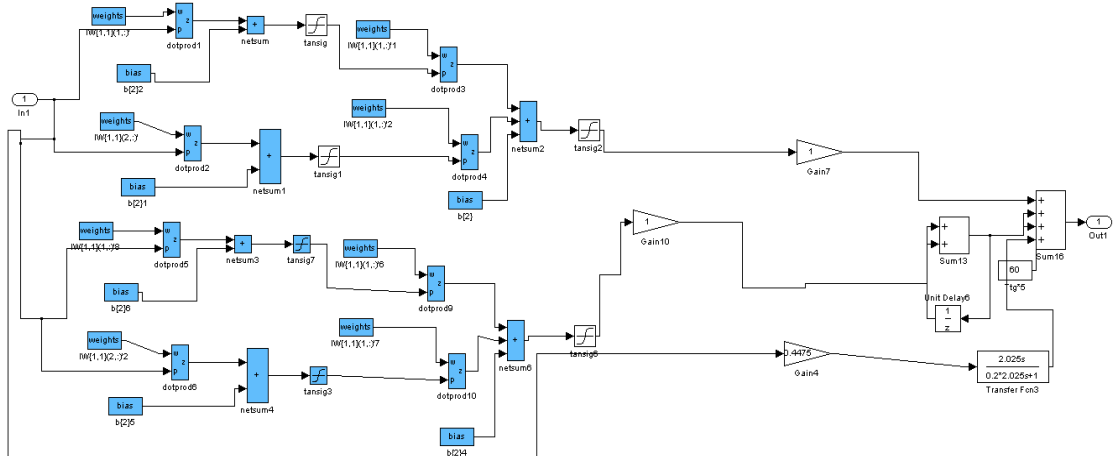


Рис. 5.22 Схема нейронної мережі для регулятора.

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для середовища 3S CoDeSys 3.5. На рис. 5.23 наведено вихідний генерований код мовою ST для блоку нейронної мережі.

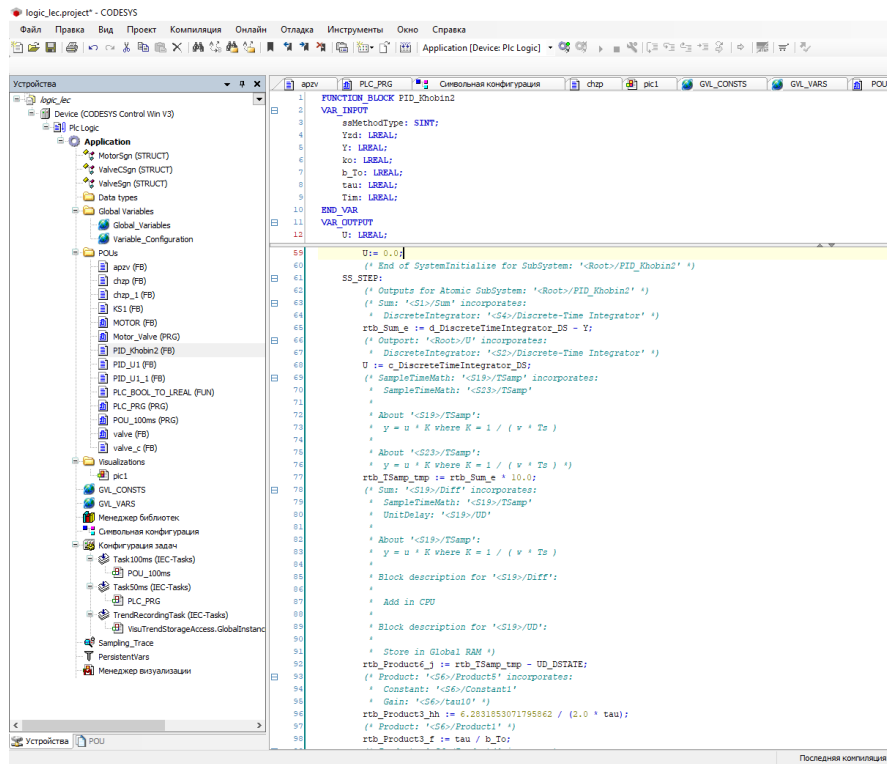


Рис. 5.25 Приклад імпортованого генерованого коду ПІД-регулятора змінної структури в середовищі 3S CoDeSys 3.5.

Загальний вигляд розробленого проекту керування процесом підігріву води в середовищі 3S CoDeSys 3.5 з доданими новими блоками наведено на рис.5.26.

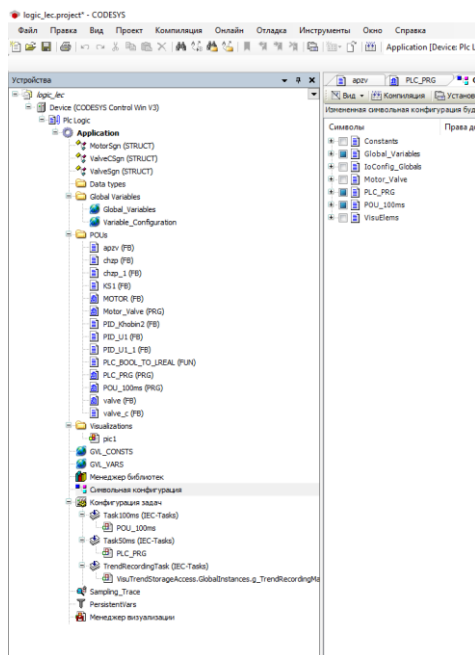


Рис. 5.26 Загальний вид вікна проекту в середовищі 3S CoDeSys 3.5.

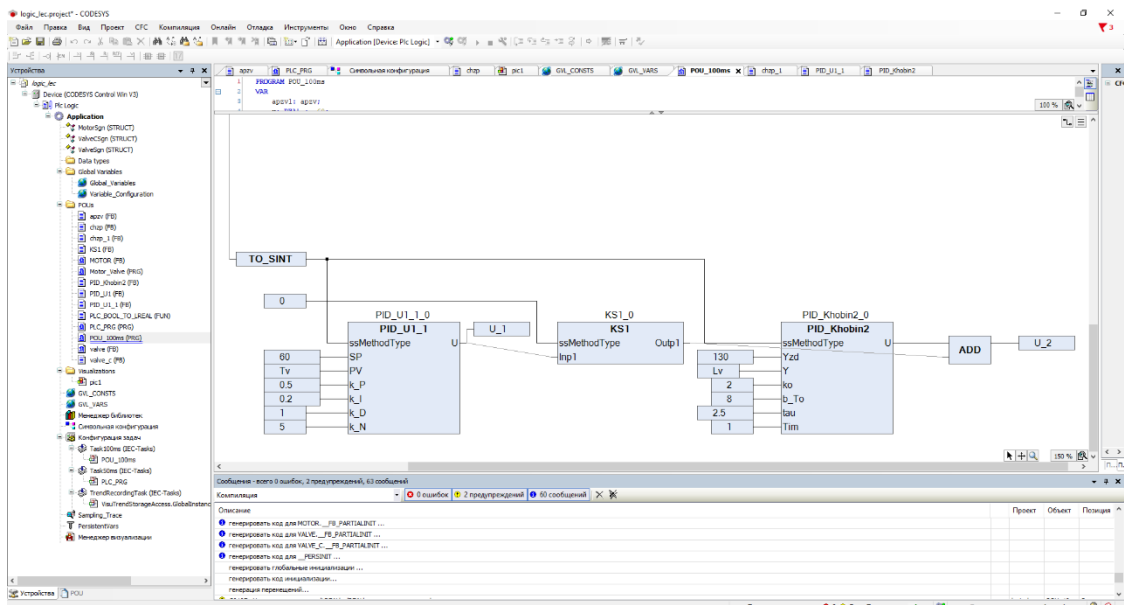


Рис. 5.27. Фрагмент коду у програмі POU_100ms яка реалізує розрахунок регуляторів температури та рівня води.

Проведемо тестування програми в режимі емуляції контролеру. Для цього доповнимо програму регулювання моделлю об'єкта керування і запустимо розрахунок моделі САР. Фрагмент програми моделі ОК наведено на рис. 5.28. А результати тестування САР температури та рівня води наведені на рис. 5.29 - 5.32. Графіки наведено у вікнах АРМ оператора SCADA – системи WinCC 8.0.

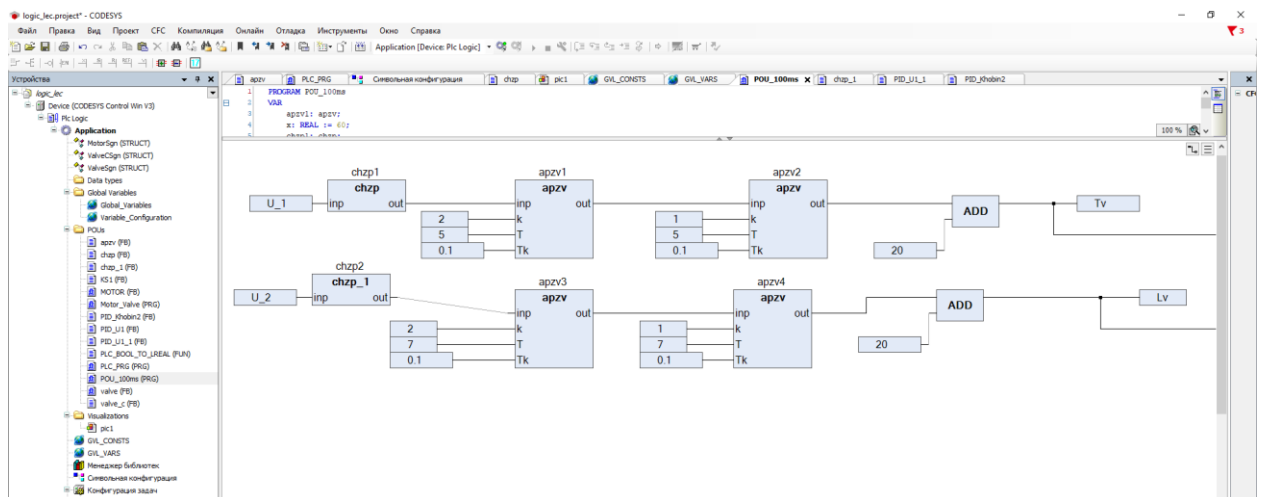


Рис. 5.28. Фрагмент програми яка реалізує розрахунок моделі ОК.

