

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



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему: «Підвищення ефективності автоматичного керування
процесом сушіння цементних блоків»

Здобувач: Корнаєв Д.І.
2 курс, група Ам-20

Керівник: доцент Світий І.М.

Консультанти:
доцент Гурський О.О.
доцент Жигайло О.М.

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 ім. П.М. Платонова</u> .
Кафедра	<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 **Корнаєв Дмитро Ігорович**

- Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом сушіння цементних блоків»
- Керівник кваліфікаційної роботи Світий Іван Миколайович, к.т.н., доцент. Пункти 1 і 2 затверджені наказом ОНТУ № 39-03 від 24.01.2025 р.
- Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи на кафедру «12» червня 2026 р.
- Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: матеріали виконаних індивідуальних завдань (ІЗ) виробничої практики, кваліфікаційної роботи бакалавра, дослідницької практики, курсових та самостійних робіт, виконаних відповідно до ІЗ.
- Зміст кваліфікаційної роботи (розділи, які потрібно розробити):
 Вступ (актуальність роботи, зв'язок з науковими напрямками робіт університету, мета та задачі дослідження, об'єкт та предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів, практичне значення отриманих результатів, апробація результатів роботи, публікації, структура та об'єм роботи).
 Розділ 1. Технологічний процес керування процесом витоку зерна, 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.
 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	Жигайло О.М. 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	Степанов М.Т. 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.	виконано
Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування	«27» березня 2026 р.	виконано
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП	«06» квітня 2026 р.	виконано
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	«17» квітня 2026 р.	виконано
Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	«20» травня 2026 р.	виконано
Реалізація та підготовка до впровадження результатів роботи	«29» травня 2026 р.	виконано
Оформлення додатків та роботи в цілому	«01» червня 2026 р.	виконано
Задача роботи на перевірку керівникові, виправлення зауважень, підпис керівника	«05» червня 2026 р.	виконано
Брошування роботи, представлення її завідувачу кафедри, підпис, направлення роботи на зовнішнє рецензування та захист у ЕК	«12» червня 2026 р.	виконано

Здобувач: Корнаєв Д.І.

Керівники роботи: Світій І.М.

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

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

Здобувач: Корнаєв Д.І.

Реферат

Кваліфікаційна робота магістра Корнаєва Дмитра Ігоровича «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом сушіння цементних блоків» викладена на 162 сторінках, кількість таблиць – 10, рисунків – 130, додатків – 3, джерел з переліку посилань – 22.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена дослідженню системи автоматичного керування (САК) процесу сушіння бетонних блоків з метою удосконалення алгоритмів керування, що повинно гарантувати якість готових бетонних блоків, зменшити питомі енерговитрати, за рахунок впровадження інтелектуальних алгоритмів гарантуючого керування, на основі апарату нечіткої логіки та нейронних мереж. Проаналізована поведінка САК процесом сушіння бетонних блоків типової структури. Виявленні основні недоліки її роботи.

Проведено аналіз особливостей технологічного процесу сушіння бетонних блоків як об'єкту керування. Проведено структурний аналіз та синтез САК процесу підвищеної динамічної точності. Запропоновано удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання систем автоматичного керування (САК) на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж. Проведено синтез САК процесом сушіння бетонних блоків з використанням інтелектуальних алгоритмів гарантуючого керування. У роботі проведено низку порівняльних аналізів САР базової структури та САК, що реалізує каскадну структуру.

Результати дослідження можуть бути використані на підприємствах виробництва будівельних матеріалів.

Ключові слова: сушіння бетонних блоків, камерах термовологої обробки та сушіння бетонних блоків, система керування, математична модель, підвищення ефективності, підвищена динамічна точність, нечітка логіка, нейронний регулятор, каскадна САР, автономна САР.

Зміст

Перелік умовних позначень.....	8
Вступ.....	9
Розділ 1. Технологічний процес теплової обробки залізобетонних виробів з використанням теплогенератора та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.....	14
1.1 Опис технологічного процесу та його особливості.....	14
1.2 Параметризація схеми технологічного процесу й загальна характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.....	16
1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкту керування.....	21
1.4 Наявний комплекс математичних моделей процесу термічної обробки залізобетонних виробів.....	22
1.5 Базова структура й алгоритми САК ТП теплової обробки залізобетонних виробів.....	24
1.6 Висновки за розділом.....	30
Розділ 2. Удосконалення САР на основі розвитку її алгоритмічної структури.....	31
2.1 Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності.....	31
2.2 Визначення недоліків існуючих САК і формулювання мети удосконалення систем автоматичного керування процесом термічної обробки залізобетонних виробів.....	39
2.3 Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САК процесом термічної обробки залізобетонних виробів.....	40
2.4 Висновки за розділом.....	45
Розділ 3. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж.....	46

3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління, побудованих на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого об'єкта керування.....	46
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійною характеристикою.....	47
3.3 Параметричний синтез САУ з традиційним ПІД регулятором для об'єкта який характеризується нелінійною характеристикою каналу регулювання.....	49
3.4 Розробка моделі САУ з апаратом нечіткої логіки для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	52
3.5 Застосування нечіткої логіки для підстроювання коефіцієнтів ПІД-регулятора.....	62
3.6 Порівняльний аналіз функціонування САУ з традиційним ПІД-регулятором і САУ з нечітким регулятором.....	68
3.7 Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів управління.....	74
3.8 Розробка моделі САУ на основі штучних нейронних мереж.....	76
3.9 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором.....	89
3.10 Аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють.....	94
3.11 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.....	96
3.12 Висновки за розділом.....	100
Розділ 4. Удосконалення САР на основі розвитку її функціональної структури.....	102
4.1 Обґрунтування нових функцій, що мають бути реалізовані САК процесом теплової обробки залізобетонних виробів.....	102
4.2 Загальні принципи побудови САР каскадної структури.....	106
4.3 Розробка структурної схеми модернізованої САК.....	108

4.4 Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів керування.....	111
4.5 Доопрацювання математичної моделі ОК для вирішення задачі регулювання.....	112
4.6 Розробка імітаційної моделі каскадної САР температури бетону та дослідження її роботи.....	114
4.7 Висновки за розділом.....	128
Розділ 5. Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи на підприємстві.....	130
5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми керування процесом теплової обробки залізобетонних виробів і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.....	130
5.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.....	136
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	146
5.4 Висновки за розділом.....	146
Висновки.....	147
Перелік джерел.....	151
Додатки.....	153
Додаток А. Патент на корисну модель.....	153
Додаток Б. Наукова стаття.....	154
Додаток В. Вихідний текст модулю ПД регулятора.....	162

Перелік умовних позначень

ТП – технологічний процес;

ПП – перехідний процес;

ПХ - перехідна характеристика;

ОК – об’єкт керування;

САР – система автоматичного регулювання;

САК – система автоматичного керування;

ПДТ – підвищена динамічна точність;

НМ – нечіткі множини;

НР – нейронний регулятор;

ШНМ – штучна нейронна мережа;

ЗБВ – залізобетонні вироби.

Вступ

На теперішній час для існування та успішного розвитку, підприємство повинно отримувати достатньо високий і стабільний прибуток. Зрозуміло, що основний прибуток підприємство отримує від реалізації продуктів його виробництва. Для того, щоб даний прибуток був найбільшим, продукція, яка виробляється даним підприємством, має бути конкурентоспроможною, тобто, підприємство повинно вести ефективну економічну боротьбу на ринку. Для підвищення конкурентоспроможності продукції що випускається, основним методом можна вважати зниження собівартості продукції і підвищення її якості. На даний час підприємство використовує сучасне обладнання, але не досить модернізовану САК. Відповідно, за рахунок модернізації призведе до підвищення якості продукції і поліпшення управління ТП.

В якості технологічного агрегату теплової обробки залізобетонних виробів застосовують, зокрема, теплогенератор. При веденні цього процесу треба підтримувати температуру та розрідження в камері теплової обробки .

Основним шляхом до досягнення цієї мети – це застосування модернізації в САК. Для оснащення теплогенератора якісною системою автоматичного регулювання температури та розрідження в камері теплової обробки була побудована математичну модель процесу. Задоволення вимог технології до якості регулювання може бути забезпечено шляхом підвищення інтелектуального рівня системи автоматичного регулювання цих технологічних параметрів.

Актуальність теми. Залізобетонні вироби є однією з базових складових сучасного будівництва та інфраструктурного розвитку, оскільки широко застосовуються у житловому, промисловому, транспортному та соціальному будівництві. Від їх якості, міцності та довговічності безпосередньо залежить надійність будівель і споруд, безпека експлуатації та рівень комфорту життя населення. У зв'язку з цим виробництво бетонних і залізобетонних виробів відіграє важливу роль як у забезпеченні потреб суспільства, так і в розвитку

промислового сектору економіки.

В умовах ринкової економіки ефективне функціонування підприємств з виробництва бетонних виробів можливе лише за умови випуску конкурентоспроможної продукції, що поєднує високу якість із мінімальними витратами енергоносіїв і ресурсів. Одним із ключових етапів технологічного процесу виготовлення бетонних блоків є їх теплова обробка (сушіння), яка визначає формування фізико-механічних властивостей готового виробу. Порушення регламенту за температурою та розрідженням в камері теплової обробки призводить до зниження якості продукції, перевитрат енергії та зростання собівартості.

Практика експлуатації показує, що використання сучасного технологічного обладнання без відповідного рівня автоматизації систем керування не дозволяє повною мірою реалізувати його потенціал. Досягнення високої енергоефективності, стабільності технологічних режимів і гарантованої якості готової продукції можливе лише за рахунок впровадження ефективних систем автоматичного керування (САК) технологічним процесом. Зокрема, при тепловій обробці бетонних виробів важливим є точне та узгоджене регулювання температури й розрідження, що реалізується із застосуванням САК теплогенератором.

Підвищення вимог до якості регулювання зумовлює необхідність використання математичного моделювання, сучасних алгоритмів автоматичного регулювання та інтеграції апаратних і програмних засобів автоматизації в єдину систему. У цьому контексті актуальним є розробка та впровадження сучасної САК теплогенератором, що забезпечує підвищення якості керування технологічним процесом, зниження енерговитрат і покращення техніко-економічних показників виробництва. Таким чином, дослідження, спрямоване на автоматизацію процесу сушіння бетонних блоків із використанням сучасних засобів і методів автоматичного керування, є актуальним та має практичну значущість для підприємств будівельної індустрії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Одеському національному технологічному університеті (ОНТУ) та відповідає напрямку №4 наукової діяльності ОНТУ «Створення нового високоефективного обладнання, автоматизація виробничих процесів харчових і зернопереробних виробництв».

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу сушіння будівельних блоків та зменшення енергетичних витрат за рахунок підвищення динамічної точності САК цим процесом.

Для реалізації поставленої мети було виконано такі завдання:

- опис ділянки технологічного процесу тепловлі обробки залізобетонних виробів, її агрегатів та існуючого рівня автоматизації керування ними;
- виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК;
- конкретизація задачі дотримання регламентів технологічного процесу теплової обробки залізобетонних виробів;
- розробка і реалізація комплексу його моделей як об'єкта керування (ОК);
- розробка і параметрична оптимізація алгоритмів регулювання, порівняльний аналіз САР; отримання цифрових аналогів обраних алгоритмів;
- конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування технологічним процесом теплової обробки залізобетонних виробів;
- вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів;
- розробка контролерно-комп'ютерної мережі; програмування алгоритмів регулювання та логічного керування;
- розробка SCADA системи для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.
- розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК
- попереднє обґрунтування економічної доцільності реалізації проекту та розробка заходів з охорони праці.

Об'єкт дослідження – керований технологічний процес теплової обробки залізобетонних виробів (ЗБВ) з використанням теплогенератора ТОК-1А.

Предмет дослідження – системи автоматичного керування технологічним процесом теплової обробки ЗБВ, включаючи моделі процесу як об'єкта керування.

Методи 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.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше обґрунтовано:

- доцільність аналізу процесу теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора як об'єкту керування;
- загальну концепцію побудови САК підвищеної динамічної точності (автономної і каскадної структури) для процесу теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора;
- вперше формалізовано алгоритм нейромережевого керування процесом теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора на основі задачі нечіткого керування;
- отримала подальший розвиток методика перетворення нечіткого регулятора до нейромережевого алгоритму керування на основі дослідження процесу керування тепловою обробкою ЗБВ;

вперше розроблено:

- комплекс моделей процесу теплової обробки ЗБВ як об'єкту регулювання;
- структуру та імітаційну модель системи нейромережевого керування тепловою обробкою ЗБВ з використанням теплогенератора на основі задачі нечіткого керування;

– варіанти алгоритмів регулювання базової структури та підвищеної динамічної точності для САК процесом теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора.

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

–підвищення ефективності процесу теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора;

–зниження втрат ЗБВ через брак готової продукції;

–підвищення економічної ефективності роботи теплогенератора обробки ЗБВ;

–можливості застосування розроблених та відтворених у імітаційному середовищі підходів до створення САК, включаючи їх функціональний склад, структури та алгоритми підсистем, для підвищення продуктивності процесу теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора;

–застосування розробленої імітаційної моделі для подальшого удосконалення САК процесом теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора, а також технології та досвіду розробки цієї моделі для створення моделей процесів інших типів.

Особистий внесок здобувача: сформульовано найбільш загальні особливості процесу теплової обробки залізобетонних виробів з використанням теплогенератора як об'єкта керування, його структура і задачі керування; обґрунтовано сукупність функцій робочого місця дослідника процесу теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора; побудовано концептуальну структуру процесу теплової обробки ЗБВ, розкрито взаємозв'язки між змінними процесу; властивості його каналів регулювання; обґрунтовано алгоритми ідентифікації моделі процесу; модель реалізована в середовищі імітаційного моделювання Matlab; обґрунтовано її адекватність; обґрунтовано функціональну структуру САК; її альтернативні структури, алгоритми керування; розроблені та дослідженні варіанти САК з нечітким регулятором, нейронним регулятором та САК підвищеної динамічної точності.

Розділ 1. Технологічний процес теплової обробки залізобетонних виробів з використанням теплогенератора та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування

1.1 Опис технологічного процесу та його особливості

Суть технологічного процесу – це цілеспрямоване перетворення продуктових і енергетичних потоків у спеціальному технологічному устаткуванні (ТУ) (машинах, апаратах, агрегатах). Технологічна схема процесу теплової обробки залізобетонних виробів з використанням теплогенератора наведена на рис. 1.1.