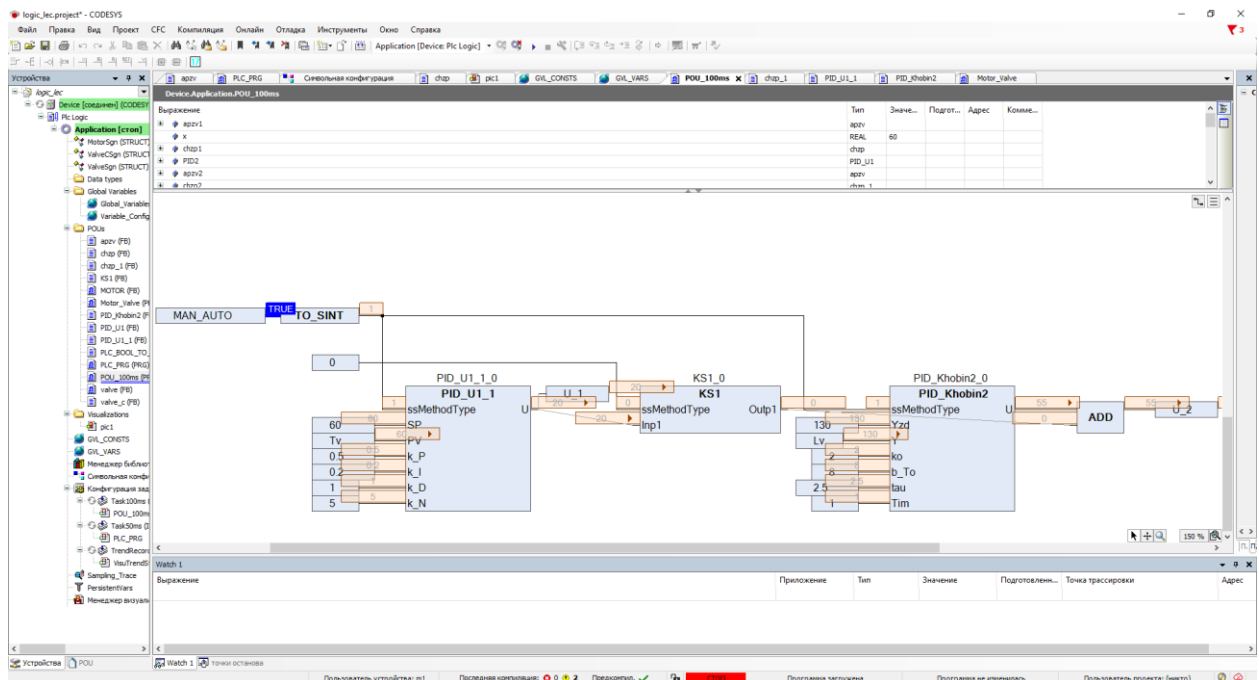


Рис. 5.29 Фрагмент програми алгоритмів регулювання у режимі відладки.

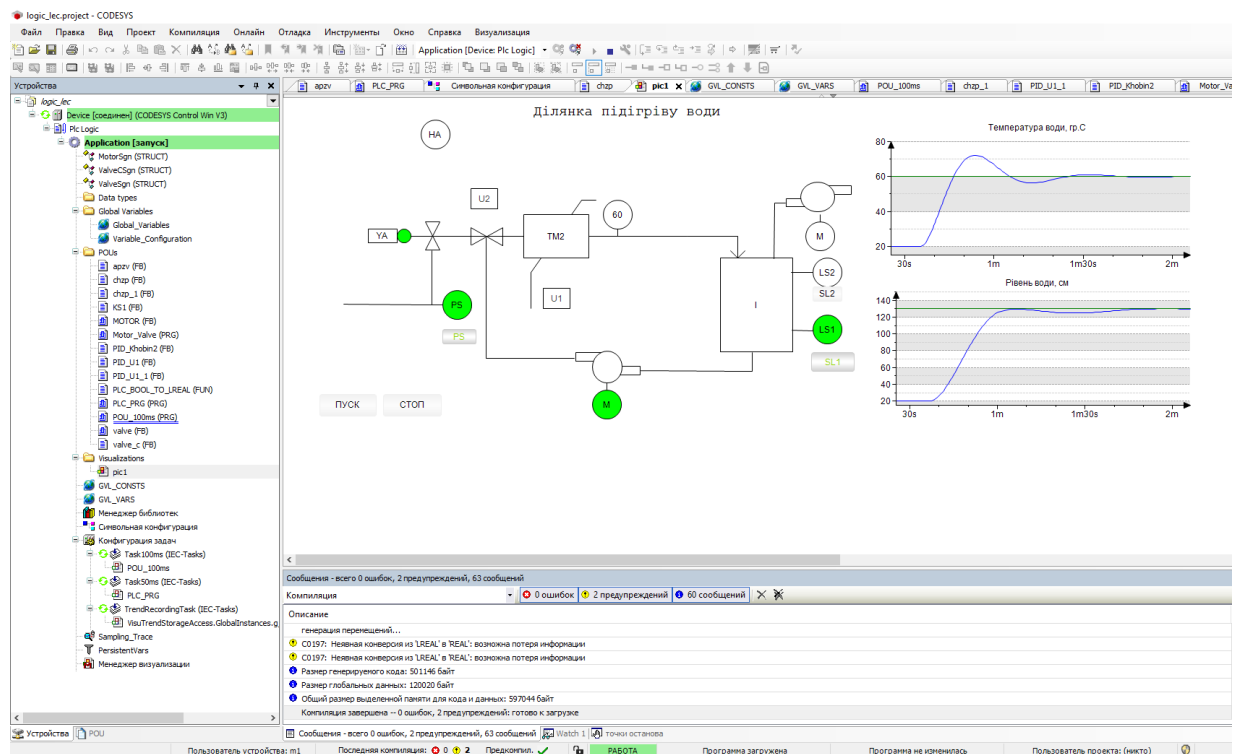


Рис. 5.30 Результати тестування САР температури та рівня води (вікно APM 3S CoDeSys 3.5).

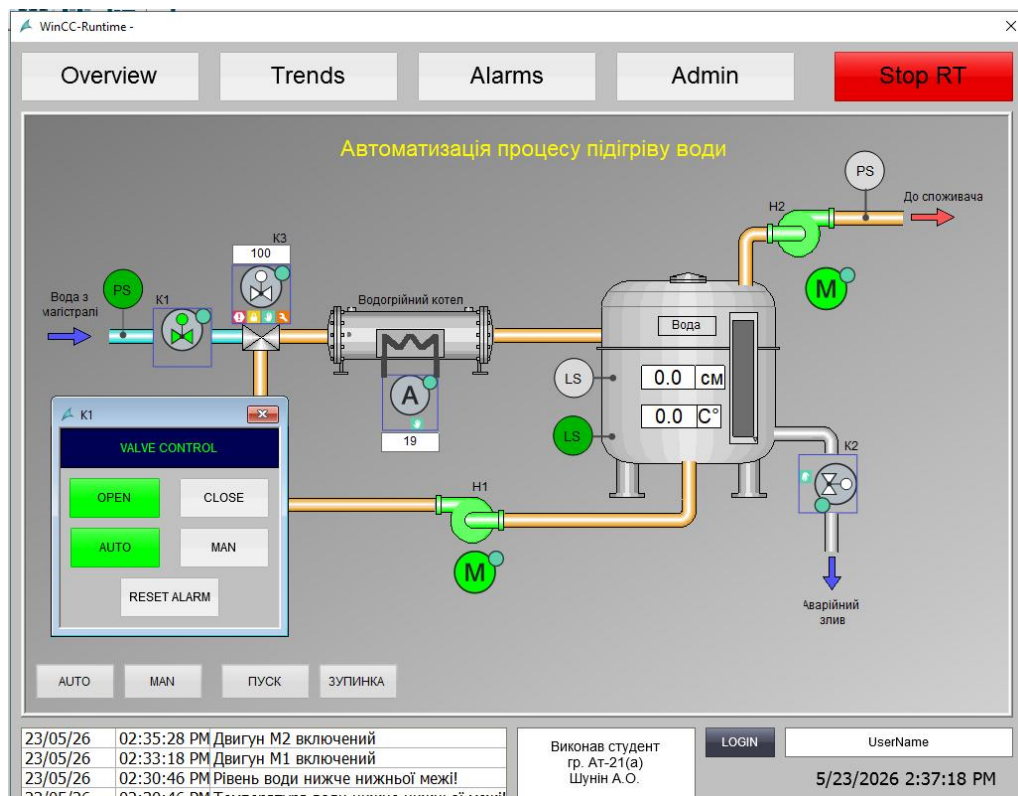


Рис. 5.31 Результати тестування САР (головне вікно SCADA).

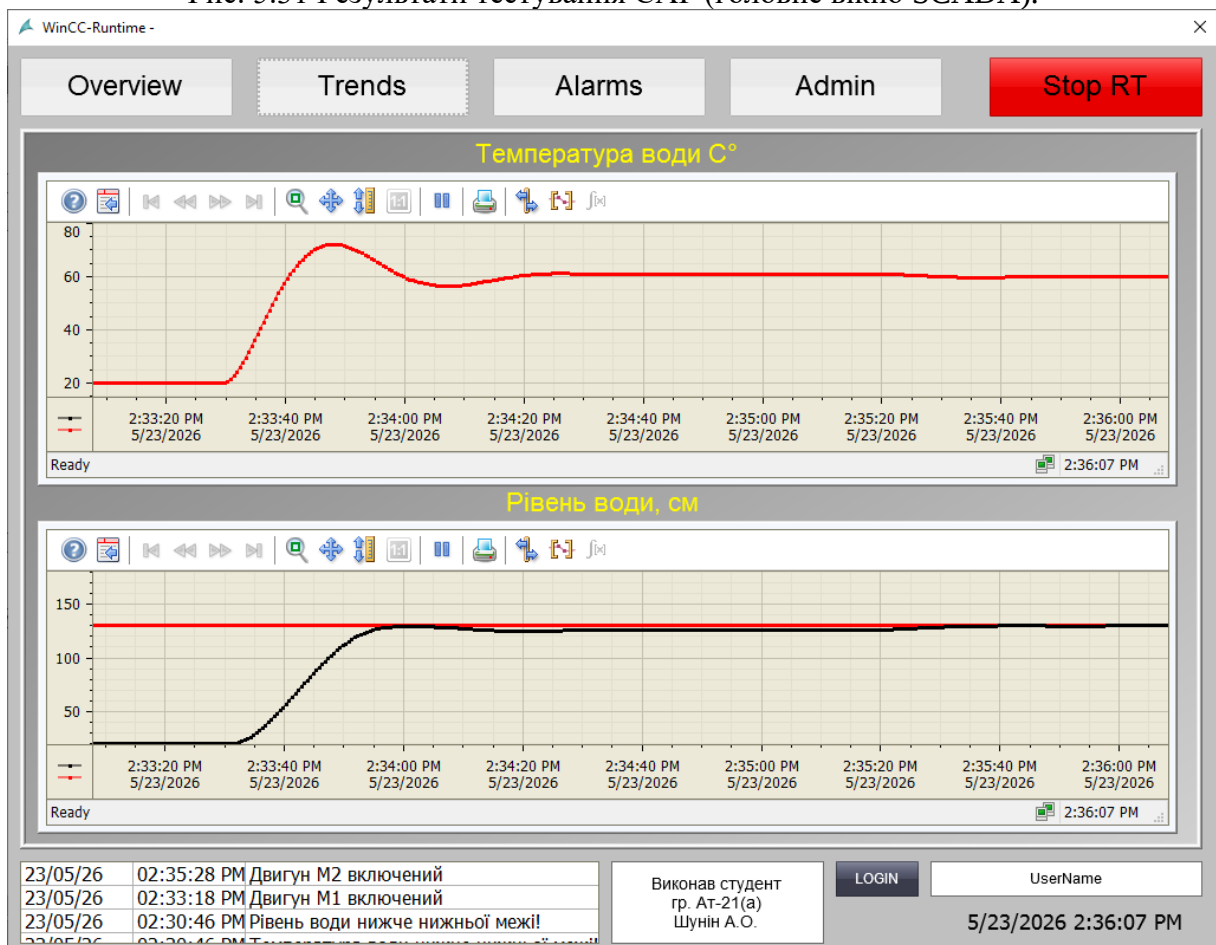


Рис. 5.32 Результати тестування САР температури та рівня води (вікно трендів SCADA).

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

5.3. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

За результатами досліджень можна зробити висновки що модернізована САК процесом підігріву води для потреб підприємства, яка реалізує нову функцію регулювання з алгоритмом зі змінною структурою, забезпечує підвищення динамічної точності підтримання температури на заданому значенні в умовах дії параметричних збурень та дає можливість забезпечити зниження витрат електричної енергії на 2-5%.

5.4 Висновки за розділом

1. В цьому розділі розглянута програмно-технічна структура системи автоматичного керування процесом підігріву води. Обґрунтовано обрані контролер, ПЗО та програмне забезпечення 3S CoDeSys 3.5 для реалізації системи.

2. Розроблені в системі Matlab моделі нових алгоритмів ПД регулювання зі змінною структурою за допомогою пакету Simulink PLC Coder були конвертовані та інтегровані у середовище програмування контролерів фірми 3S CoDeSys 3.5. Проведене тестування конвертованого програмного забезпечення підтвердило його працездатність та ефективність застосування конвертору пакета Simulink PLC Coder для складних нелінійних динамічних алгоритмів керування.

3. Вдосконалення системи керування забезпечить більш якісне керування процесом підігріву води.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хобін В.А. - Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» - Одеса: ОНАХТ, 2000. - 16 с.
2. ДСТУ 3008:2015 Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Київ, ДП УкрНДНЦ, 2016. 31 с.4. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Теорія Автоматичного Управління» - Одеса: ОНАХТ, 2000. - 16 с.
3. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» – Одеса: ДАПТ, 2000. – 16 с.
4. Хобін В.А. - Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Теорія автоматичного управління" - Одеса: ОДАПТ, 2000. - 16 с.
5. Хобін В.А. - Конспект курсу лекцій «Спеціальні розділи теорії управління» - Одеса, 2018. - 28 с.
6. Конспект лекцій з дисципліни "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації".
https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart_3008_2015.pdf
7. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу "Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів" [Електронний ресурс] : для студентів, які навчаються за спец. 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навчання / В. А. Хобін ; відп. за вип. В. А. Хобін ; Каф. автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем. — Одеса : ОНАХТ, 2016. — Електрон. текст. дан.: 96 с.
<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ-cnv.BibRecord.157312>
8. Хобін В.А., Світий І.М. Теорія автоматичного керування: Посібник до виконання комплексної курсової роботи. Одеська національна академія харчових технологій, 2020. – 277 с.
9. Муратов В. Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади [Текст] :

навч. посіб./ В. Г. Муратов. — Вид. 2-ге, допов. — Київ : Освіта України, 2016. — 364 с.

<https://elc.library.onaft.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.155904>

10. Савицький, В. К. Технічні засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб. /В.К. Савицький, Р.М. Федоришин; Нац. ун-т "Львівська політехніка".— Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. - 292 с.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentSearchResult;jsessionid=6CD40B15F14DD9265BF7FD9A559C892C>

11. Левінський В. М. Конспект курсу лекцій з курсу "Технічні засоби автоматизації". Розділ "Виконавчі пристрої" [Електронний ресурс] : для студентів спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навчання / В. М. Левінський, М. В. Левінський ; відп. за вип. В. А. Хобін ; Каф. автоматизації технологічних процесів і робототехн. систем. — Одеса : ОНАХТ, 2018. — Електрон. текст. дані: 150 с.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ-cnв.BibRecord.162866>

12. Левінський В. М. Основи створення проектів автоматизації в середовищі ТІАPortal [Електронний ресурс] : електрон. навч. посіб. для підгот. студентів спец. "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / В. М. Левінський, М. В. Левінський ; Одес. нац. акад. харч. технологій. — Одеса : ОНАХТ, 2019. — Електрон. текст. дані: 177 с.

<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ-cnв.BibRecord.166190>

13. Пупена О.М., Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI. : Навч. посіб. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 594 с.

14. Пупена О.М, Ельперін І.В., Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: Навчальний посібник. — К. : Вид-во "Ліра-К", 2011. — 552 с.

15. Ткачук В. І. Водопостачання та водовідведення: підручник. — К.: КНУБА.

16. Дешко В. І., Суходуб І. О. Джерела та системи теплопостачання. — К.: НТУУ «КПІ».

17. Хобін В.А. - Конспект курсу лекцій з Ідентифікації та моделюванню технологічних об'єктів - Одеса 1999. - 78 с

18. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів спеціальностей 7.092501 денної та заочної форми навчання, 1 частина – Одеса: ОНАХТ, 2006 р.

19. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів спеціальностей 7.092501 денної та заочної форми навчання, 2 частина – Одеса: ОНАХТ, 2007 р.

20. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Спеціальні розділи теорії управління» для студентів спеціальностей 8.05020201 денної та заочної форми навчання