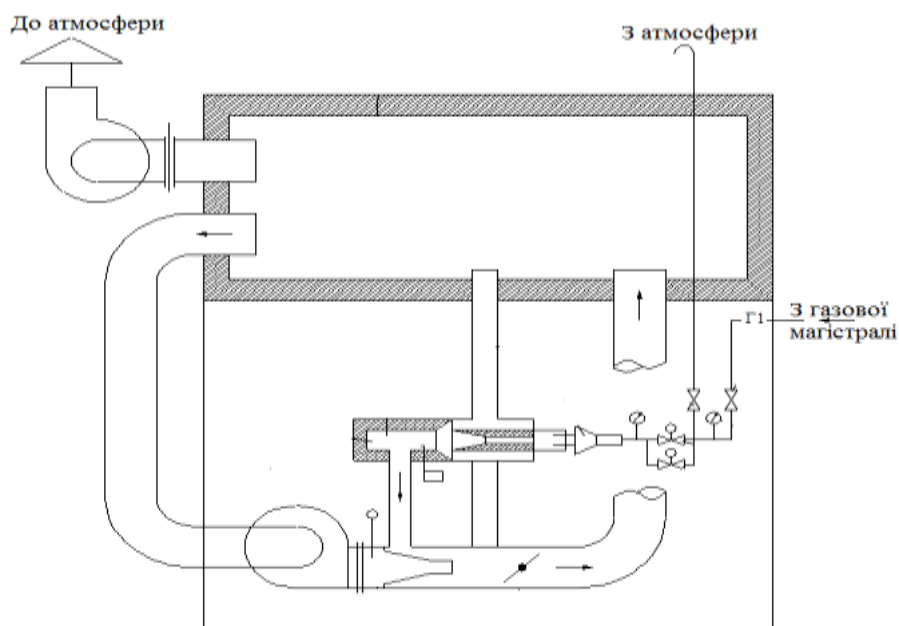


Рис. 1.1 – Технологічна схема керування процесом теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора

Технологічний процес теплової обробки ЗБВ зводиться до тепловолісної їх обробки в камері періодичної дії. Отримання тепла для процесу здійснюється у теплогенераторі, де спалюється газ в потоці атмосферного повітря. Продукти згоряння змішуються з газами рециркуляції з камери. Циркуляцію сушильного агента забезпечує циркуляційний

вентилятор. Видалення надлишкової вологи з камери забезпечує витяжний вентилятор, продуктивність якого забезпечується засувкою.

Оптимальний режим для камери сушіння - це підтримка стабільного невеликого розрідження (порядку $-10\ldots-50$ Па). Якщо в камері виникне навіть невеликий надлишковий тиск, розпечене вологе повітря та пара почнуть з усіх щілин і через ущільнення дверей вириватися назовні - в цех. Це призведе до корозії несучих конструкцій цеху, псування електроніки, порушення мікроклімату для персоналу. Якщо зробити розрідження занадто сильним (наприклад, через надмірну тягу витяжного вентилятора), в камеру через ті ж нещільності почне активно засмоктувати холодне повітря з цеху. Це призведе до появи холодних зон в камері. Блоки, що знаходяться ближче до дверей або підлоги, недоотримають тепла, сповільниться гідратація, і на виході ви отримаєте партію з нерівномірною міцністю (брак продукції). Крім того, різко зростуть витрати на нагрів цього паразитного повітря.

На фінальному етапі (власне сушіння та охолодження) система повинна ефективно виводити вологе повітря назовні та заміщати його сухим. Без контролю тиску та балансу між припливом та витяжкою неможливо забезпечити стабільну швидкість сушіння, що може призвести до поверхневого розтріскування блоків.

Але основним фактором який впливає на якість отриманого бетону є підтримання температури бетону в камері на заданому рівні. Саме температури бетону, а не тільки температури повітря в камері теплової обробки. Це обумовлено особливостями процесу теплової обробки бетону.

Процес стандартно ділиться на 4 критичні етапи:

1. Попередня витримка (1–4 години): Блоки знаходяться при кімнатній температурі. Бетон повинен схопитися, щоб капіляри зафіксувалися, інакше теплове розширення води зруйнує структуру.

2. Нагрів (прискорення реакцій): Температура піднімається зі швидкістю не більше $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$ на годину до цільових $60 - 80^{\circ}\text{C}$ (для автоклавного

твердіння – потрібно вище). Швидке нагрівання викликає температурні напруження.

3. Ізотермічне витримане нагрівання: основний етап набору міцності. Відносна вологість повітря повинна підтримуватись на рівні 90–100%. Вода має активно випаровуватися; тепло потрібне для прискорення гідратації.

4. Охолодження та сушка: повільне зниження температури (теж близько 20 °С на годину) з поступовим зниженням вологості для видалення надмірної «вільної» вологи.

Технічні характеристики теплогенератора ТОК-1А

Номінальна теплова потужність МДж / год - 780

Коефіцієнт надлишку повітря пальника - 02 - 1,08

Коефіцієнт робочого регулювання по тепловій потужності -3,2

Номінальний тиск газу перед пальником, кПа-105 ± 25

Температура на виході теплоносія з теплогенератора, 180 °С

Швидкість теплоносія на виході з теплогенератора, м / с -25

Продуктивність вентилятора, м3 / с, (м3 / ч)- 1,95 (7000)

Габарити, мм: теплогенератора -2720 '590' 1200

Маса, кг: теплогенератора – 510 кг

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

Мета ведення процесу – отримання заданих продуктів із заданими властивостями (показниками якості). При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдане лише тоді (тобто ТП має сенс реалізувати), коли виконується низка вимог до ТП.

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

Проведемо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на рис. 1.2.

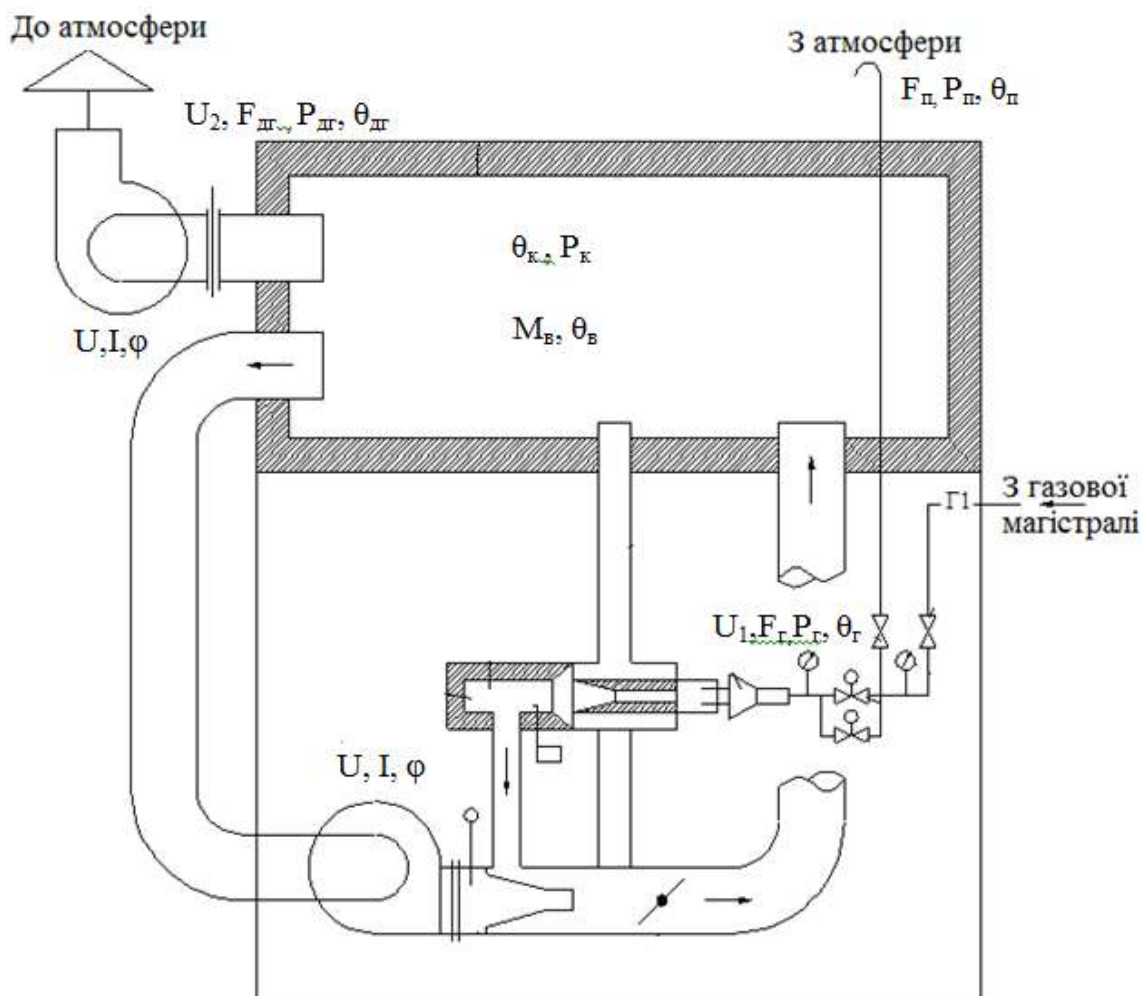


Рис. 1.2 – Параметризована технологічна схема процесу теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора

Позначення на параметризованій технологічній схемі:

$\theta_{в}$ - температура виробу;

$M_{в}$ – вологість виробу;

$\theta_{к}$ - температура в камері теплової обробки;

$P_{к}$ - розрідження в камері теплової обробки;

$F_{г}$ - витрати газу;

$P_{г}$ - тиск газу в магістралі;

$\theta_{г}$ - температура газу;

$F_{\text{п}}$ – витрати повітря;

$P_{\text{п}}$ - тиск повітря;

$\theta_{\text{п}}$ - температура повітря;

$\theta_{\text{дг}}$ - температура димових газів;

$P_{\text{дг}}$ – тиск димових газів;

$F_{\text{дг}}$ - витрата димових газів;

U_1 - положення регулюючого органу подачі газу;

U_2 - положення регулюючого органу відводу димових газів;

U, I, φ - параметри двигунів;

Основу нормативів становлять три основних регламенти.

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

Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналу технологічних параметрів. Для технологічного процесу теплової обробки залізобетонних виробів такими параметрами є температура в камері теплової обробки ($\theta_{\text{к}}$) та розрідження в камері теплової обробки ($P_{\text{к}}$).

Експлуатаційний регламент - визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів технологічного обладнання. Для теплогенератора таким параметром є струм двигунів I .

Техніко-економічний та екологічний регламент - визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір номінальних і гранично-допустимих значень техніко-економічних та екологічних параметрів. До цієї групи параметрів можна віднести витрату газу $F_{\text{г}}$, димових газів $F_{\text{дг}}$, повітря $F_{\text{п}}$, а також температуру газу $\theta_{\text{г}}$ та димових газів $\theta_{\text{дг}}$.

Відхилення параметрів технологічного процесу від регламентних значень, які викликаються зміною параметрів, що характеризують умови

ведення процесу навіть при досить ефективному управлінні процесом, можуть перевищувати встановлені допуски. Залежно від наслідків, можна виділити два характерних типи таких порушень:

а) технологічний процес не припиняється, вихід за допуски ліквідується з плином часу, наприклад, за рахунок управління процесом;

б) технологічний процес припиняється повністю або частково, для його поновлення часто необхідна підготовка обладнання до повторного запуску (видалення сировини з машин, чистка робочих органів, їх заміна і т.д.).

Дуже різко впливає на якість залізобетонних виробів надлишкова або недостатня температура та розрідження в камері теплової.

При недостатній температурі в камері теплової обробки якість залізобетонних виробів погана, що може привести до недоготовності виробів.

При надмірній температурі в камері теплової обробки є загроза пересихання виробів, що веде за собою до економічних збитків.

Допуски на відхилення поточних (режимних) значень регламентованих параметрів від номінальних прийнято поділяти і задавати у вигляді допусків на тривалі і короткочасні відхилення.

Тривало допустимі відхилення визначають зону незначущих для даного процесу відхилень (ЗНО) розглянутого параметра. У середині цієї зони значення параметра можна вважати приблизно рівним нормативному, тому відхилення, що не виходять з ЗНО, можна не усувати.

Короткочасні допустимі відхилення параметрів перевищують їх ЗНО та призводять до зниження ефективності процесу, тому (як уже зрозуміло з назви) вони допустимі лише обмежений час, який задається і входить до регламенту. Вихід параметрів за зону короткочасно допустимих відхилень свідчить про порушення в технологічному процесі або в експлуатації обладнання, які можуть призвести до аварії. Аналіз нормативів ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання оформимо у вигляді таблиці регламентів 1.1.

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру або ф-ція зміни номінального значення	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі ($t \rightarrow \infty$)	Короткочасні ($0 < t < \infty$)	
				величина	величина	час, сек
Температура в камері теплової обробки	θ_k	$^{\circ}\text{C}$	75	± 1	± 3	100
Розрідження в камері теплової обробки	P_k	Па	15	$\pm 0,2$	± 1	100

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

Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. До цієї групи параметрів віднесемо температуру та вологість залізобетонних виробів (θ_v, M_v).

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного обладнання ззовні і витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів віднесемо тиск газу в магістралі P_r і тиск димових газів $P_{дг}$.

Механічні або інші специфічні параметри технологічного обладнання характеризують стан її робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо положення регулюючих органів, регулюючих подачу газу та відводу димових газів (U_1 і U_2).

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 мету функціонування об'єкту моделювання та додаткових вимог до нього, тобто регламентовані параметри будуть вихідними, а параметри, що відображають умови функціонування об'єкту - 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 представити опосередковано.

Параметрична схема процесу теплової обробки залізобетонних виробів наведена на рис. 1.3.

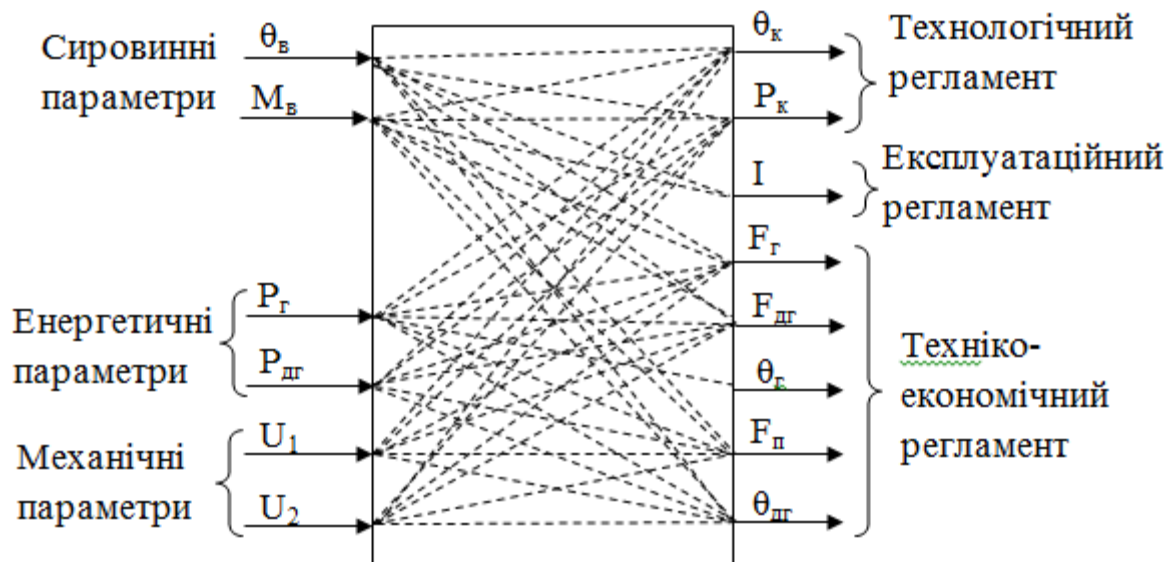


Рис. 1.3 – Параметрична схема процесу теплової обробки залізобетонних виробів

1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкту керування

Задачею функціонування камери теплової обробки, є сушка залізобетонних виробів, тому дотримання всіх регламентів функціонування у її роботі дуже важливе.