ДОДАТОК А

Вихідний текст модулю ПІД регулятора змінної структури.

```

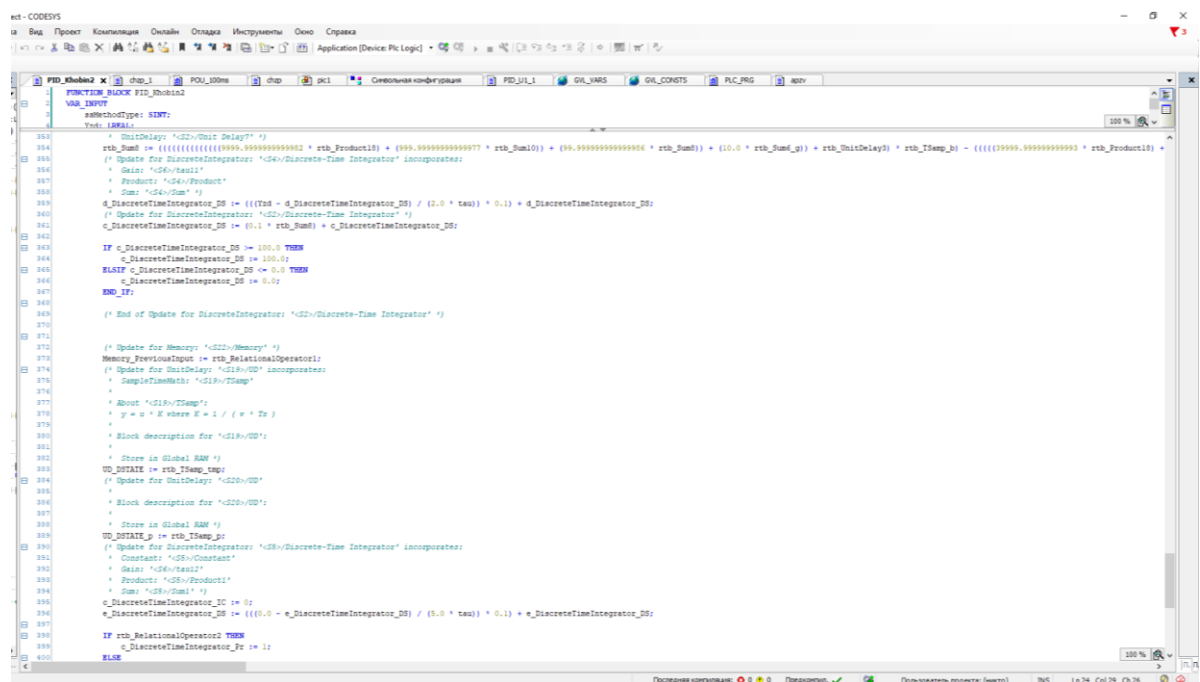
1  FUNCTION_BLOCK PID_Rhobin2
2  VAR_INPUT
3  setpointType: SINT;
4  Ysd: REAL;
5  Y: REAL;
6  END_VAR
7
8  CASE setpointType OF
9  SET_POINT:
10     (* ConstCode for Atomic SubSystem: 'Root>PID_Rhobin2' *)
11     (* ConstCode for Constant: 'G1b/Constant1' *)
12     Constant1 := 0.0;
13     (* End of ConstCode for SubSystem: 'Root>PID_Rhobin2' *)
14     (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: 'Root>PID_Rhobin2' *)
15     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: 'G2b/Discrete-Time Integrator' *)
16     d_DiscreteTimeIntegrator_DS := Constant1;
17     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: 'G2b/Discrete-Time Integrator' *)
18     c_DiscreteTimeIntegrator_DS := 0.0;
19     (* InitializeConditions for Memory: 'G2b/Memory' *)
20     Memory_PreviousInput := FALSE;
21     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G1b/UD' *)
22     (* Block description for 'G1b/UD': *)
23     (* Store in Global RAM *)
24     UD_STATE := 0.0;
25     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/UD' *)
26     (* Block description for 'G2b/UD': *)
27     (* Store in Global RAM *)
28     UD_STATE_b := 0.0;
29     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: 'G5b/Discrete-Time Integrator' *)
30     c_DiscreteTimeIntegrator_IC := 1;
31     c_DiscreteTimeIntegrator_IC := 1;
32     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
33     UnitDelay_STATE := 0.0;
34     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
35     (* Block description for 'G2b/UD': *)
36     (* Store in Global RAM *)
37     UD_STATE_a := 0.0;
38     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
39     (* Block description for 'G2b/UD': *)
40     (* Store in Global RAM *)
41     UD_STATE_d := 0.0;
42     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
43     UnitDelay_STATE := 0.0;
44     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
45     UnitDelay_STATE := 0.0;
46
47     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
48     UnitDelay_STATE := 0.0;
49     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
50     UnitDelay_STATE := 0.0;
51     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
52     UnitDelay_STATE := 0.0;
53     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
54     UnitDelay_STATE := 0.0;
55     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
56     UnitDelay_STATE := 0.0;
57     (* InitializeConditions for UnitDelay: 'G2b/Unit Delay' *)
58     UnitDelay_STATE := 0.0;
59     (* End of SystemInitialize for SubSystem: 'Root>PID_Rhobin2' *)
60
61     SET_POINT:
62     (* Outputs for Atomic SubSystem: 'Root>PID_Rhobin2' *)
63     (* Sum: 'G1b/Sum' incorporates: *)
64     (* DiscreteIntegrator: 'G2b/Discrete-Time Integrator' *)
65     rth_Sum := d_DiscreteTimeIntegrator_DS - Y;
66     (* Output: 'Root>Q' incorporates: *)
67     (* DiscreteIntegrator: 'G2b/Discrete-Time Integrator' *)
68     U := c_DiscreteTimeIntegrator_DS;
69     (* SampleTimeMath: 'G1b/Tsmp' incorporates: *)
70     (* SampleTimeMath: 'G2b/Tsmp' *)
71     (* *)
72     (* About 'G1b/Tsmp': *)
73     (* y = u * K where K = 1 / ( n * Ts ) *)
74     (* *)
75     (* About 'G2b/Tsmp': *)
76     (* y = u * K where K = 1 / ( n * Ts ) *)
77     rth_Tsmp := rth_Sum * 1.0;
78     (* Sum: 'G1b/DIFF' incorporates: *)
79     (* SampleTimeMath: 'G1b/Tsmp' *)
80     (* UnitDelay: 'G1b/UD' *)
81     (* *)
82     (* About 'G1b/Tsmp': *)
83     (* y = u * K where K = 1 / ( n * Ts ) *)
84     (* *)
85     (* Block description for 'G1b/DIFF': *)
86     (* *)
87     (* Add in CPU *)
88     (* *)
89     (* Block description for 'G1b/UD': *)
90     (* *)
91     (* Store in Global RAM *)
92     rth_Product := rth_Tsmp * UD_STATE;
93     (* Product: 'G2b/Product' incorporates: *)

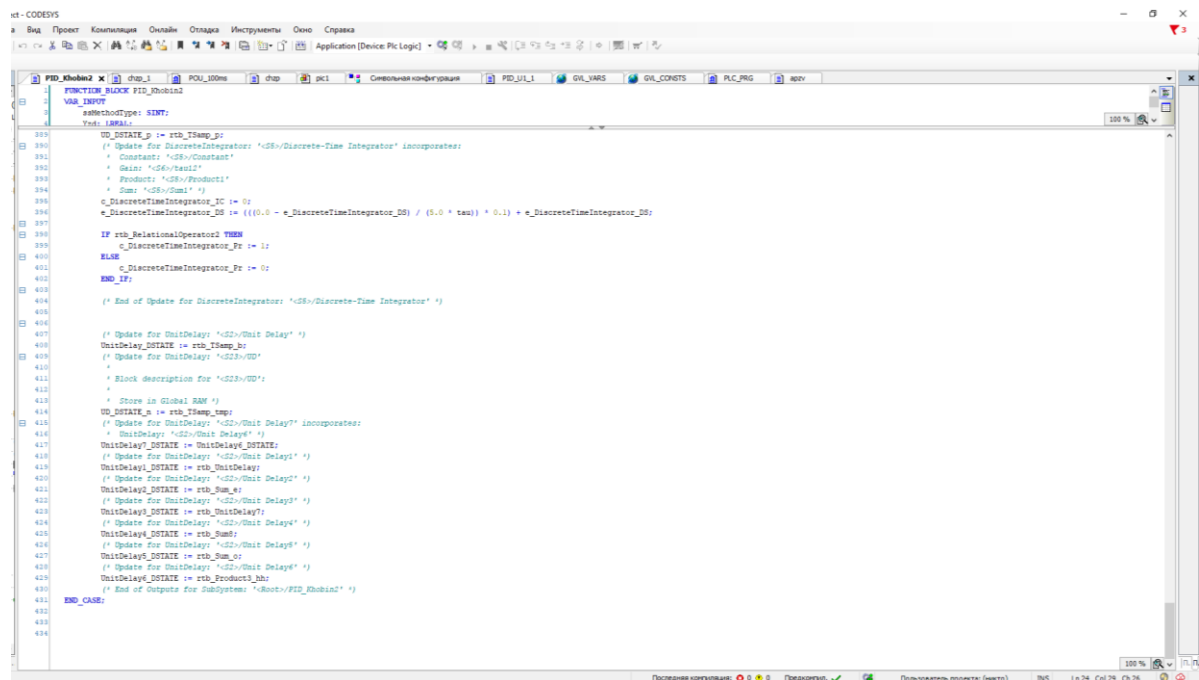
```

```

92 rth_Product4_j := rth_TSamp_tmp - UD_STATE;
93 (* Product: 'S6/Product' incorporates:
94 * Constant: 'S6/Constant'
95 * Gain: 'S6/tau8' *)
96 rth_Product1_hh := 6.20310507195662 / (2.0 * tau);
97 (* Product: 'S6/Product1' *)
98 rth_Product1_f := tau / h_To;
99 (* Product: 'S6/Product4' incorporates:
100 * Gain: 'S6/tau8'
101 * Gain: 'S6/tau8'
102 * Math: 'S6/Math Function'
103 *
104 * About 'S6/Math Function':
105 * Operator: exp *)
106 rth_Product_p := (EXP(-0.2 * rth_Product1_f) * 1.7) / ko;
107 (* Gain: 'S6/tau8' incorporates:
108 * Gain: 'S6/Gain' *)
109 rth_Sum_g := 0.5 * tau;
110 (* Product: 'S6/Product3' incorporates:
111 * Gain: 'S6/tau8'
112 * Gain: 'S6/tau8'
113 * Math: 'S6/Math Function1'
114 *
115 * About 'S6/Math Function1':
116 * Operator: exp *)
117 rth_Product1_f := EXP(-0.2 * rth_Product1_f) * 0.4 * tau;
118 (* SampleTimeMath: 'S23/TSamp'
119 *
120 * About 'S23/TSamp':
121 * y = u * E where E = 1 / ( 1 + Ts ) *)
122 rth_TSamp_p := rth_Product4_j * 10.0;
123 (* Signum: 'S8/Sign' *)
124
125 IF rth_Sum_e < 0.0 THEN
126   (* Signum: 'S7/Sign' *)
127   rth_TSamp_h := -1.0;
128 ELSEIF rth_Sum_e > 0.0 THEN
129   (* Signum: 'S7/Sign' *)
130   rth_TSamp_h := 1.0;
131 ELSE
132   (* Signum: 'S7/Sign' *)
133   rth_TSamp_h := 0.0;
134 END IF;
135
136 (* RelationalOperator: 'S22/Relational Operator' incorporates:
137 * Constant: 'S22/Constant'
138 * Constant: 'S6/Constant4'
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999

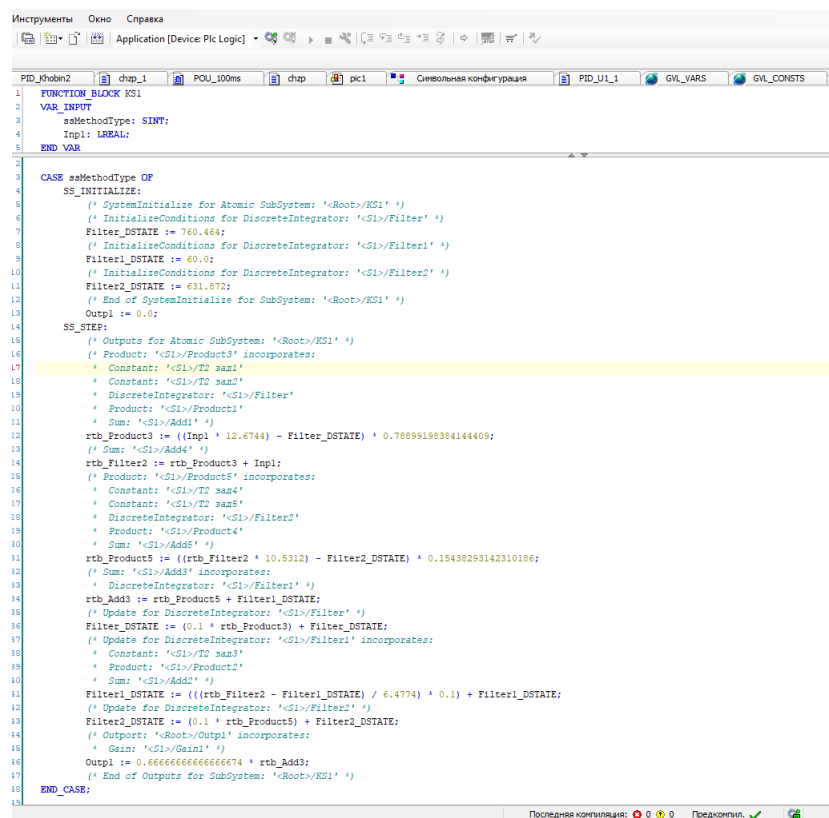
```





ДОДАТОК Б

Вихідний текст модулю коригуючої ланки.



АВТОМАТИЗАЦІЯ ПІДГРІВУ ВОДИ WATER HEATING AUTOMATION

Шунін А.О.

Shunin A. O.

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID: 0009-0006-9506-7954

E-mail: alezalez43@gmail.com

Анотація. Забезпечення споживачів гарячою водою є одним із ключових завдань сучасних систем теплопостачання. Однак їх стабільне і ефективне функціонування можливе лише за умови автоматичного керування цим процесом. Тому актуальним є завдання розробки та удосконалення систем автоматичного керування процесом підігріву води в теплопостачальних установках. Розглянуто технологічний процес підігріву води. Визначено потенційні джерела підвищення економічної ефективності. Уточнено завдання модернізації систем автоматичного керування (САК). Здійснено параметризацію технологічного процесу підігріву води, розроблено параметричну та структурну схеми. Оцінено існуючий рівень реалізації функцій керування та обрано кінцеві економічні цілі, яких можна досягти шляхом модернізації системи керування. Одержано моделі статистики і динаміки каналів керування та моделі вхідних дій. Розроблено базову структуру САК з ПІ- та ПІД-регуляторами та САК підвищеної динамічної точності з компенсацією шкідливого впливу перехресних зв'язків в об'єкті. Створено алгоритми логічного та програмного керування технологічним процесом підігріву води, які далі були використані для розробки технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування; у середовищі CoDeSys підібрано промисловий контролер; розроблено програми, що реалізують алгоритми логічного керування. Обрано технічні засоби отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів. У середовищі WinCC розроблено автоматизоване робоче місце оператора та налагоджувача САК для керування процесом підігріву води. Розроблено елементи комплексу проектної документації; враховано заходи з охорони праці; проведена перевірка на економічну доцільність розробки.

Abstract. Providing consumers with hot water is one of the key tasks of modern heat supply systems. However, their stable and effective functioning is possible only if automatic control of this process is used. Therefore, the task of developing and improving automatic control systems for the water heating process in heat supply plants is relevant. The technological process of water heating is considered. Potential sources of increasing economic efficiency are identified. The task of modernizing automatic control systems (ACS) is specified. The technological process of water heating is parameterized, its parametric and structural schemes are developed. The existing level of implementation of control functions is assessed and the final economic goals are selected, which can be achieved by modernizing the system. Models of statics and dynamics of control channels and models of input actions are developed. The basic structure of an ACS with PI and PID regulators and an ACS of increased dynamic accuracy are developed. Algorithms for logical and software control of the technological process of water heating were created, which were subsequently used to develop the technical structure of the microprocessor core of the water heating control system; an industrial controller was selected in the CoDeSys environment; programs were developed that implement logical control and regulation algorithms. Technical means of obtaining information about process variables and implementing control effects were selected. An automated workplace for the operator and debugger of the ACS for controlling the water heating process was developed in the WinCC environment. A set of design documentation was developed; occupational health and safety measures were taken into account; a check was carried out for the economic feasibility of the development.

Ключові слова: гаряча вода, електронагрівач, трубчастий електронагрівальний елемент (ТЕН), автоматизація, система автоматичного керування, підвищення динамічної точності, енергоефективність.

Keywords: hot water, electric heater, tubular electric heating element (TEN), automation, automatic control system, dynamic accuracy increasing, energy efficiency.

Вступ. Забезпечення споживачів гарячою водою є одним із ключових завдань сучасних систем теплозабезпечення житлових і виробничих будівель. Від надійності та ефективності роботи таких систем залежить не лише комфортний побут людей, а й енергоефективність усього комунального господарства. Підігрів води потребує раціонального використання енергетичних ресурсів і застосування технічних рішень, здатних забезпечити стабільність параметрів теплоносія впродовж усього циклу роботи.

Існує декілька способів реалізації процесу нагрівання води - від традиційних теплогенераторів, що використовують газ або тверде паливо, до сучасних електричних установок, які відрізняються простотою експлуатації, компактністю та можливістю точного підтримання температури нагрітої води. Одними з найпоширеніших типів нагрівальних пристроїв у системах гарячого водопостачання є **електронагрівачі з ТЕНами**. Принцип їх дії ґрунтується на безпосередньому теплообміні між нагрівальним елементом та водою, що забезпечує високу швидкість нагріву і стабільність температури в робочому об'ємі. До переваг таких установок належать простота конструкції, відносна безпечність експлуатації,

відсутність шкідливих викидів та можливість гнучкого керування кількістю увімкнених нагрівальних елементів залежно від потреби в теплоті. Завдяки цьому електронагрівачі широко застосовують як у локальних, так і в централізованих системах теплопостачання.

Однак ефективна робота подібних систем можлива лише за умови **автоматичного керування процесом нагріву води**. Автоматизація дозволяє підтримувати задані температурні режими, оптимізувати споживання електроенергії, запобігати аварійним ситуаціям та підвищувати енергоефективність системи. У зв'язку з цим **актуальним є завдання розробки та удосконалення систем автоматичного регулювання процесу підігріву води в теплопостачальних установках**, що забезпечить стабільну та економічну роботу обладнання за різних експлуатаційних умов.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Оскільки питання автоматизації підігріву води є актуальним завданням, багато дослідників приділяли йому увагу. Так компанія OASE GmbH in Ukraine використовує регулювання температури підігріву води в резервуарі зміною електричної потужності проточного електронагрівача [1]. Shen G. та ін. пропонують регулювання температури води у баку нагрівача за допомогою зміни потужності електронагрівача із застосуванням моделі прогнозного керування (MPC), що враховує графік споживання та вартість електроенергії [2]. Booyesen M. J. розглядає оптимальне керування побутовими водонагрівачами, де регулюють температуру нагрівання води в баку вмиканням та вимиканням нагрівача для зниження енергоспоживання [3]. Sejudo C. E. та ін. у технічному звіті PNNL описали підтримання температури гарячої води на заданому рівні шляхом керування роботою рециркуляційного насоса з використанням датчиків температури у баку і трубопроводах [4]. Rahmadini V. F. пропонує ПІД-регулювання температури у баку електронагрівача, зміною потужності нагрівача [5]. US Patent US7798107B2 описує систему контролю температури в водонагрівачі, де встановлено датчики температури в різних шарах бака, а регулювання здійснюється через зміну уставки і обмеження потужності для уникнення перегріву [6]. Патент (Justia, 2023) передбачає керування температурою в електронагрівачу через тиристор (TRIAC), де регулюючим параметром є миттєва потужність нагрівача, а регульованим – температура в баку [7]. U.S. Department of Energy (DOE) у матеріалах з інтеграції «grid-interactive water heaters» описує регулювання температури зміною потужності нагрівача на основі зовнішніх сигналів від енергосистеми [8]. Мазурок Є. М. розглядає в системі гарячого водопостачання регулювання температури води впливом на потужність рециркуляційного насоса [9]. Недоліком розглянутих рішень є низька надійність відкачування нагрітої води з резервуара, оскільки рівень води в резервуарі не регулюють. Компанія TGE System Ukraine запропонувала регулювання температури гарячої води в резервуарі шляхом зміни електричної потужності електронагрівача, та регулювання рівня гарячої води в резервуарі шляхом зміни швидкості обертання ротора насоса, що відкачує гарячу воду з резервуару [10]. Недоліком даного способу є недостатня ефективність роботи системи підігрівання води через низьку динамічну точність керування цим процесом в результаті шкідливої дії контуру регулювання рівня гарячої води в резервуарі на контур регулювання її температури в резервуарі.

В Одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем запропоновано ефективну систему автоматичного керування нагрівом води, яка забезпечує високу динамічну точність керування цим процесом шляхом компенсації шкідливої дії контуру регулювання рівня гарячої води в резервуарі на контур регулювання температури гарячої води в ньому побудовою автономної системи автоматичного регулювання (САР) [11].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу підігріву води та зменшення енергетичних витрат за рахунок підвищення динамічної точності системи автоматичного керування цим процесом.

Для реалізації поставленої мети було виконано такі завдання:

- опис ділянки технологічного процесу, його агрегатів та існуючого рівня автоматизації керування ними;
- виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК;
- конкретизація задачі дотримання регламентів технологічного процесу;
- розробка і реалізація комплексу його моделей як об'єкта керування (ОК);
- розробка і параметрична оптимізація алгоритмів регулювання, порівняльний аналіз САР;
- конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування технологічним агрегатом;
- вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів;
- розробка технічної структури контролерно-комп'ютерної мережі;
- параметризація технічних засобів, контролера і мереж, програмування алгоритмів логічного керування та регулювання САК;
- розробка SCADA системи для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.
- розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК та заходів з охорони праці.

Методи і матеріали дослідження Використано методи активного та пасивного експерименту; інженерні методики ідентифікації моделей ОК; оптимального параметричного синтезу; аналізу САК; імітаційного моделювання; планування та проведення експериментів, теорії автоматичного керування, зокрема метод підвищення динамічної точності; статистичної теорії САК.

Результати досліджень. На початку дослідження, було проаналізовано технологічний процес підігріву води як ОК (рис. 1). Для виробництва гарячої води застосовують електронагрівач, конструкція якого являє собою ємність, в яку вмонтовано кілька ТЕНів. Вода, потрапляючи в ємність, нагрівається безпосередньо від цих елементів. Кількість ТЕНів залежить від потужності самого котла. Підігріта в електропідігрівачі вода надходить у резервуар та при зниженні температури вода циркулює за допомогою насосів для повторного підігріву, у результаті чого вона підтримується

завжди гарячою. При охолодженні теплоносія включається стільки ТЕНів, скільки необхідно, щоб підняти температуру до заданої.

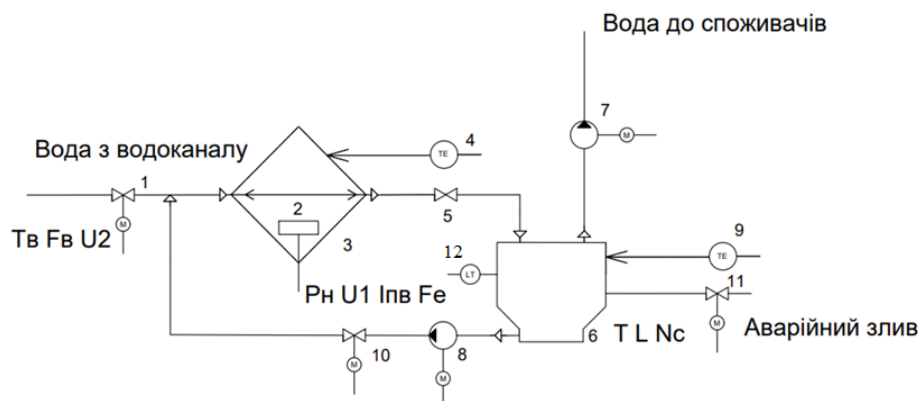


Рисунок 1. – Параметризована схема процесу підігріву води

- | | |
|---|---|
| 1 - клапан подачі води з водоканалу; | 12 – передавач сигналу рівня в резервуарі з водою; |
| 2 - нагрівачий елемент електронагрівача; | T – температура теплої води в резервуарі; |
| 3 - електронагрівач; | L – рівень води у резервуарі; |
| 4 - датчики температури у нагрівачі; | U1 – зміна потужності нагрівача; |
| 5 - клапан подачі води в резервуар; | U2 – % відкриття клапану подачі холодної води з мережі; |
| 6 - резервуар з підігрітою водою; | Тв – температура води в нагрівачі; |
| 7 - насос подачі води до споживачів; | Фв – витрати води з водоканалу; |
| 8 - насос для забезпечення циркуляції води; | Рн – тиск в нагрівачі; |
| 9 - датчик температури у резервуарі; | Fe – витрати електрики; |
| 10 - клапан з засувкою; | Іпв – питомі витрати електрики |
| 11 - клапан аварійного зливу води | |

Нормативи ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. – Таблиця регламентів

№ п/п	Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Номинальнізначення	Допустимі відхилення від номіналу		
					Довготривалі		Час
					Величина	Величина	
1	Температура у нагрівачу	T	°C	60	±0.5	±3	100 с
2	Рівень води у системі	L	см	130	±2	±10	100 с

До технологічного регламенту віднесено T; до експлуатаційного - L; до техніко-економічного і екологічного - Іпв. До сировинних параметрів віднесено: Fв, Тв, до енергетичних – Fe, до механічних - U1, U2. Параметрична схема ОК наведена на рис. 2.