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

- Температури в камері теплової обробки ($\theta_{\text{к}}$) ;
- Розрідження в камері теплової обробки ($P_{\text{к}}$);

Таким чином, камеру теплової обробки з точки зору задачі регулювання, можна сказати, що необхідно побудувати 2-х каналну систему автоматизованого регулювання перерахованих параметрів.

Складемо формалізовану координатну схему об'єкта регулювання:

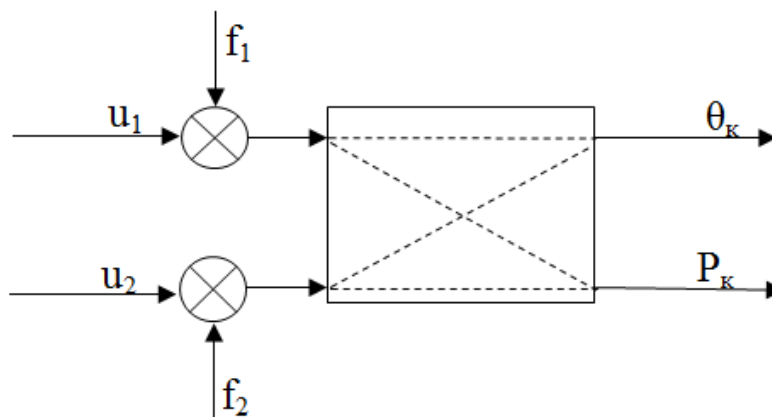


Рис. 1.4 – Структурна схема процесу теплової обробки залізобетонних виробів як об'єкта регулювання

Позначення на структурній схемі:

u_1 - положення регулюючого органу подачі газу;

u_2 - положення регулюючого органу відводу димових газів;

θ_k - температура в камері теплової обробки;

P_k – розрідження в камері теплової обробки;

f_1 - вектор неконтрольованих збурень;

f_2 - вектор неконтрольованих збурень.

1.4 Наявний комплекс математичних моделей процесу термічної обробки залізобетонних виробів

У результаті виконання випускної роботи бакалавра було отримано комплекс математичних моделей статички, динаміки та неконтрольованих збурень процесу **термічної обробки залізобетонних виробів** [5].

Схему моделювання повної моделі ОК наведено на рис. 1.5.

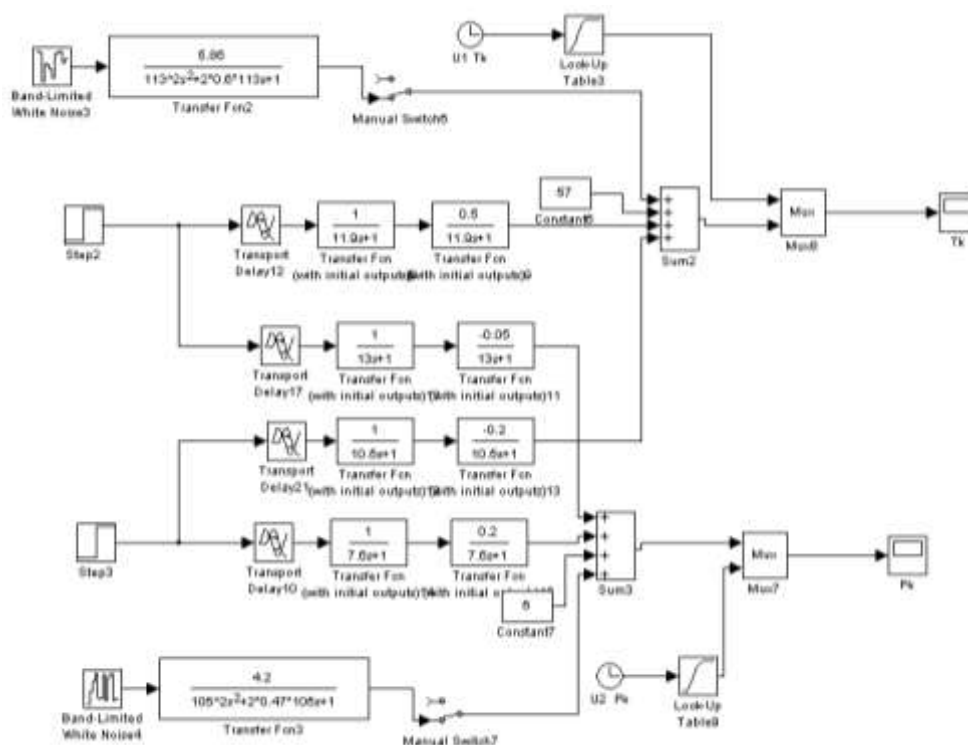


Рис. 1.5 – Схема моделювання повної моделі ОК

Для моделей динаміки за каналом регулювання отримано передаточні функції першого та другого порядку, зведені в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати ідентифікації моделей динаміки каналів ОК

Канал ОК	Модель 1-го порядку	Модель 2-го порядку
« $u_1 - \theta_K$ »	$W_0(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-24,5p}}{18,1p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-17,8p}}{(11,9p + 1)^2}$
« $u_1 - P_K$ »	$W_0(p) = \frac{-0,05 \cdot e^{-20,6p}}{20p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,05 \cdot e^{-13,6p}}{(13p + 1)^2}$
« $u_2 - P_K$ »	$W_0(p) = \frac{0,2 \cdot e^{-13,5p}}{11,8p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,2 \cdot e^{-9,4p}}{(7,6p + 1)^2}$
« $u_2 - \theta_K$ »	$W_0(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-25,7p}}{15,8p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,2 \cdot e^{-19,7p}}{(10,4p + 1)^2}$

Моделі статистики каналів ОК було проідентифіковано, як лінійні:

$$\theta_k = 0,5 \cdot u_1 - 0,2 \cdot u_2 + 57$$

$$P_k = -0,05 \cdot u_1 + 0,2 \cdot u_2 + 6$$

Моделі неконтрольованих збурень було відтворено передаточними функціями формуючих фільтрів:

$$W_{\Phi\Phi1}(p) = \frac{5,86}{12769p^2 + 135,6p + 1}$$

$$W_{\Phi\Phi2}(p) = \frac{4,2}{11025p^2 + 98,7p + 1}$$

1.5 Базова структура й алгоритми САК ТП теплової обробки залізобетонних виробів

У результаті виконання випускної роботи бакалавра було розроблено САР базової структури на основі ПІ та ПІД алгоритмів регулювання [5].

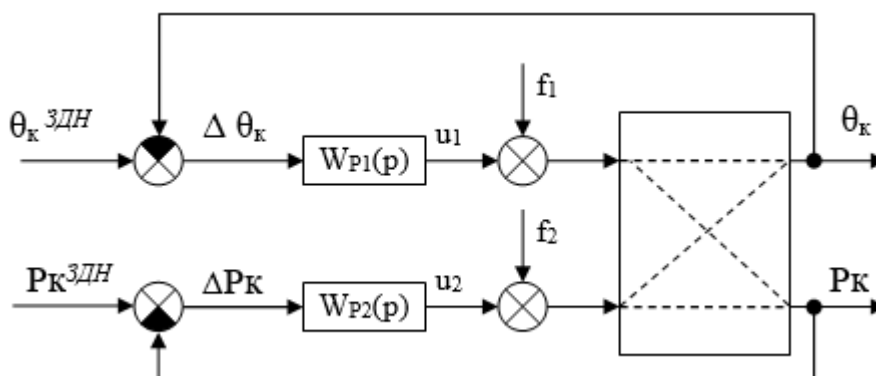


Рис. 1.6 – Структурна схема САР процесу теплової обробки залізобетонних блоків базової структури

Оптимальний параметричний синтез САР проводився за інтегральним квадратичним критерієм:

$$J = \int_0^{T_M} \left[\frac{(\Delta\theta_K)^2}{5} + \frac{(\Delta P_K)^2}{2} \right] dt$$

Передаточна функція ПІ-регулятора:

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

Передаточна функція ПІД-регулятора:

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

Було проведено структурний та оптимальний параметричний синтез САР базової структури на основі ПІ та ПІД алгоритмів регулювання. Структурні схеми моделювання наведені на рис. 1.7 та 1.8, результати оптимізації – на рис. 1.9 та 1.10.

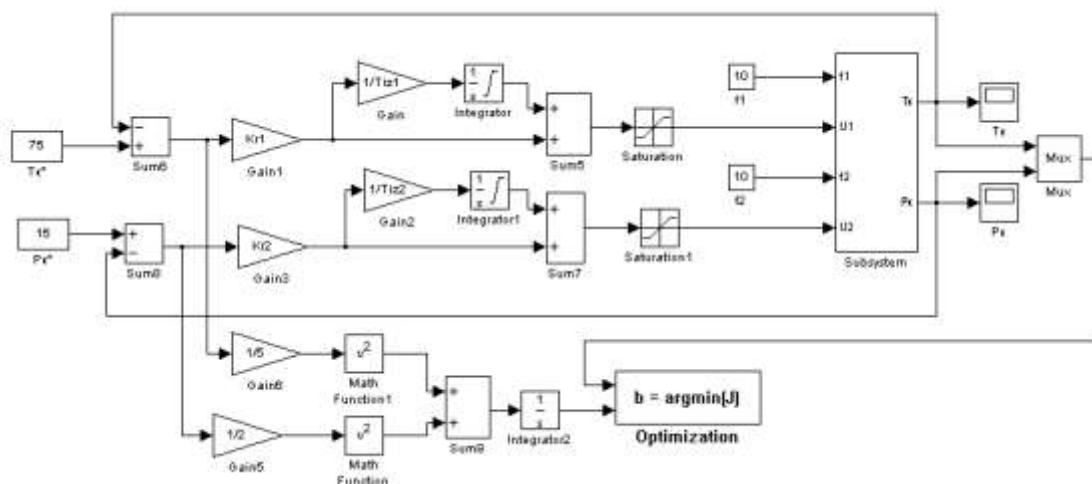


Рис. 1.7 – Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором

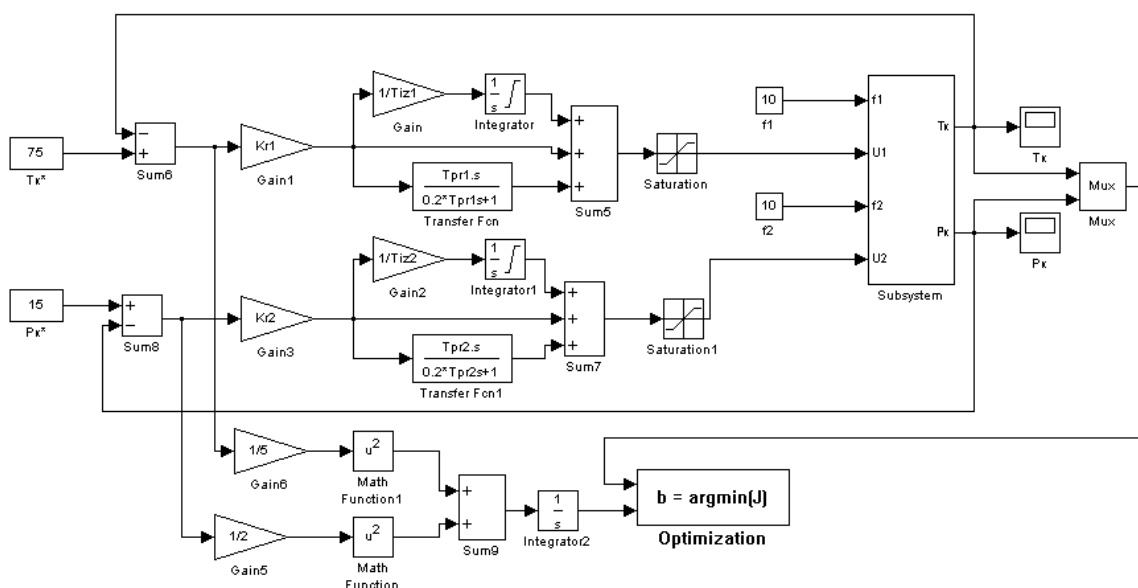


Рис. 1.8 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

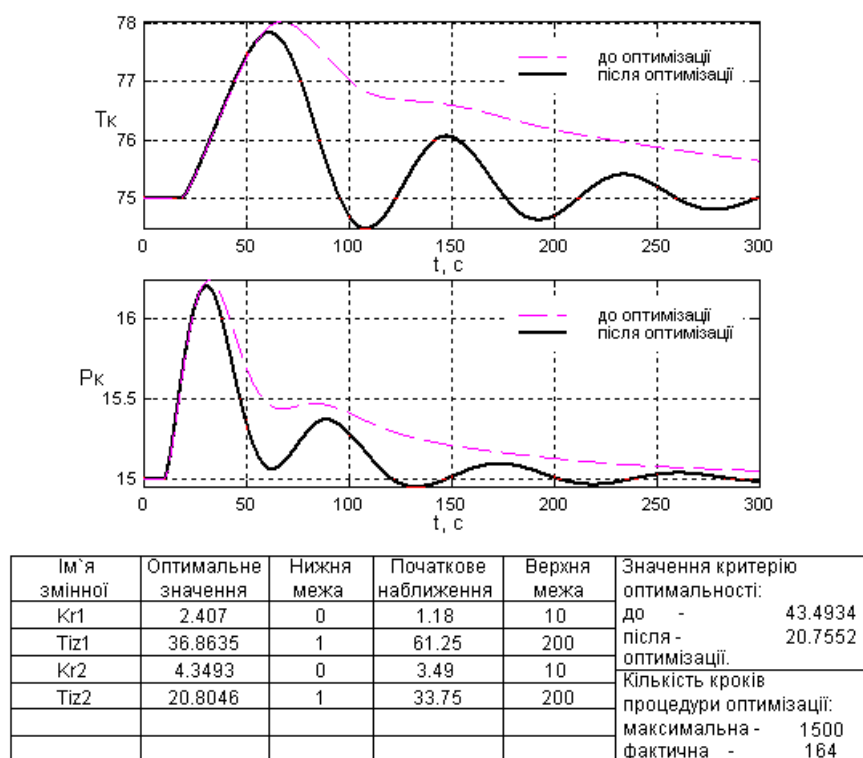


Рис. 1.9 – Результати оптимізації САР з ПІ-регулятором

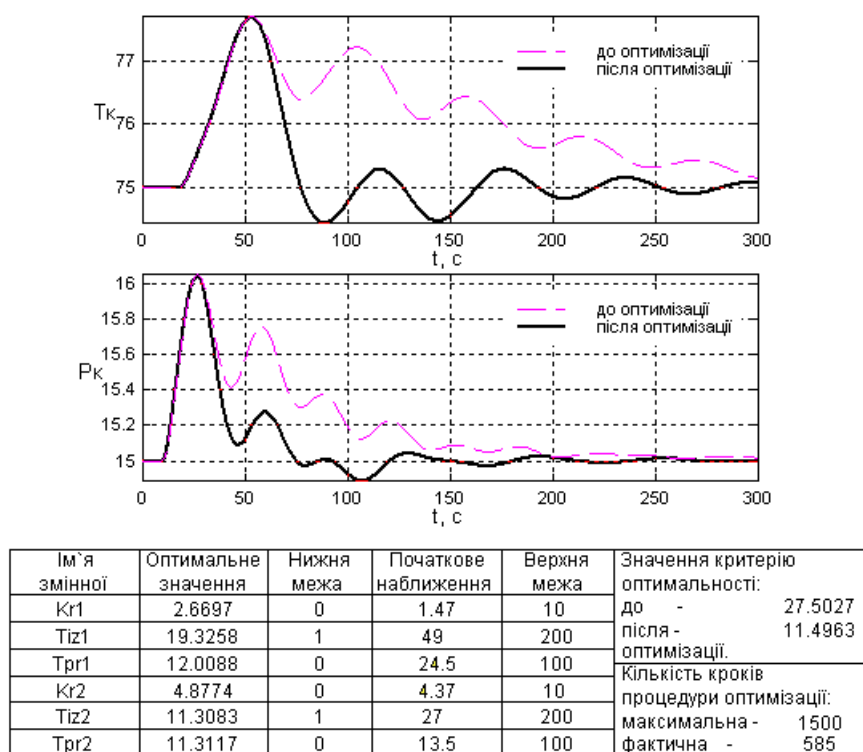


Рис. 1.10 – Результати оптимізації САР з ПІД-регулятором

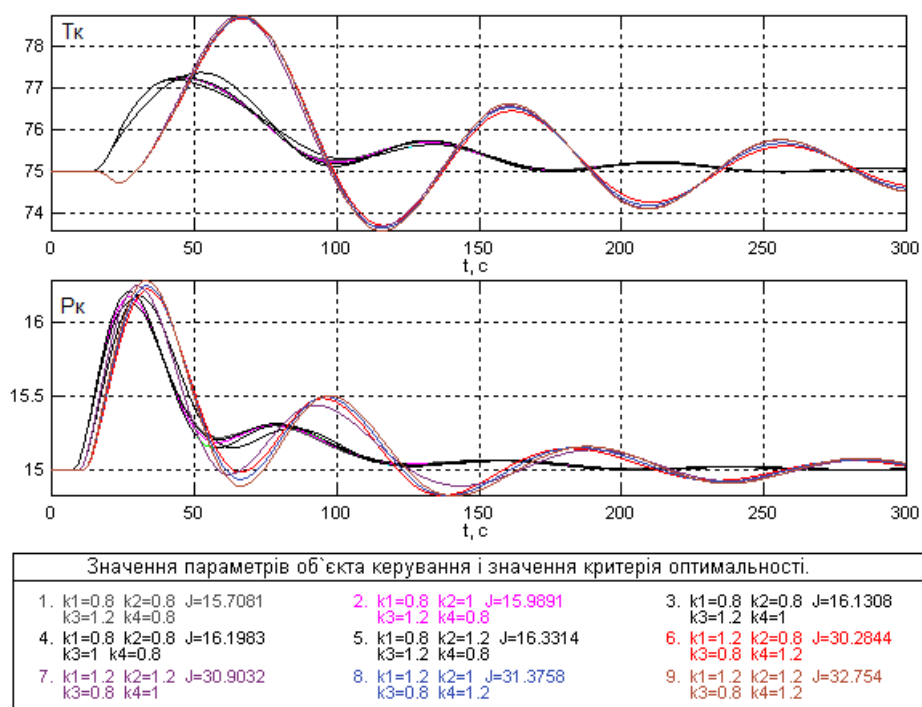


Рис. 1.11 – Результати перевірки САР з ПІ-регулятором на грубість

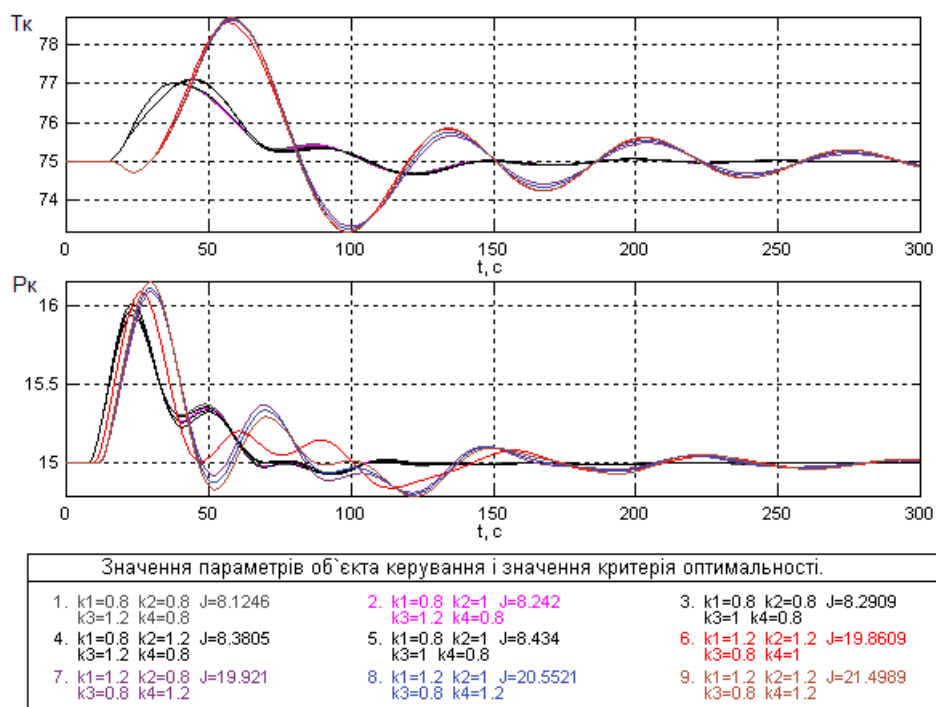


Рис. 1.12 – Результати перевірки САР з ПІД-регулятором на грубість

Результати порівняння варіантів САР базової структури наведені на рис. 1.13 і в таблиці 1.3.

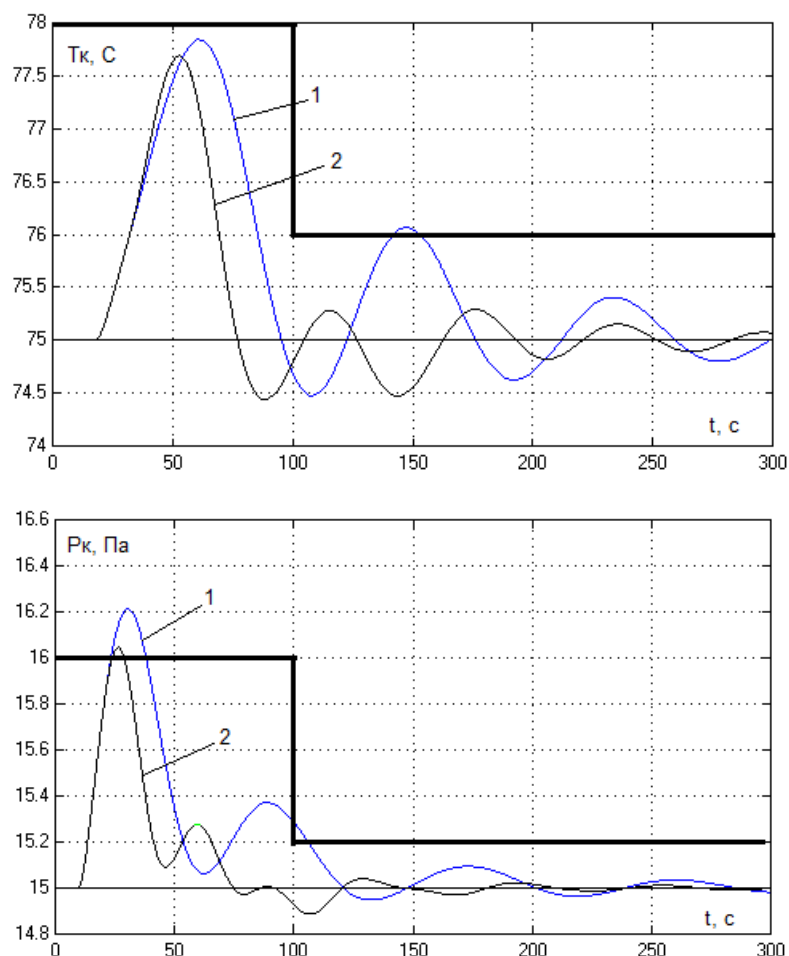


Рис. 1.13– Порівняльний аналіз варіантів САР базової структури: 1 – з ПІ-регуляторами; 2 – з ПІД-регуляторами

Таблиця 1.2 - Порівняльний аналіз варіантів САР базової структури

Варіант алгоритмів регулювання САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_K^{\text{МАКС}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ПІ1}}, \text{c}$	$\Delta P_K^{\text{МАКС}}, \text{Па}$	$T_{\text{ПІ2}}, \text{c}$	
ПІ	2,84	153	1,2	105,8	20,76
ПІД	2,69	69,4	1,05	65,4	11,5

САР базової структури були проаналізовані в сталих процесах. Результати аналізу наведені на рис. 1.14.

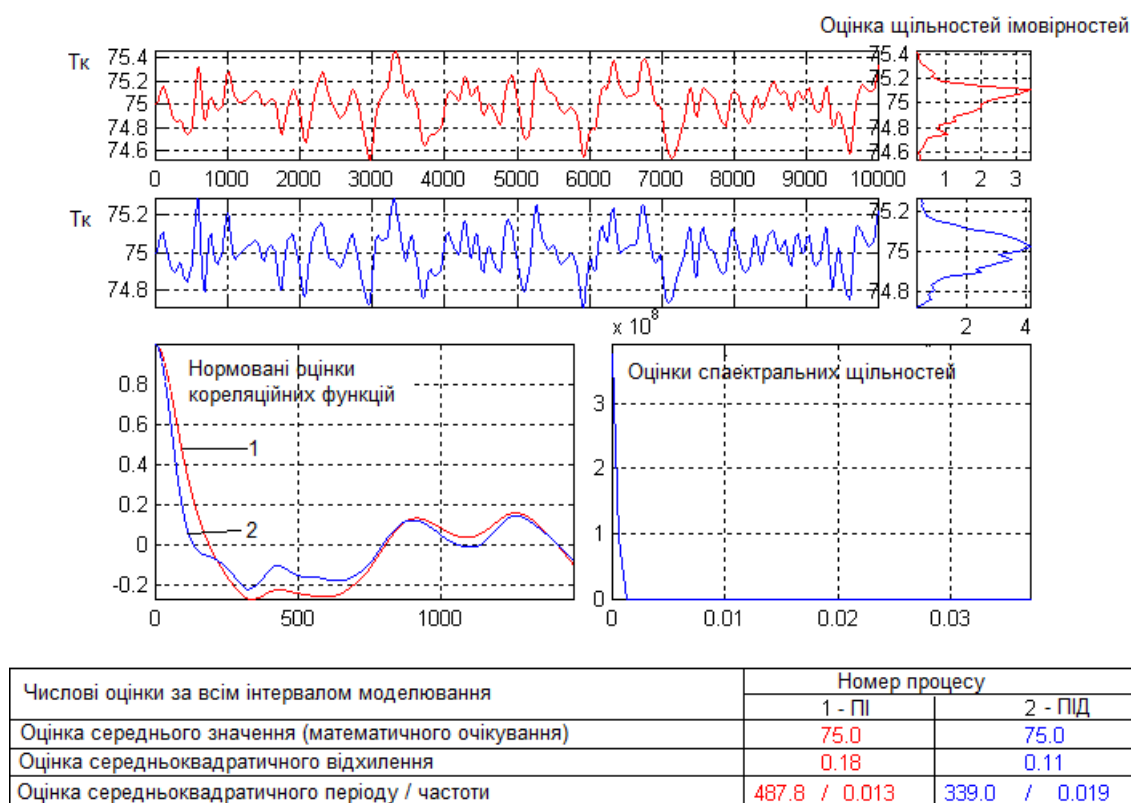


Рис. 1.14 – Результати аналізу САР базової структури в сталих режимах

Як видно з результатів порівняння перехідних процесів, САР з ПД-регуляторами є кращою за усіма показниками. Тому ПД-закон регулювання будемо використовувати і надалі.

1.6 Висновки за розділом

Якісна реалізація технологічного процесу керування теплової обробки залізобетонних виробів залежить від точності підтримки режимних параметрів: температури та розрідження в камері.

За всіма каналами об'єкт має статичні властивості і найбільш точно може бути описаний моделями другого порядку. Ідентифікація моделей каналів ОК, доступних для цілеспрямованої дії, проводилася методом активного експерименту з нанесенням на вхід каналу ступінчастої дії, для параметричної ідентифікації моделей каналу керування застосовувалися методики двох загальних точок Мініної для моделей першого і другого порядку.

Відтворення отриманих моделей у середовищі імітаційного моделювання здійснювалося в середовищі моделювання MATLAB.

Далі ця модель була використана для синтезу САР базової структури, а потім і підвищеної динамічної точності.

В ході виконання розділу роботи було описано двоканальну САР базової структури, яка стала базою для запропонованих подальших рішень з автоматизації. САР з ПД-регуляторами в перехідних режимах за температурою в камері задовольняє гранично припустимим вимогам, а САР з ПІ-регуляторами і САР з ПД-регулятором розрідження в камері гранично припустимим вимогам не задовольняє. САР базової структури за температурою в камері в сталих режимах не виходить за рамки зони незначних відхилень, а САР розрідження в камері в сталих режимах не виходить за рамки регламентної зони.

Введення до алгоритму регулювання Д-складової призводить до зменшення інтегрального критерію на 45%.

Розділ 2. Удосконалення САР на основі розвитку її алгоритмічної структури

2.1 Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності

У результаті виконання випускної роботи бакалавра було розроблено САР підвищеної динамічної точності [5].

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих і неконтрольованих збурень, інтенсивна зміна завдання САР, а також внутрішні особливості ОК і САР (значне співвідношення t_0 / T_0 , взаємний вплив каналів в багатовимірній САР).

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є шкідливий взаємний вплив контурів регулювання температури і розрідження в камері через перехресні канали ОК.

Основним шляхом підвищення динамічної точності саме розглянутої САР є побудова САР автономної структури.

Відповідно структурна схема САР підвищеної динамічної точності автономної структури наведена на рис. 2.1.