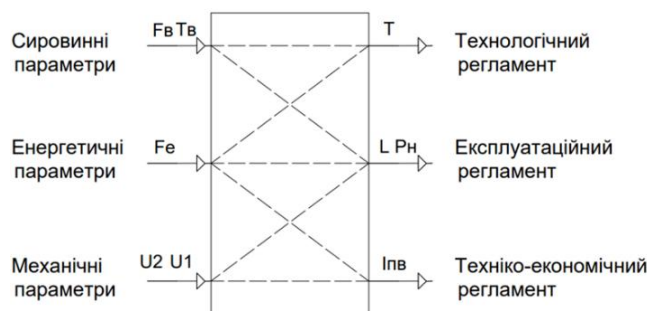


Рисунок 2. – Параметрична схема процесу підігріву води як ОК

Кінцевою економічною ціллю дослідження є підвищення ефективності процесу підігріву води шляхом зниження сировинних та енергетичних витрат. У технологічному процесі немає можливості зниження витрат води, але є можливість підвищення ефективності підігріву води до заданої температури та зниження споживаної електрики зниженням часу встановлення цієї температури.

Далі було здійснено конкретизацію задачі дотримання регламентів технологічного процесу, розробку і реалізацію комплексу його моделей як ОК.

Для процесу підігріву води як регульовані та оптимізовані координати доцільно вибрати T та L ; як керуючі - U_1 , U_2 . Структурна схема процесу підігріву води як ОК наведена на рис. 3.

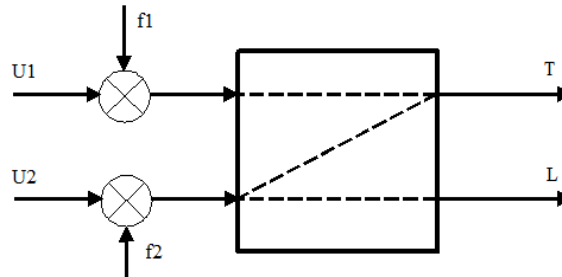


Рисунок 3. – Структурна схема процесу підігріву води як ОК
 f_1 та f_2 – неконтрольовані збурення

Далі було проведено структурну та параметричну ідентифікацію ОК; розроблені моделі статички та динаміки за каналами керування та моделі вхідних дій, проведена перевірка на відповідність отриманих моделей до експериментальних даних.

Проведено параметричну ідентифікацію та оптимізацію алгоритмів регулювання ПІ та ПІД, порівняльний аналіз САР, перевірка на грубість.

Проведено структурний і параметричний синтез САР базової структури, побудованої на основі замкненого принципу регулювання.

Причиною недостатньої динамічної точності САР базової структури є шкідливий вплив перехресних зв'язків в об'єкті. Основним шляхом підвищення її динамічної точності є побудова автономної САР, в основу якої покладено принцип двоканальності Петрова, суть якого - у введенні додаткового каналу впливу " $u_2 - T$ " через коригуючий зв'язок (рис. 4).

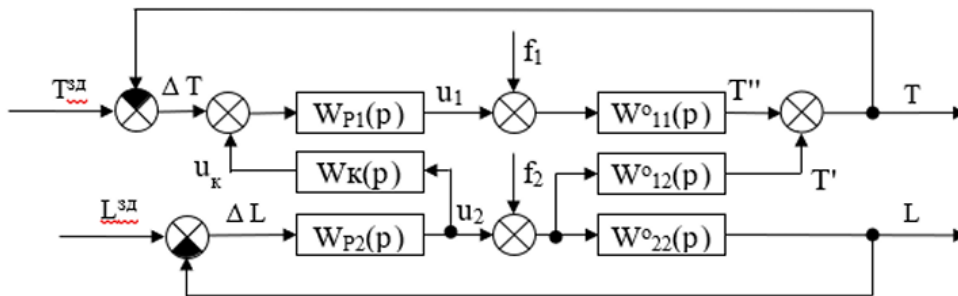


Рисунок 4. – Структурна схема автономної САР

u_k – вихідна дія коригуючого зв'язку $W_k(p)$, %х.р.о.; ΔT та ΔL – помилки регулювання; f_1 та f_2 – неконтрольовані збурення; $W_{P1}(p)$ та $W_{P2}(p)$ – передаточні функції регуляторів; $W_{11}(p)$, $W_{22}(p)$, $W_{12}(p)$ – передаточні функції прямих та перехресного каналів ОК.

Проведено порівняння перехідних процесів у САР базової структури і САР автономної (рис. 5), (табл. 2).

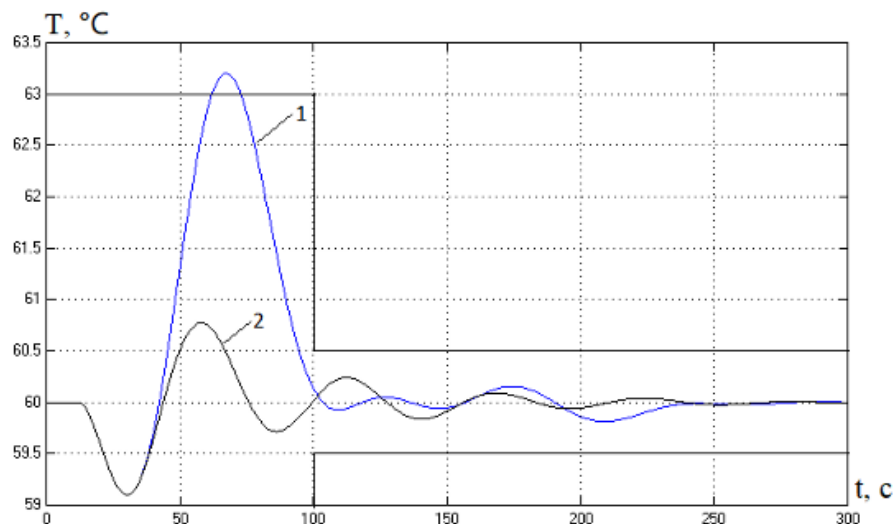


Рисунок 5. – Результати порівняння якості роботи САР базової структури (1) і САР автономної (2).

Таблиця 2. – Результати порівняння якості роботи базової САР і САР підвищеної динамічної точності

САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{с}$	$\Delta L_{\text{МАКС}}, \text{см}$	$T_{\text{пп2}}, \text{с}$	
ПІД	3,2	94,65	2,7	50,56	54,86
ПІД підв.	0.9	123,4	2,7	50,56	26,15

Оскільки для САР підвищення динамічної точності дає покращення деяких показників якості регулювання та критерію у порівнянні з САР базової структури, тому САР підвищеної динамічної точності використовувати доцільно.

Для процесу підігрівання води були складені регламенти функціонування та алгоритми пуску-зупинки в штатному та аварійному режимах. Регламент аварійної зупинки передбачає внесхатну ситуацію в нагрівачі. Це може бути привищена температура або тиск, тоді систему потрібно безпечно зупинити для інспекції та налагодження. Розроблені алгоритми керування достатньо точно співпадають з реальними технологічними процесами.

Розроблено функціональну логічну схему процесу керування технологічним агрегатом, з використанням типових символічних позначень логічних елементів, та її детальний опис.

Здійснено вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів, розробку технічної структури контролерно-комп'ютерної мережі.

Розроблена технічна структура мікропроцесорного ядра системи керування підігрівом води має централізовану побудову, тому що до складу системи входить контролер, який виконує функції ПЗО та реалізує алгоритми керування, а реалізація АРМ ведеться на панелі оператора та на промисловому комп'ютері (ПК), а це зумовлено тим, що система регулює два параметри, і додавання декількох станцій розподіленого вводу/виводу, що будуть виконувати функції віддалених ПЗО, тільки ускладнить систему та може викликати затримки сигналів. Для реалізації технологічного процесу був обраний контролер WAGO PFC200 750-8212, який добре підходить до системи, оскільки має багато інтерфейсів для виконання поточного процесу, та простір для модернізації його в майбутньому; існує його програмна сумісність з WAGO-I/OPRO V2.3 та з CODESYS V3.5; є інтегрований Web-інтерфейс; він є відносно економічним контролером.

Далі було розроблено SCADA – систему для АРМ оператора і наладчика САК процесу керування підігрівом води. На рис. 6 представлений екран «Мнемосхема ділянки» при працюючому в автоматичному режимі, без порушень режиму роботи і справному обладнанні.

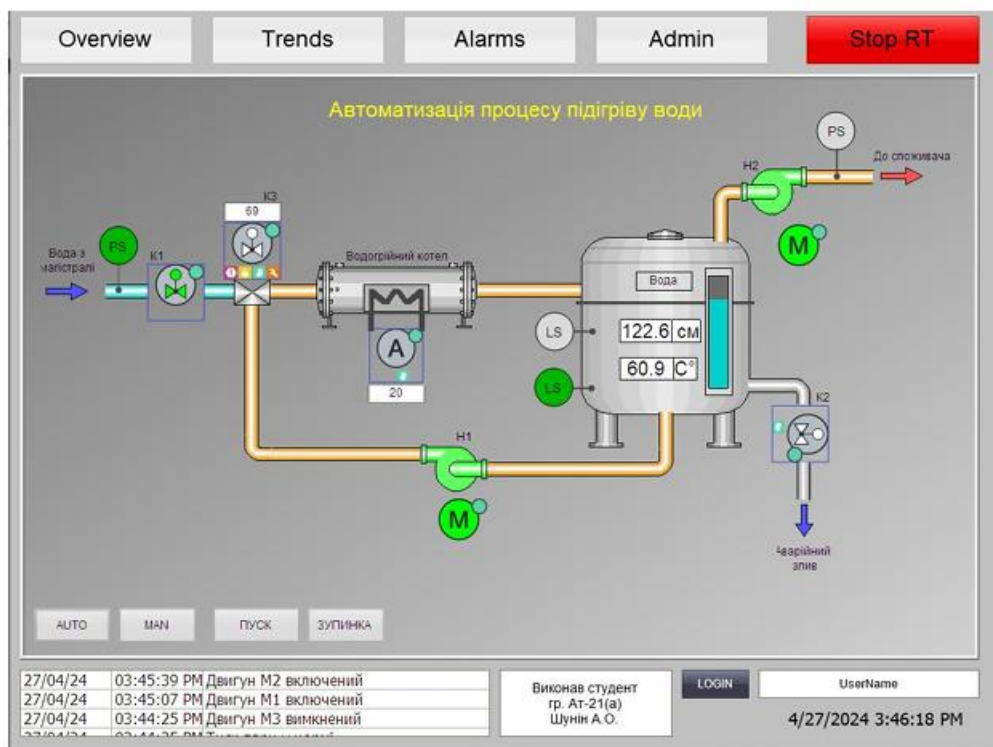


Рисунок 6. – Загальний вигляд екрану «Мнемосхема ділянки» при нормальній роботі

Для реєстрації змін основних технологічних параметрів в АРМ передбачено вікна побудови графіків зміни температури та рівня (рис. 7).