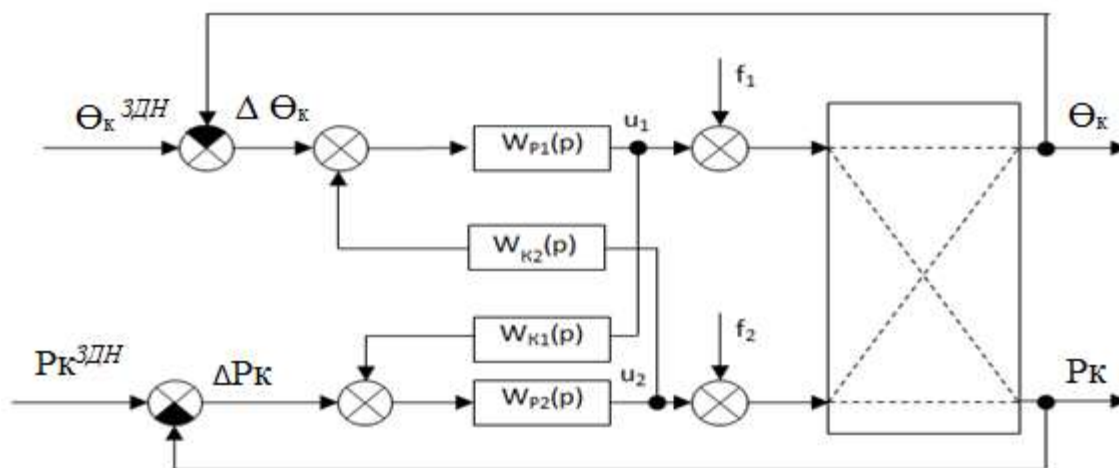


Рис. 2.1 – Структурна схема автономної САР

У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було отримано передаточні функції коригуючих зв'язків, отримано їх перехідні характеристики і спрощено до наступного вигляду:

$$W_{K1}(p) = K_{K1} \cdot \frac{T_{K1}p}{(T_{K1}p+1)^2}; W_{K2}(p) = K_{K2} \cdot \frac{T_{K2}p}{(T_{K2}p+1)^2}$$

Отримані передаточні функції коригуючих зв'язків було інтегровано до структури автономної САР і проведено оптимізацію параметрів коригуючих зв'язків. Структурна схема моделювання автономної САР наведена на рис. 2.2, а результати оптимізації – на рис. 2.3.

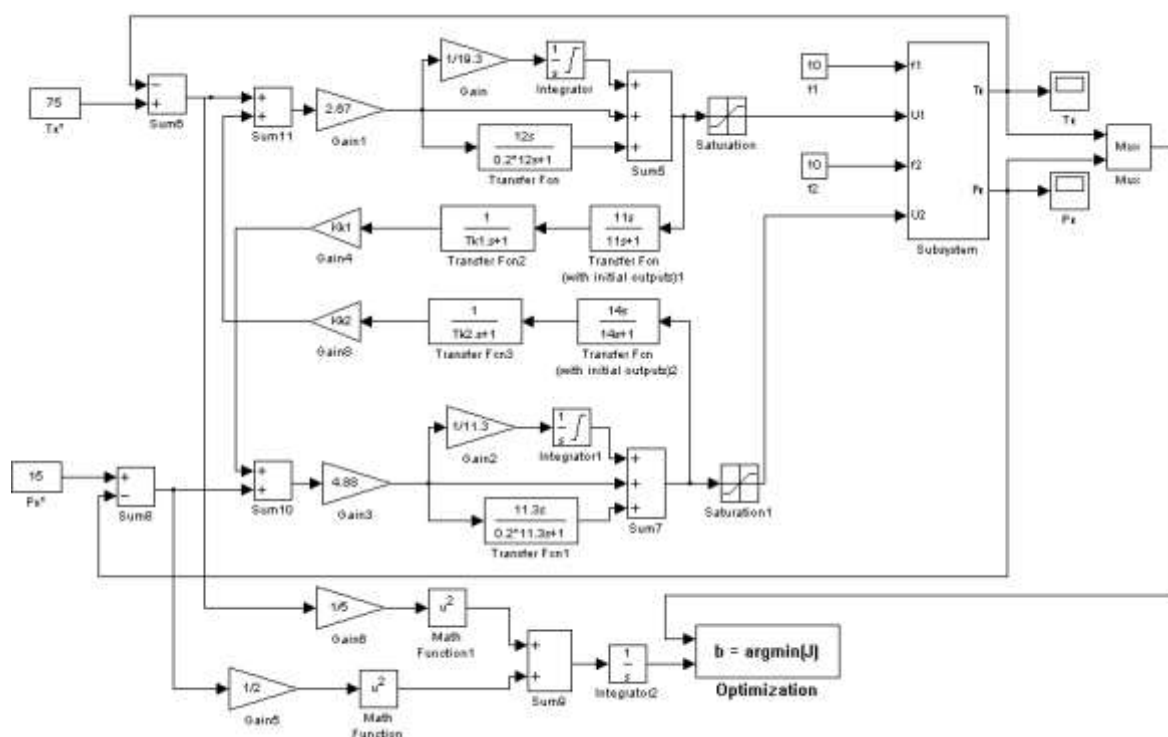
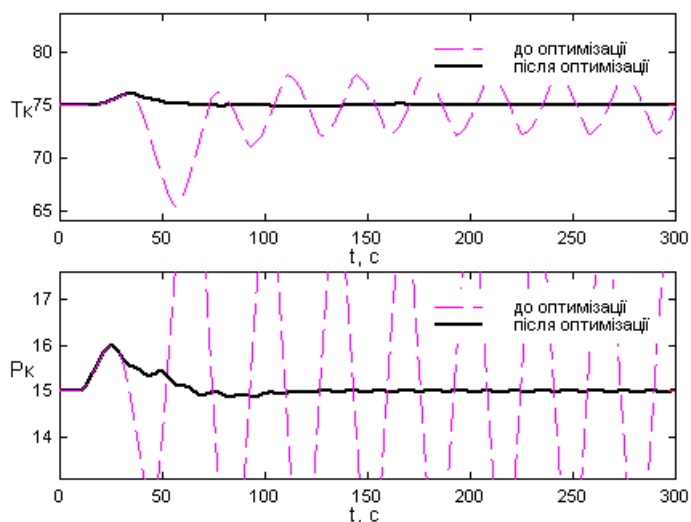


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання автономної САР



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kk1	0.073181	0	0.07	5	до - 664.7983
Tk1	1.9253	1	11	100	після - 4.571
Kk2	0.61226	0	1.64	5	оптимізації.
Tk2	9.3369	1	14	100	Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 1500
					фактична - 437

Рис. 2.3 – Результати оптимізації параметрів коригуючих зв'язків автономної CAP

Автономна CAP була перевірена на грубість (рис. 2.4), але виявилася негрубою. Для забезпечення грубості автономну CAP було прооптимізовано в умовах невизначеності параметрів ОК (рис. 2.5). Отримана автономна CAP (рис. 2.6) виявилася грубою (рис. 2.7).

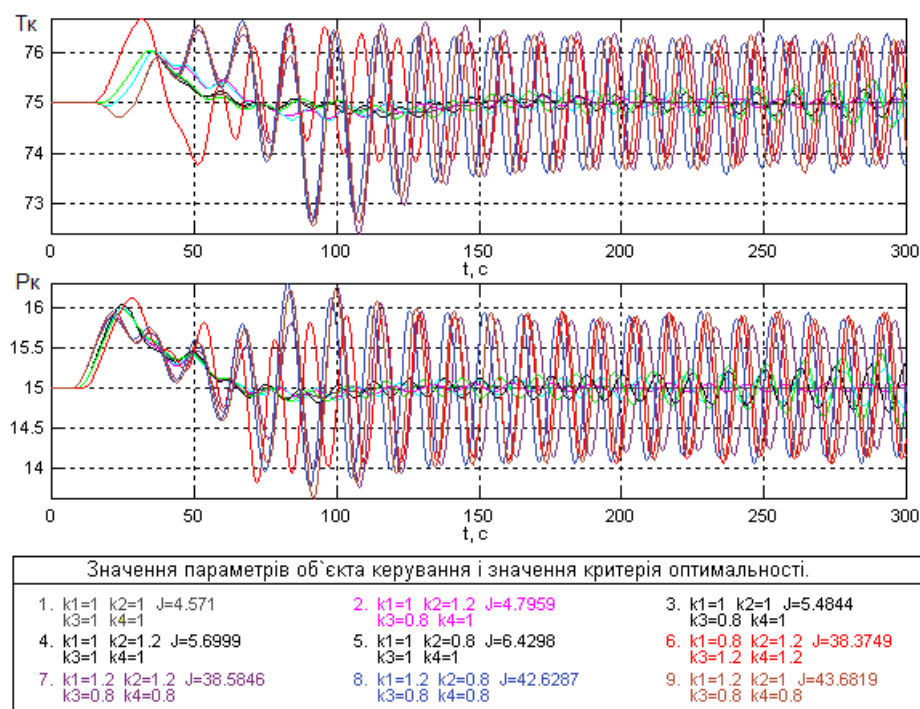
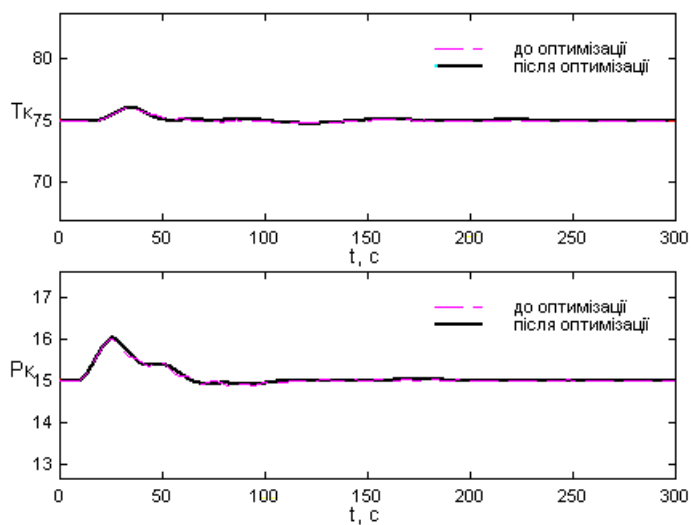


Рис. 2.5 – Результати перевірки автономної САР нап грубість



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
Kk1	0.040407	0	0.073181	5	до - 28.6647
Tk1	2.0023	1	1.9253	100	після - 5.4427
Kk2	0.6515	0	0.61226	5	Кількість кроків процедури оптимізації:
Tk2	8.7363	1	9.3369	100	
					максимальна - 1500
					фактична - 216

Рис. 2.6 – Результати оптимізації параметрів коригуючих зв'язків автономної САР в умовах параметричної невизначеності параметрів ОК

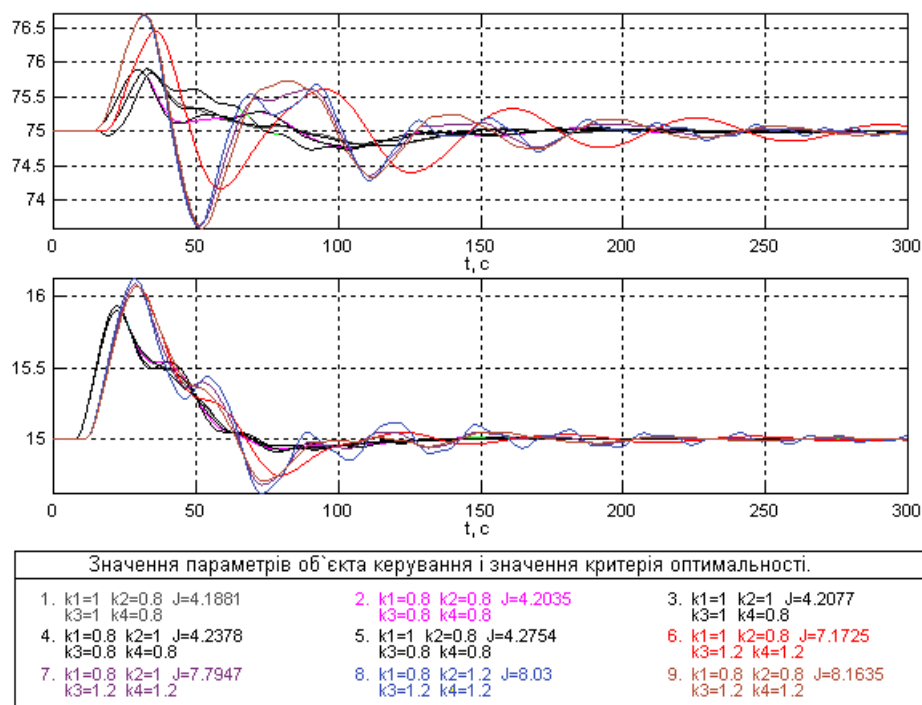


Рис. 2.6 – Результати перевірки грубості автономної САР з параметрами коригуючих зв'язків, отриманих в умовах параметричної невизначеності параметрів ОК

Для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності розроблено структурну схему моделювання, наведену на рис. 2.7. Результати порівняння наведені на рис. 2.8 і в таблиці 2.1.