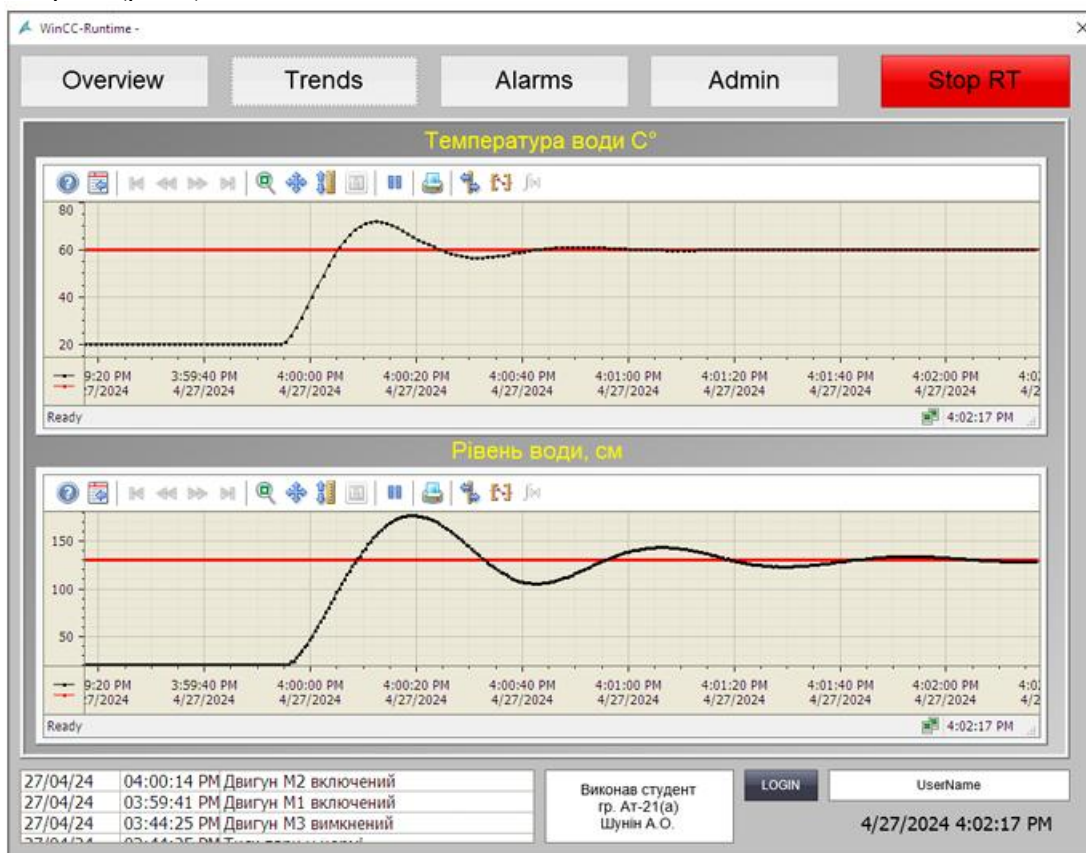


Рисунок 7. – Графіки зміни температури та рівня води

АРМ дозволяє контролювати хід технологічного процесу, задавати режими роботи, здійснювати перемикання режимів керування обладнанням (АВТ / РУЧ) і керувати в ручному режимі обладнанням, відображати динаміку зміни

технологічних параметрів, вести журнали подій, проводити адміністрування користувачів програми.

Розроблено комплект проектної документації; розглянуто заходи охорони праці. Основу інтелектуального ядра системи керування складає контролер WAGO 750 8212 та комп'ютер із SCADA-системою WinCC. Комплект проектної документації включає схему автоматизації; принципову електричну схему підключення до блоку дискретних входів ПЛК; принципову електричну схему підключення до блоку дискретних виходів ПЛК; принципову електричну схему підключення до блоку DO/DA ПЛК. Здійснено економічний розрахунок який показав, що пропонується зміна конструкції нагрівача є доцільною, тому що строк окупності інвестицій становить менш одного року, а чистий дохід - більше нуля.

Висновки

Проведено опис технологічного процесу підігрівання води.

Виявлено потенційні джерела підвищення економічної ефективності.

Проведено конкретизацію задачі модернізації САК.

Здійснено параметризацію ТП, виявлено параметри середовищ ТП, що змінюються в ході процесу, розроблено параметричну схему ТП.

Оцінено існуючий рівень реалізації функцій логічного (логіко-програмного) керування, обрано кінцеві економічні цілі, яких можна досягти за допомогою модернізації системи.

Розроблено моделі статистики та динаміки по каналах керування та моделі вхідних дій; проведена перевірка, підтвердила відповідність отриманих моделей експериментальним даним.

Розроблено САР базової структури з ПІ та ПД – регуляторами; при їх порівнянні САР базової структури з ПД регулятором виявилася кращою.

Розроблено САР підвищеної динамічної точності (ПДТ); при порівнянні САР базової структури з ПД- регулятором та САР ПДТ виявилось, що підвищення динамічної точності дає покращення показників якості регулювання у порівнянні з САР базової структури, тому САР підвищеної динамічної точності використовувати доцільно.

Розроблено алгоритми логіко-програмного керування технологічним процесом, які в подальшому використовувалися для розробки технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом підігрівання води; здійснено вибір промислового контролера та його блоків вводу/виводу, в середовищі CoDeSys; розроблено програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання; проведено їх перевірку, яка засвідчила роботоспроможність програм та їх відповідність алгоритмам керування.

Здійснено вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів.

В середовищі WinCC flexible розроблено програмне забезпечення АРМ оператора і наладчика САК процесу керування підігріванням води, яке дозволяє контролювати хід технологічного процесу, задавати режими роботи, здійснювати перемикання режимів керування обладнанням (АВТ / РУЧ) і керувати в ручному режимі окремим обладнанням, відображати динаміку зміни технологічних параметрів, вести журнали подій, проводити адміністрування користувачів програми.

Основу інтелектуального ядра системи керування складає контролер WAGO 750 8212 та комп'ютер із SCADA-системою WinCC.

Розроблений комплект проектної документації включає схему автоматизації; принципові електричні схеми підключення до блоку дискретних входів та виходів ПЛК; принципову електричну схему підключення до блоку дискретних виходів ПЛК; принципову електричну схему підключення до блоку DO/DA ПЛК.

Економічний розрахунок показав, що пропонується зміна конструкції нагрівача є доцільною.

Список використаних джерел

1. Обладнання для нагрівання води/ Офіційний сайт компанії OASE GmbH in Ukraine [Електронний ресурс].- URL: <https://oase-ukraine.com/ua/oborudovanie-dlya-basseynov/oborudovanie-dlya-nagreva-vody/>.
2. Shen G., et al. A data-driven electric water heater scheduling and control system using robust MPC [Електронний ресурс] // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – №236. – С. 114060. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821002085>.
3. Booyesen M. J. How much energy can optimal control of domestic water heating save? [Електронний ресурс] // *Energy for Sustainable Development*. – 2019. – №52. – С. 44–55. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082618306562>.
4. Cejudo C. E., et al. Domestic Hot Water Temperature Maintenance (HWTM) Systems [Електронний ресурс] / Technical Report. – PNNL, 2021. – PNNL-SA-156938. – URL: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-SA-156938.pdf.
5. Rahmadini V. F. Design of Water Heater Temperature Control System using PID Control [Електронний ресурс] // *EJournal CSOL*. – 2023. – №2(1). – С. 41–47. – URL: <https://ejournal.csol.or.id/index.php/csol/article/viewFile/41/62>.
6. Temperature control system for a water heater [Електронний ресурс] // US Patent US7798107B2. – 2010. – URL: <https://patents.google.com/patent/US7798107B2/en>.
7. Improved Water Heater Device with TRIAC and Method of Control [Електронний ресурс]// Patent Application. – 2023. – URL: <https://patents.justia.com/patent/20230064869>.

8. DOE. Grid-interactive Water Heater Control [Електронний ресурс]// U.S. Department of Energy. – 2021. – URL: <https://www.energy.gov/oe/articles/dairyland-power-cooperative-comments>.
9. Мазурок Є. М. Автоматизація систем гарячого водопостачання [Електронний ресурс]. – Львів: ЛНАУ, 2024. – 78 с. – URL: https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/1730/1/Mazurok_bak.pdf.
10. Система обліку в резервуарах [Електронний ресурс]/ Офіційний сайт компанії TGE System Ukraine. – URL: <https://tgesystem.com.ua/products/measuring-instruments/tank-gauging-system.html>.
11. Шунін А.О. Автоматизація підігріву води на підприємстві «ТОВ Теплоенергоналадка» (рукопис).- Одеса: ОНТУ, 2024.- 156 с.

References

1. Obladnannia dlia nahrivannia vody/ Ofitsiyniy sait kompanii OASE GmbH in Ukraine [Elektronnyi resurs].- URL: <https://oase-ukraine.com/ua/oborudovanie-dlya-basseynov/oborudovanie-dlya-nagreva-vody/>.
2. Shen G., et al. A data-driven electric water heater scheduling and control system using robust MPC [Elektronnyi resurs] // Energy Conversion and Management. – 2021. – №236. – S. 114060. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821002085>.
3. Booyesen M. J. How much energy can optimal control of domestic water heating save? [Elektronnyi resurs] // Energy for Sustainable Development. – 2019. – №52. – S. 44–55. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082618306562>.
4. Cejudo C. E., et al. Domestic Hot Water Temperature Maintenance (HWTM) Systems [Elektronnyi resurs] / Technical Report. – PNNL, 2021. – PNNL-SA-156938. – URL: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-SA-156938.pdf.
5. Rahmadini V. F. Design of Water Heater Temperature Control System using PID Control [Elektronnyi resurs] // EJournal CSOL. – 2023. – №2(1). – S. 41–47. – URL: <https://ejournal.csol.or.id/index.php/csol/article/viewFile/41/62>.
6. Temperature control system for a water heater [Elektronnyi resurs] // US Patent US7798107B2. – 2010. – URL: <https://patents.google.com/patent/US7798107B2/en>.
7. Improved Water Heater Device with TRIAC and Method of Control [Elektronnyi resurs]// Patent Application. – 2023. – URL: <https://patents.justia.com/patent/20230064869>.
8. DOE. Grid-interactive Water Heater Control [Elektronnyi resurs]// U.S. Department of Energy. – 2021. – URL: <https://www.energy.gov/oe/articles/dairyland-power-cooperative-comments>.
9. Mazurok Ye. M. Avtomatyzatsiia system hariachoho vodopostachannia [Elektronnyi resurs]. – Lviv: LNAU, 2024. – 78 s. – URL: https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/1730/1/Mazurok_bak.pdf.
10. Systema obliku v rezervuarakh [Elektronnyi resurs]/ Ofitsiyniy sait kompanii TGE System Ukraine. – URL: <https://tgesystem.com.ua/products/measuring-instruments/tank-gauging-system.html>.
11. Shunin A.O. Avtomatyzatsiia pidihrivu vody na pidpriemstvi «TOV Teploenerhonaladka» (rukopys).- Odesa: ONTU, 2024.- 156 s.