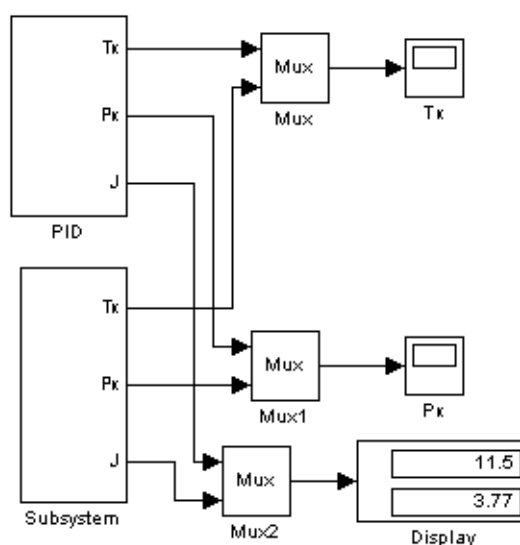


Рис. 2.7 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

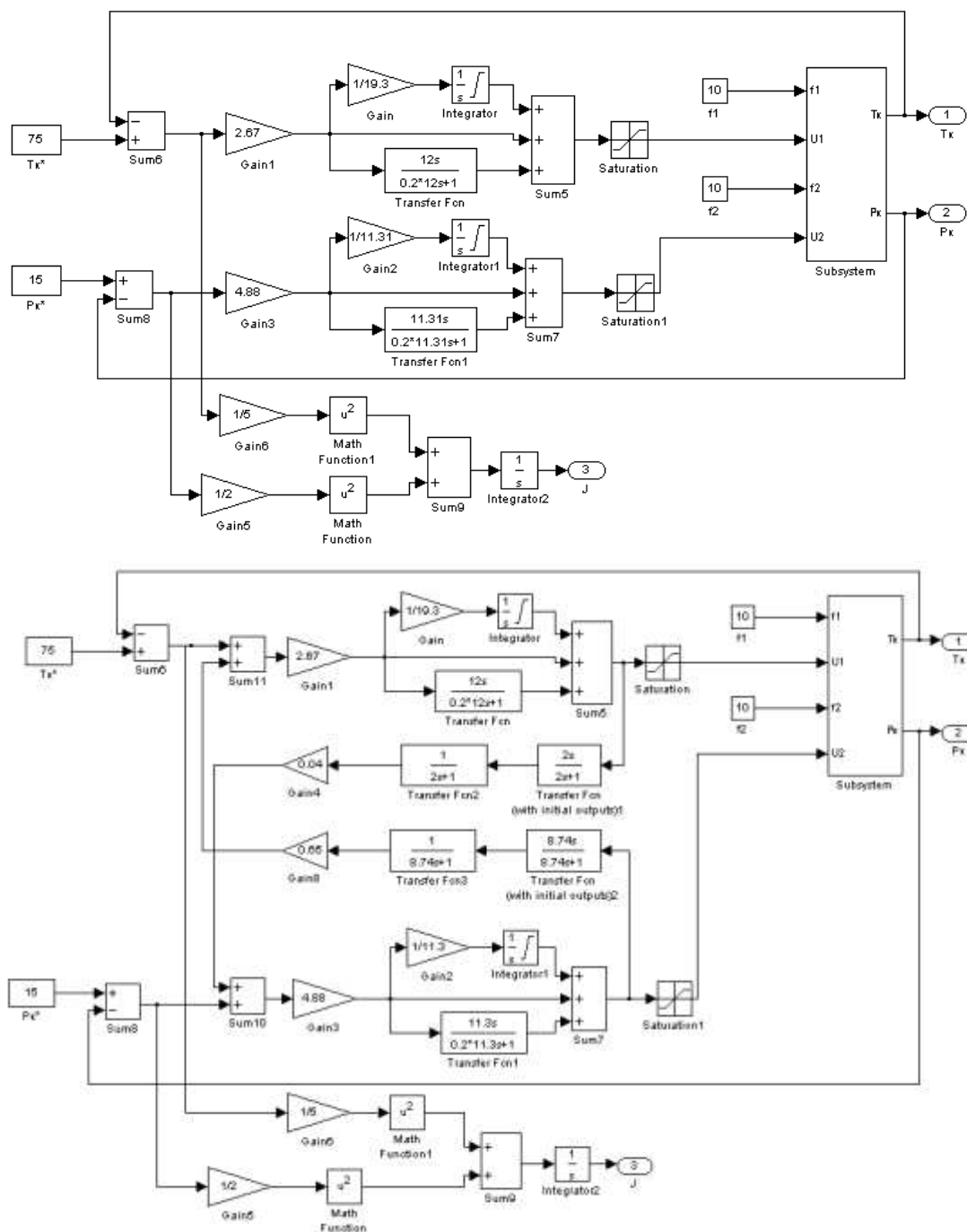


Рис. 2.7 (закінчення) – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

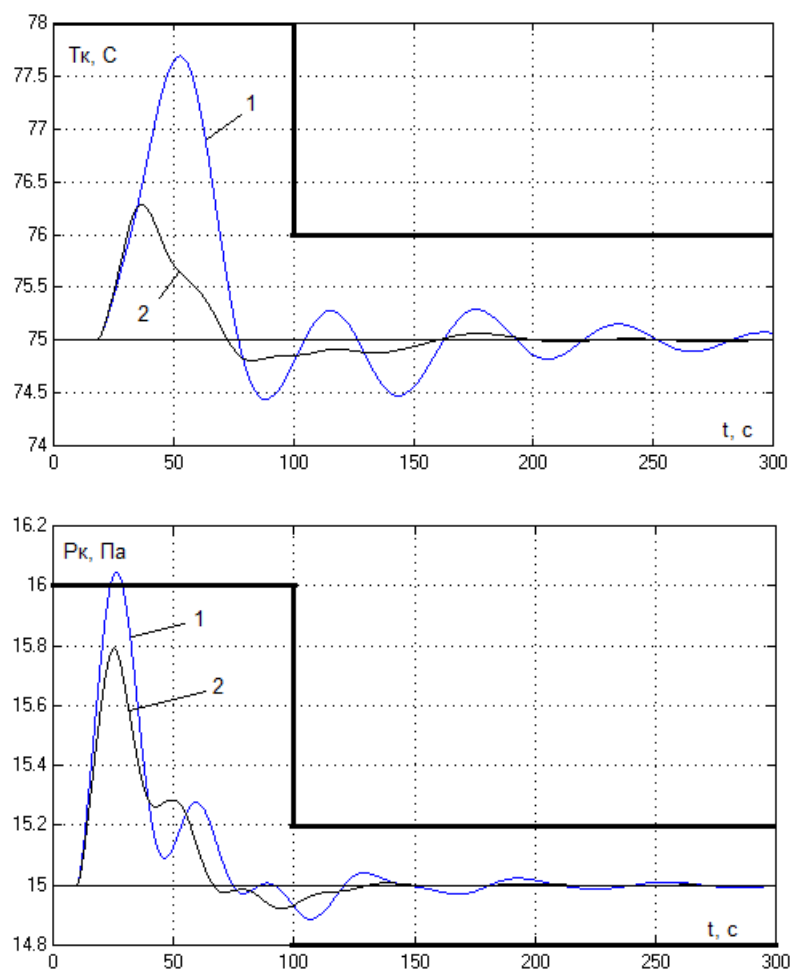
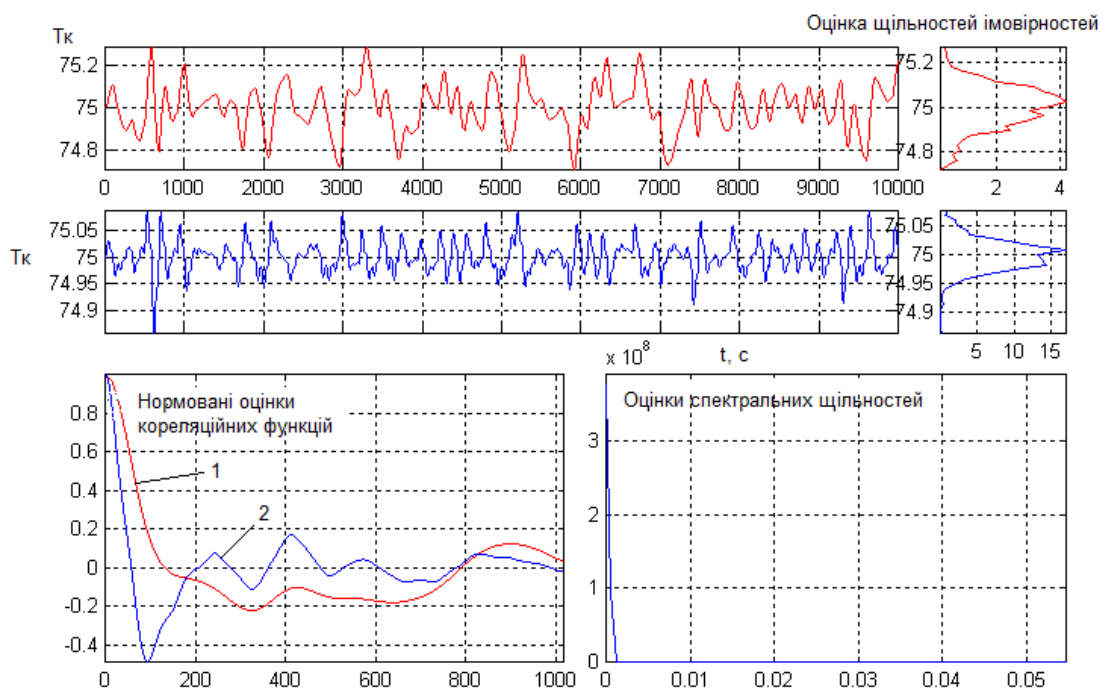


Рис. 2.8 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури (1)
і САР підвищеної динамічної точності (2)

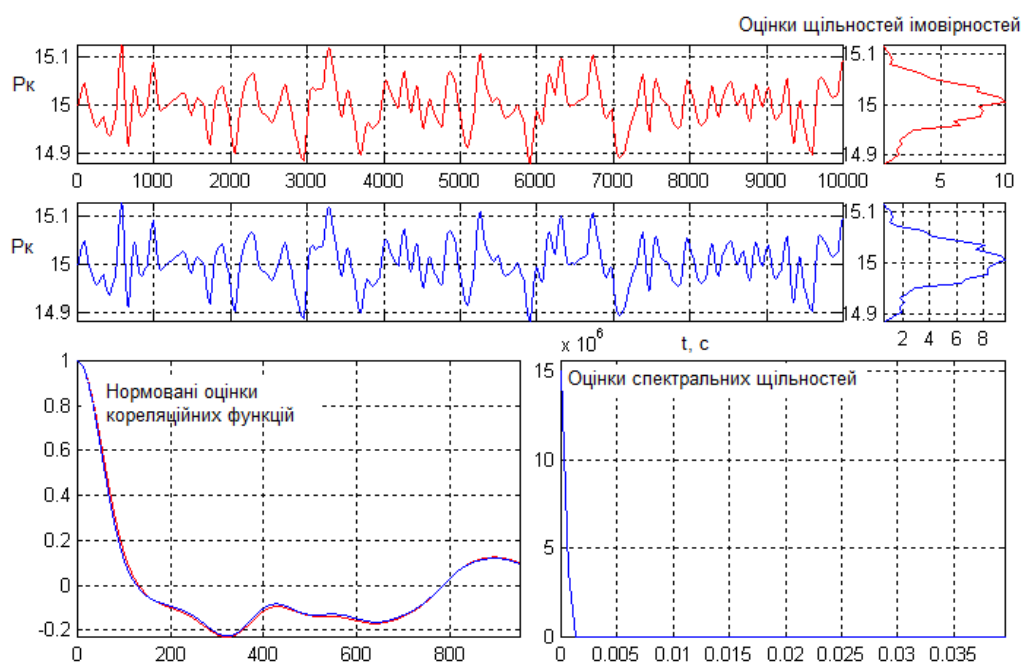
Таблиця 2.1 – Результати порівняння варіантів САР

Варіант САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_K^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}1}, \text{c}$	$\Delta P_K^{\text{МАКС}}, \text{Па}$	$T_{\text{пп}2}, \text{c}$	
Базова структура	2,69	69,4	1,05	65,4	11,5
Автономна структура	1,3	44	0,79	56,9	3,77

Також було порівняно САР базової і автономної структури у сталих режимах. Результати порівняння наведені на рис. 2.9.



Числові оцінки за всім інтервалом моделювання	Номер процесу	
	1	2
Оцінка середнього значення (математичного очікування)	75.0	75.0
Оцінка середньоквадратичного відхилення	0.11	0.028
Оцінка середньоквадратичного відхилення	339.0 / 0.019	229.9 / 0.027



Числові оцінки за всім інтервалом моделювання	Номер процесу	
	1	2
Оцінка середнього значення (математичного очікування)	15.0	15.0
Оцінка середньоквадратичного відхилення	0.045	0.045
Оцінка середньоквадратичного періоду / частоти	317.5 / 0.02	317.5 / 0.02

Рис. 2.9 – Результати порівняння САР базової і автономної структури у сталих режимах

2.2 Визначення недоліків існуючих САК і формулювання мети удосконалення систем автоматичного керування процесом термічної обробки залізобетонних виробів

Розглянуті в пунктах 1.5 і 2.1 варіанти САК процесом теплової обробки залізобетонних виробів реалізують функції регулювання температури повітря в камері теплової обробки та розрідження в камері теплової обробки. Регулювання невеликого розрідження в камерах термовологої обробки та сушіння бетонних блоків – це важливий технологічний параметр. Оптимальний режим для камери сушіння - це підтримка стабільного невеликого розрідження (порядку -10...-50 Па).

Розглянуті у пунктах 1.5 та 2.1 варіанти САК процесом теплової обробки залізобетонних виробів обмежуються вузьким діапазоном зміни заданих значень температури і розрідження в камері, які ми називаємо номінальними. Але діапазон заданих значень регульованих координат може бути ширшим через зміни умов реалізації технології, необхідність обробляти інші види залізобетонних виробів, тощо. При цьому у запропонованих варіантів САК можуть погіршитися показники якості регулювання, можуть виникнути проблеми із стійкістю системи.

В нашому ж випадку реалізована система стібілізації тільки температури повітря в камері теплової обробки бетону. А температура безпосередню самого бетону не регулюється. В умовах дії неконтрольованих параметричних та координатних збурень температура бетону може не відповідати технологічним регламентам і якість бетону може погіршуватися. При цьому слід зазначити, що існуючі системи (наведені у п.п. 2) реалізують регулювання тільки для одного етапу - ізотермічне витримання, а робота САК температури бетону при програмній зміні заданого значення температури не розглядається.

Для підвищення ефективності процесу керування тепловою обробкою бетону актуально розглянути каскадний принцип керування температурою бетону з програмним задатчиком. В якості проміжної точки може виступати температура повітря в камері теплової обробки. Такий підхід направлений на заощадження енергоресурсів та покращення якості бетону.

2.3 Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САК процесом термічної обробки залізобетонних виробів

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 чітко, невизначено. Нечітка логіка, на якій засноване нечітке управління, ближче за духом до людського мислення та природних мов, ніж традиційні логічні системи. Для технічних систем з випадковим характером впливу, що збурює, складністю розробки динамічної моделі, її високим порядком, нелінійним характером можна говорити про проблему 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 сушіння цементних блоків на підприємстві «Чорноморгідрозалізобетон» 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.

Технологічним регламентом процесу теплової обробки залізобетонних виробів встановлені верхнє та нижнє обмеження на температуру повітря в камері, температуру бетону і розрідження в камері. Регулювання температури повітря в камері та розрідження реалізовано, а регулювання температури самого бетону не виконується. В умовах діючих нестационарних збурень випадкового характеру, що призводять до постійної зміни температури повітря в камері, температурний регламен для бетону може не виконуватись, що призведе до втрати якості бетону та зайвих витрат теплової енергії. Крім цього в системі передбачено роботу системи в режимі ізотермічного витримання і не передбачено програмного задатчика температури бетону. Тому функції існуючої системи керування повинні бути розширені. Таким чином актуальним є завдання побудови каскадної САР регулювання температури бетону з програмним задатчиком.

Перехід на регулювання безпосередньо за температурою бетону - це так зване прецизійне керування. У цьому випадку повітря в камері стає лише проміжним інструментом, а головним завданням для всієї САК є графік життя самого бетону.

Оскільки бетон не може нагрітися миттєво, каскадна система працює так: ми задаємо плавну траєкторію для бетону, а регулятор камери «підштовхує»

його, тримаючи температуру повітря трохи вищою, але суворо контролюючи дельту (ΔT), щоб не перепалити поверхню блоку.

Коли ми керуємо температурою самого бетону, графік завдання для бетону є лінійним на етапі нагріву. Швидкість нагріву тіла бетону вибирається максимально безпечною – 10—12 °C за годину.

Специфікація завдання для САУ (уставки для температури бетону):

Етап 1: Витримка (2 години). Уставка для температури бетону – 20 °C.

Етап 2: Нагрів (5 годин). Плавний підйом від 20 °C до 80 °C. Швидкість: 12 °C /год (розрахунок: $(80 - 20) / 5 = 12$).

Етап 3: Витримка (6 годин). Стабільне утримання на завданні – 80 °C.

Етап 4: Охолодження (4 години). Плавне зниження до 80 °C. Швидкість: 10 °C /год.

При реалізації нових функцій повинні бути враховані певні обмеження які присутні в процесі теплової обробки бетонних блоків.

Якщо запустити каскад «в лоб», система може поводитися агресивно: на початку нагріву регулятор бетону побачить, що бетон холодний, і зажадає розігнати повітря в камері до 150 °C, щоб швидше його нагріти. Це спалить верхній шар блоків. Тому на вихід головного регулятора обов'язково накладаються динамічні обмеження:

Обмеження 1: Максимальна температура камери.

Вихід Головного регулятора (уставка для камери) жорстко обмежується зверху на рівні 85 – 90 °C. Повітря в камері ні за яких умов не повинно стати гарячішим за 90 °C.

Обмеження 2: Контроль максимальної дельти (ΔT).

Різниця між уставкою температури повітря камери та реальною температурою бетону не повинна перевищувати безпечний градієнт для бетону (зазвичай це 20 °C).

Як це працює на практиці: На старті бетону потрібно 20 °С. Система просить для температури повітря в камери 40 °С (працює обмеження за дельтою 20 °С). Пальник гріє камеру до 40 °С. Бетон починає прогріватися і стає 25 °С – ліміт для камери автоматично зсувається до 20 °С. Камера плавно «тягне» бетон за собою, випереджаючи його суворо на безпечну величину.

Каскадна система може також забезпечити ефективну роботу на етапі екзотермії (Самонагріву). Коли бетон прогріється до води $\approx 55 - 60$ °С і почне сам виділяти тепло, каскад відпрацює це ідеально і знизить температуру повітря в камері для компенса цього збурення.

В цілому можна сказати що розширення функцій САР може забезпечити ефективну роботу камери теплової обробки бетону в умовах зміни заданого значення температури. Задане значення в такому випадку — це чиста пряма лінія нагріву самого тіла бетону зі швидкістю 12 °С/год. Каскадна структура автоматично підлаштує температуру повітря в камері так, щоб блоки прогрілися максимально швидко, але без термічних ударів та з повною економією газу під час самонагріву.

На рис. 2.10 наведено приклад циклограми зміни температури бетону у камері під час циклу термічної обробки бетонних блоків. А в таблиці відповідні числові значення для кожного етапу.

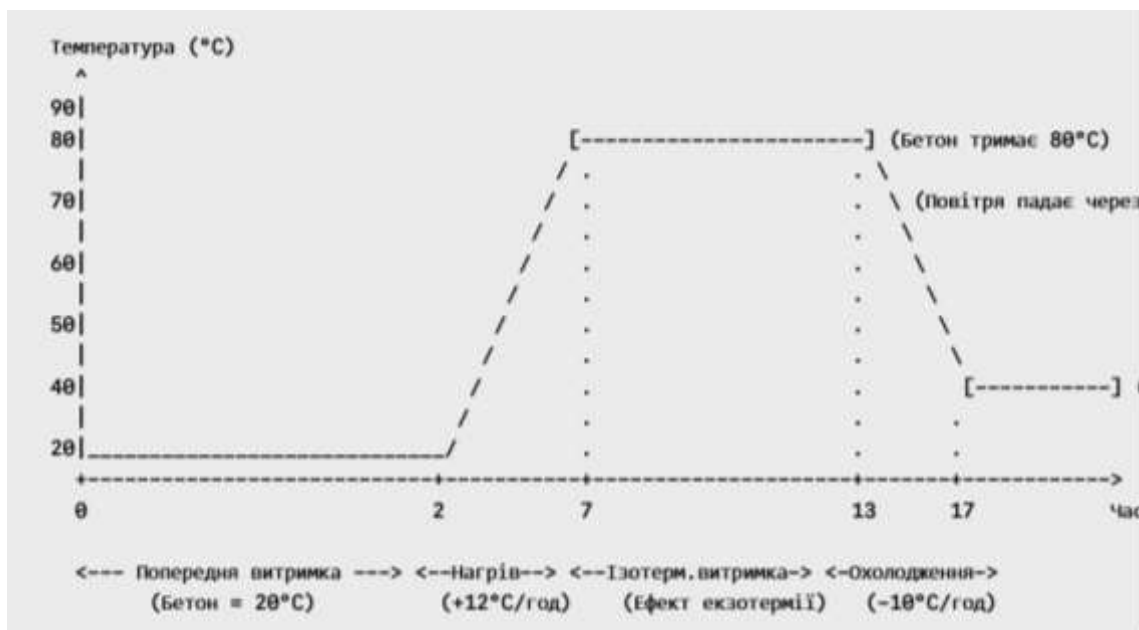


Рис. 2.10 – Циклограма зміни заданого значення температури бетону в камері в циклі його теплової обробки.

Таблиця 2.2 – Задані значення температури бетону у камері на різних етапах теплової обробки

Точка графіка	Час від старту (год)	Уставка бетону (Задання головного регулятора)	Поведінка регулятора повітря (Внутрішній контур)
Старт (Точка 0)	0:00	20 °С	Повітря = 20 °С. Пальник вимкнений.
Кінець витримки	2:00	20 °С	Починається плавний підйом завдання бетону.
Кінець нагріву	7:00	80 °С	Повітря весь цей час йде паралельно вище (наприклад, 88 – 90 °С, «тягнучи» лінійно бетон за собою.
Екзотермія (бл. 9 год)	9:00	80 °С	Уставка повітря плавно падає (до 72-75 °С, тому що бетон сам виділяє тепло і намагається перегнати графік.
Кінець витримки	13:00	80 °С	Починається етап плавного охолодження.
Кінець охолодження	17:00	40 °С	Повітря йде лінійно нижче бетону, вентилятор витяжки скидає вологу.

Провівши аналіз особливостей процесу теплової обробки бетонних блоків можна зробити висновок об актуальності розширення функцій існуючих САК за рахунок побудови каскадної САР температури бетону у камері відповідно з програмним задатчиком.

Концептуальна структура каскадної САР наведена на рис. 2.11.

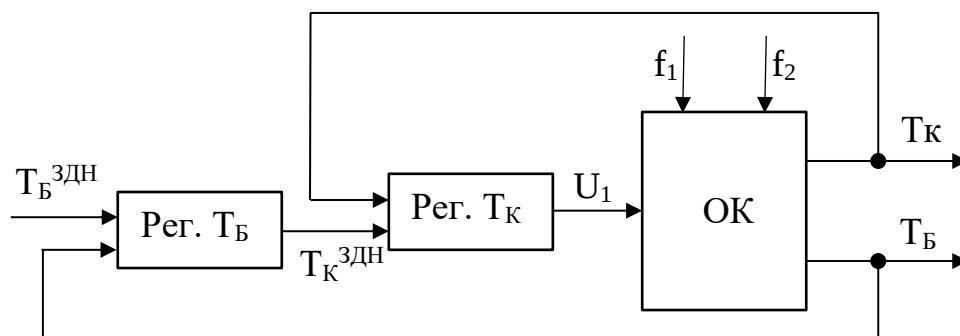


Рис. 2.11 – Концептуальна структура каскадної САР температури бетону в камері теплової обробки залізобетонних виробів.

2.4 Висновки за розділом

САР підвищеної динамічної точності задовольняє гранично припустимим вимогам. Після підвищення динамічної точності і забезпечення грубості САР інтегральний критерій зменшився на 67%.

САР підвищеної динамічної точності є грубою.

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

У ході виконання розділу роботи було проаналізовано недоліки системи базової і автономної структури, сформульовано задачі підвищення ефективності системи автоматичного керування з використанням інструментарію нечіткої логіки, нейронних мереж, а також за рахунок розширення САР введенням інших контрольованих координат, зокрема, розширення САР температури в камері до температури залізобетонних блоків каскадної структури з програмним задатчиком температури залізобетонних блоків.

Розділ 3. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж

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

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

бажаного ефекту. У цьому випадку для забезпечення збільшення ефективності можна використовувати систему управління з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

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

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

При синтезі моделі процесу сушіння цементних блоків на підприємстві «Чорноморгідрозалізобетон» визначено нелінійний характер статичних характеристик за різними каналами регулювання. Для такого процесу доцільно виконати синтез системи управління на базі апарата нечіткої логіки.

Для представлення нелінійної моделі об'єкта управління, до відповідних моделей каналів регулювання були визначені відповідні нелінійні ланки. Нелінійність було реалізовано за допомогою включення блоку Look up Table у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта управління з додатковими блоками Look up Table, що визначають нелінійність статичних характеристик, представлена на рис. 3.1. На рис. 3.1 відображено повну модель об'єкту управління, яка є більш розширеною

моделлю, завдяки включення додаткових нелінійних ланок. У блоці Look up Table у табличній формі задається нелінійний зв'язок (залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

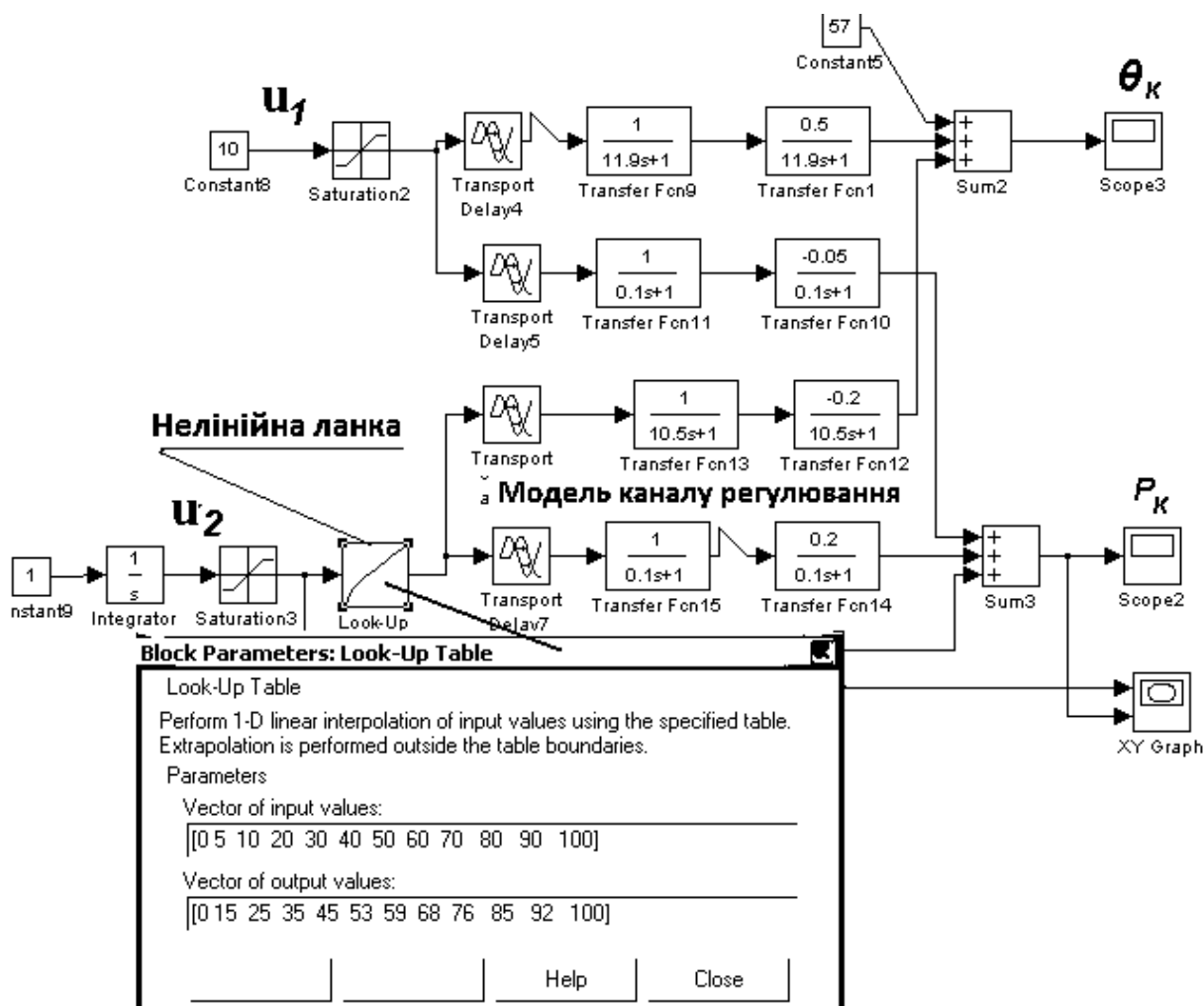


Рис. 3.1 – Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

В остаточному випадку в результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_2 - P_k$ », яка має вигляд, представлений на рис. 3.2. З рис. 3.2 видно, що статична характеристика несуттєво нелінійна, це дає можливість виконати синтез САУ з традиційними ПД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

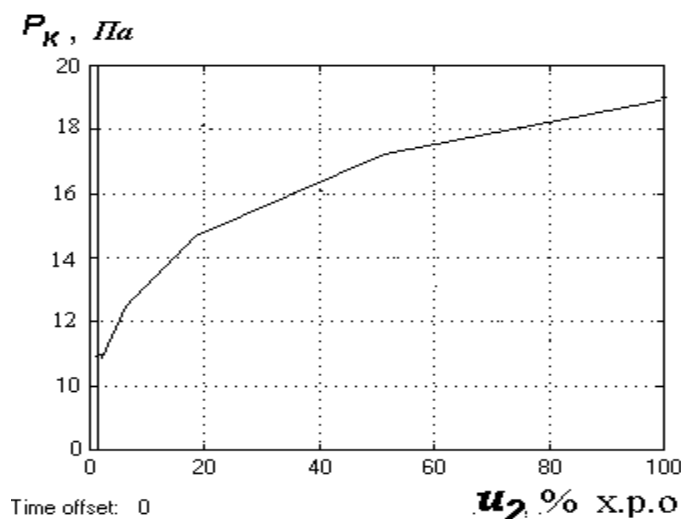


Рис. 3.2 – Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

3.3 Параметричний синтез САУ з традиційним ПІД регулятором для об'єкта який характеризується нелінійною характеристикою каналу регулювання

У даній роботі був виконаний параметричний синтез САУ з традиційним – лінійним ПІД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання. Слід зазначити, що нелінійність статичної характеристики була реалізована в моделі, «гладкої» і несуттєвої для одержання стійких перехідних процесів при застосуванні традиційних – лінійних (П, ПІ, ПІД) регуляторів.

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

Для реалізації параметричної оптимізації регулятора 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 наступного критерію якості роботи системи:

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

$e_2(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням розрідження в камері теплової обробки.

Розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором у середовищі MATLAB\Simulink 5.2.

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

Початкові параметри настройки регуляторів були визначені наступним чином за відповідними формулами з урахуванням нелінійної характеристики

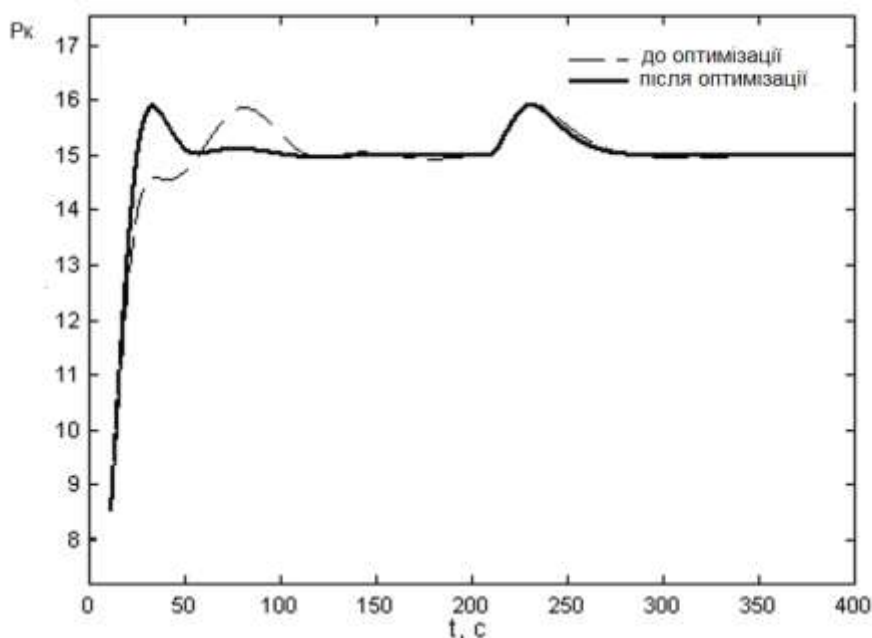
$$\text{каналу регулювання: } k_p = \frac{T_0}{k_o \cdot \tau_o} = 3,2 ; T_{iz} = 1,2 \cdot \tau_o = 10\text{с}; T_{pr} = 1\text{с}$$

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів розрідження в камері теплової обробки повинна бути 15 Па точністю $\pm 0,2$ Па. За цим параметром допустимі короточасні відхилення до ± 2 Па. протягом часу не більше 30 с. Всі ці дані відповідають перехідній характеристиці представленої після оптимізації.