Спосіб автоматичного керування процесом підігрівання води

Корисна модель відноситься до теплової обробки води, а саме до способу автоматичного керування процесом підігрівання води і може бути використана в теплоенергетиці при одержанні гарячої води (рідини) у пристроях для її підігріву.

Відомий спосіб автоматичного керування процесом підігрівання води, який містить регулювання температури води в резервуарі зміною електричної потужності проточного електронагрівача [Обладнання для нагрівання води/ Офіційний сайт компанії OASE GmbH in Ukraine [Електронний ресурс].- URL: <https://oase-ukraine.com/ua/oborudovanie-dlya-basseynov/oborudovanie-dlya-nagreva-vody/>].

Недоліком даного способу є низька надійність відкачування нагрітої води з резервуара, оскільки рівень води в резервуарі не регулюють.

Найбільш близьким до запропонованого, обраним за прототип є відомий спосіб автоматичного керування процесом підігрівання води, який містить регулювання температури гарячої води в резервуарі шляхом зміни електричної потужності електронагрівача, а також регулювання рівня гарячої води в резервуарі шляхом зміни швидкості обертання ротора насоса, що відкачує гарячу воду з резервуару [Система обліку в резервуарах / Офіційний сайт компанії TGE System Ukraine. – URL: <https://tgesystem.com.ua/products/measuring-instruments/tank-gauging-system.html>].

Недоліком даного способу є низька надійність роботи системи підігрівання води через низьку динамічну точність керування цим процесом в результаті шкідливої дії контуру регулювання рівня гарячої води в резервуарі на контур регулювання температури гарячої води в резервуарі.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення надійності роботи системи підігрівання води шляхом підвищення динамічної точності керування цим процесом за рахунок компенсації шкідливої дії контуру регулювання рівня гарячої води в резервуарі на контур регулювання температури гарячої води в резервуарі побудовою автономної системи автоматичного регулювання.

Поставлену задачу вирішено в способі автоматичного керування процесом підігрівання води, який містить регулювання температури гарячої води в резервуарі шляхом зміни електричної потужності електронагрівача, а також регулювання рівня гарячої води в резервуарі шляхом зміни швидкості обертання ротора насоса, що відкачує гарячу воду з резервуару.

Згідно корисної моделі додатково керуючу дію контуру регулювання рівня гарячої води в резервуарі перетворюють та подають на вхід регулятора температури гарячої води в резервуарі, причому перетворення здійснюють таким чином, щоб контур регулювання рівня гарячої води в резервуарі не впливав на контур регулювання температури гарячої води в резервуарі.

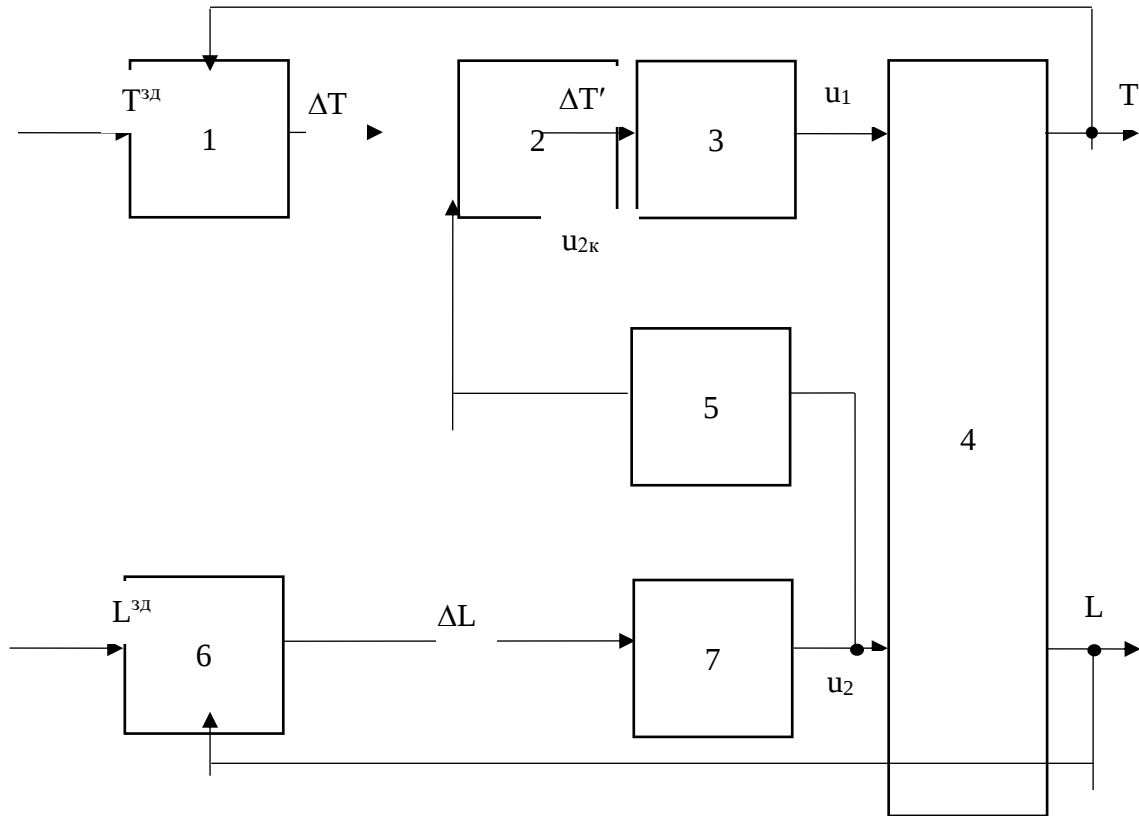
Приклад можливої реалізації запропонованого способу наведено на фігурі. Спосіб здійснюється таким чином.

Поточне значення температури гарячої води в резервуарі T надходить на перший вхід суматора 1, на другий вхід якого подають її задане значення $T^{зд}$. На виході суматора 1 формується помилка регулювання $\Delta T = T^{зд} - T$, яка надходить на перший вхід суматора 2, на виході якого формується сигнал $\Delta T'$, який надходить на вхід регулятора 3, на виході якого формується керуюча дія u_1 – електрична потужність електронагрівача. Керуюча дія u_1 надходить на перший вхід об'єкта керування 4 – резервуара, в який надходить нагріта в електронагрівачі вода, яка насосом відкачується з нього споживачеві. На першому виході об'єкта керування 4 формується сигнал T .

Поточне значення рівня гарячої води в резервуарі L надходить на перший вхід суматора 6, на другий вхід якого подають її задане значення $L^{зд}$. На виході суматора 6 формується помилка регулювання $\Delta L = L^{зд} - L$, яка надходить на вхід регулятора 7, на виході якого формується керуюча дія u_2 – швидкість обертання ротору насоса, що відкачує гарячу воду з резервуару. Керуюча дія u_2 надходить на другий вхід об'єкта керування 4, на другому виході якого формується сигнал L .

Також керуюча дія u_2 надходить на вхід коригуючого блоку 5, який забезпечує незалежність контуру регулювання температури гарячої води в резервуарі від контуру регулювання рівня гарячої води в резервуарі. З виходу коригуючого блоку 5 сигнал $u_{2к}$ надходить на другий вхід суматора 2.

**Спосіб автоматичного керування
процесом підігрівання води**



Фігура

Формула корисної моделі

Спосіб автоматичного керування процесом підігрівання води, який містить регулювання температури гарячої води в резервуарі шляхом зміни електричної потужності електронагрівача, а також регулювання рівня гарячої води в резервуарі шляхом зміни швидкості обертання ротора насоса, що відкачує гарячу воду з резервуару, **який відрізняється тим, що** додатково керуючу дію контуру регулювання рівня гарячої води в резервуарі перетворюють та подають на вхід регулятора температури гарячої води в резервуарі, причому перетворення здійснюють таким чином, щоб контур регулювання рівня гарячої води в резервуарі не впливав на контур регулювання температури гарячої води в резервуарі.

Реферат

Спосіб автоматичного керування процесом підігрівання води

Корисна модель відноситься до теплової обробки води, а саме до способу автоматичного керування процесом підігрівання води і може бути використана в теплоенергетиці при одержанні гарячої води (рідини) у пристроях для її підігріву.

Спосіб автоматичного керування процесом підігрівання води містить регулювання температури гарячої води в резервуарі шляхом зміни електричної потужності електронагрівача, а також регулювання рівня гарячої води в резервуарі шляхом зміни швидкості обертання ротора насоса, що відкачує гарячу воду з резервуару, додатково керуючу дію контуру регулювання рівня гарячої води в резервуарі перетворюють та подають на вхід регулятора температури гарячої води в резервуарі, причому перетворення здійснюють таким чином, щоб контур регулювання рівня гарячої води в резервуарі не впливав на контур регулювання температури гарячої води в резервуарі.

Порядковий номер заявки, визначений заявником		Дата одержання		
[22] Дата подання заявки	Пріоритет	[51] МПК	ЕВ	[21] Номер заявки
		F24H 1/52		
[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)	
Шунін Артем Олександрович				
(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))				
Просту (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 підігрівання води				
Адреса для листування, прізвище або найменування адресата Вул. Ярослава Баїса, буд. 4, кв. 106, Одеса – 65086, Україна, UA Телефон _____ Е-mail: _____ Факс _____				
[74] Повне ім'я та реєстраційний номер представника у справах інтелектуальної власності прізвище або повне ім'я іншої довіреної особи				

☐ Просту (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	3	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 VOIB ST.3 (для іноземних осіб - тільки код держави)		Підпис(и) винахідника(ів)- заявника(ів)
Шунін Артем Олександрович	Вул. Ярослава Баїса, буд. 4, кв. 106, Одеса – 65086, 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)		

ДОДАТОК Д

Вихідний код конвертованих модулів регулятора та нейронної мережі

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                : Shun1
* Model version              : 1.2
* Model creator              : Shun 1
* Model last modified by    : Shun 1
* 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) 29-Dec-2012
* 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((-
0.067898316 * rtb_Gain11) + 0.08467838467807272) * -2.0) + 1.0))
*
2.0) - 1.0) * -1.6987824549188) + (((1.0 / (EXP((-
0.002755 * rtb_Gain11) + 4.38531064233) * -2.0) +
1.0)) * 2.0) - 1.0) * -0.4459863370057517)) +
0.30679) * -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 [IEC61131-3](#). Призначена для програмування промислових [контролерів](#) і операторських станцій. Основою St-програми є вираження. Вираження складаються з операндів (констант і змінних) і операторів.