Відповідні початкові параметри оптимізації були введені у відповідному вікні за стандартними умовами. Це 100 кроків оптимізації, достатньо великий діапазон пошуку значень оптимізуючи параметрів більш чім на 50%. Параметри канали регулювання були визначені такими як у лінійний моделі отриманою в результаті відповідної ідентифікації.

Необхідно зазначити що оптимізацію проводили поетапно з урахуванням не лінійності характеристики каналу регулювання. Остаточні значення параметрів при оптимізації були отримані при тих же умовах що були при оптимізації відповідної системи з лінійними статичними характеристиками за відповідним інтегральним критерієм.

На рис. 3.3 представлена вікно результату оптимізації за інтегральним критерієм на 301 крок. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання, за розрідженням в камері теплової обробки, помітно покращилася після оптимізації САУ. Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи управління. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.



Ім'я змінних	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критеріїв оптимізації:	
kr	1.8084	0	2.5	5	до	49.8579
Tr	27.7313	0	22	50	після	6.1342
Tr	7.4059	0	9.6	20	оптимізації	
kr1	4.6751	0	3.2	5	Кількість кроків процедури оптимізації:	
Tr1	13.7341	0	10	50		
Tr1	5.7425	0	8.1	20		
					максимальна -	1000
					фактична -	301

Рис. 3.3 – Вікно результатів оптимізації САУ з ПД регулятором

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

регулятором за квадратичним критерієм якості роботи системи. При перевірці системи на грубість змінювались параметри каналу регулювання у діапазоні $\pm 20\%$. Згідно з рис. 3.4 система достатня груба але це має місце якщо оптимізація проводилась згідно з відповідно представленим інтегральним критерієм. .

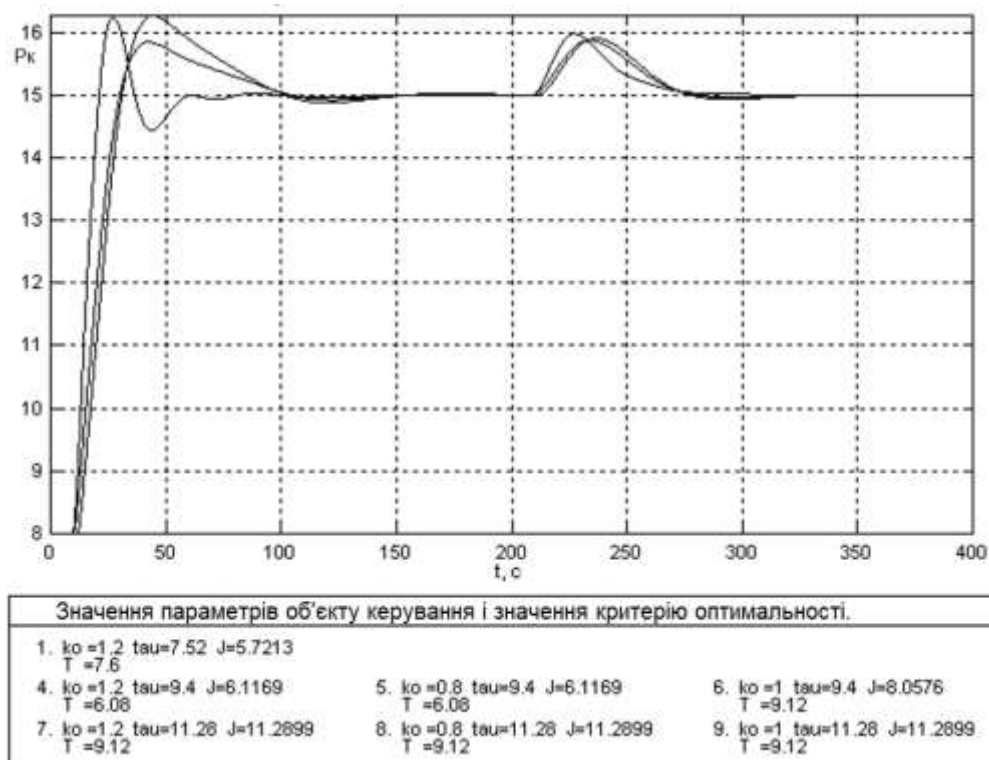


Рис. 3.4 – Вікно результатів перевірки на грубість САР з ПД регулятором що була оптимізована

3.4 Розробка моделі САУ з апаратом нечіткої логіки для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання

Нечітка логіка в ПД-регуляторах використовується переважно двома шляхами: для побудови самого регулятора і для організації підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора. Обидва шляхи можуть використовуватися в ПД-контролері одночасно. У роботі розглянемо обидва шляхи.

Одна з найпоширеніших структур нечіткого регулятора (нечіткого ПП-регулятора) показана на рис. 3.5. На вхід регулятора надходить помилка e і

обчислюється її похідна за часом de / dt . Далі обидві величини спочатку зазнають операції фазифікації (перетворення в нечіткі змінні), в подальшому отримані нечіткі змінні використовуються в блоці нечіткого логічного висновку для отримання керуючого впливу на об'єкт. Після виконання операції дефазифікація (зворотного перетворення нечітких змінних у чіткі) надходить на вихід регулятора у вигляді керуючого впливу u .

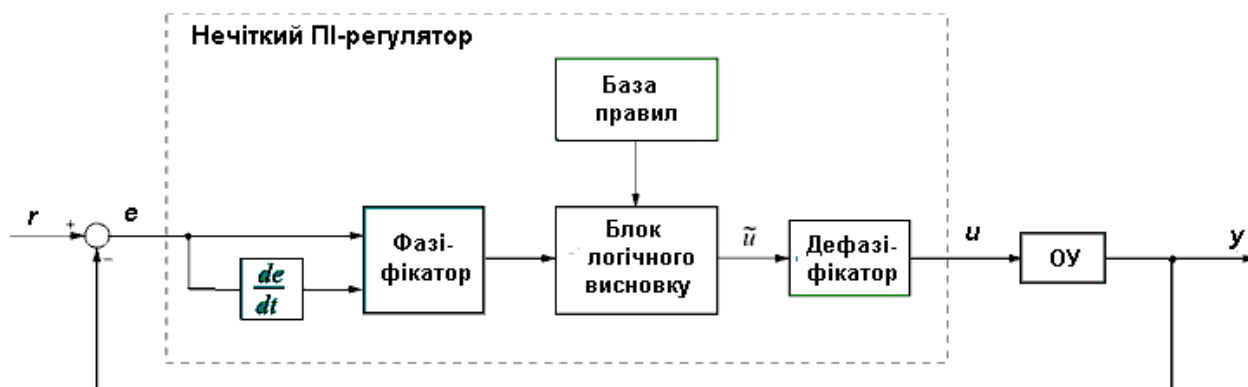


Рис. 3.5 – Структура нечіткого ПІ-регулятора

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

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазіуправління: фазифікація, логічного висновку і дефазифікація. З погляду структури така схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

Всі визначені блоки (фазифікація, блок логічного розв'язку, дефазифікація) редагуються у відповідному редакторі FIS Editor середовища MATLAB. Для запуску вікна fis-редактора в командному вікні MATLAB

Window commander було прописано команду «Fuzzy». Після чого було вибрано алгоритм Sugeno та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рис. 3.6 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора розрідження в камері теплової обробки з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

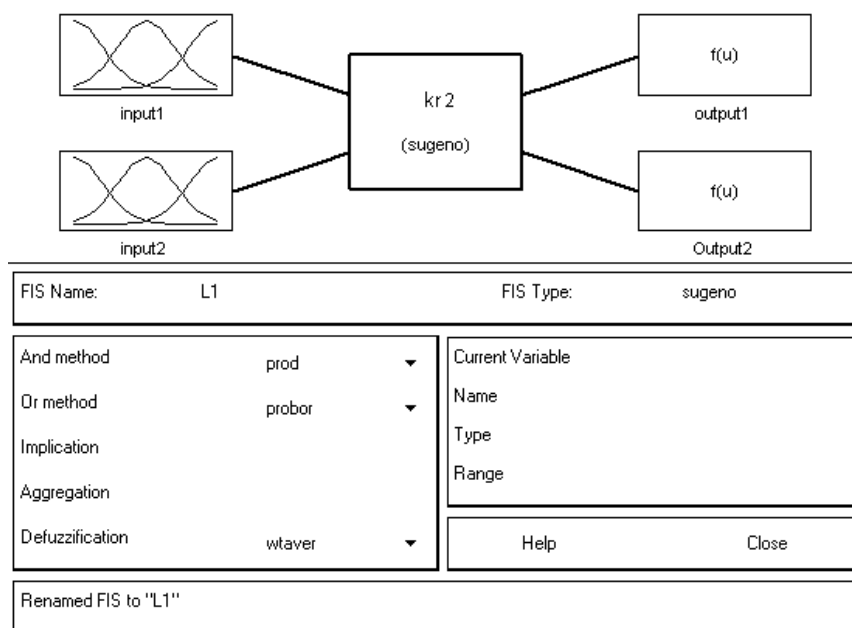


Рис. 3.6 – Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

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

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

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

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

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

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

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

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

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

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

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

де C_1, C_2 — звичайні (чіткі) числа.

Далі алгоритм виконується за наступними етапами:

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

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

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

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

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

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

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

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

де n – загальна кількість активних правил нечітких продукцій

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

П1: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика позитивна РЕ» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z », то керуюча дія $u_1 = w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w2$;

П2: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика негативна НЕ» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_1 = -w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w2$;

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

П4: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «велика позитивна РЕ», то керуюча дія $u_1 = w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w2$;

П5: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «велика негативна НЕ», то керуюча дія $u_1 = -w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w2$.

Відповідно вище представленим правилам складемо таблицю баз знань для НЛР розрідження в камері теплової обробки блоків.

Як видно з рисунку 3.6, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки регулювання (input2). Для змінної input1 задаємо три трикутні функції приналежності «trimf». Це проста функція приналежності і найбільш часто застосовується. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

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

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

b - найбільш можливе значення змінної

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рис. 3.7 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 3.8.

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 3.9.

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора розрідження в камері теплової обробки

Δe_1 \ e_1	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = -70$; $\Delta u_1 = -0,16$;	–
Z	$u_1 = -70$; $\Delta u_1 = -0,16$;	$u_1 = 0$; $\Delta u_1 = 0$;	$u_1 = 70$; $\Delta u_1 = 0,17$;
PE	–	$u_1 = 70$; $\Delta u_1 = 0,17$;	–

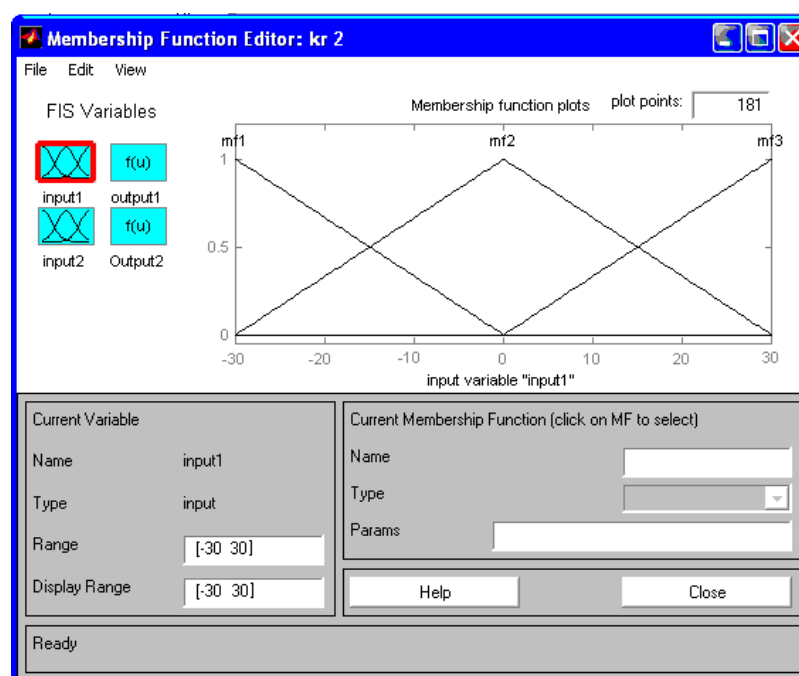


Рис. 3.7 – Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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

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

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

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

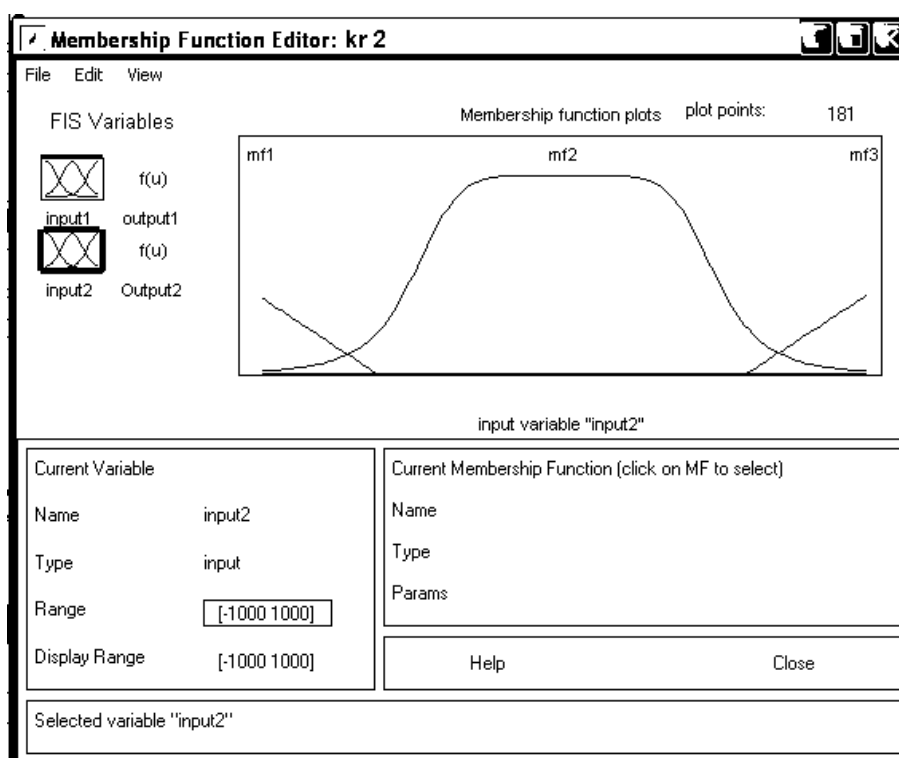


Рис. 3.8 – Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

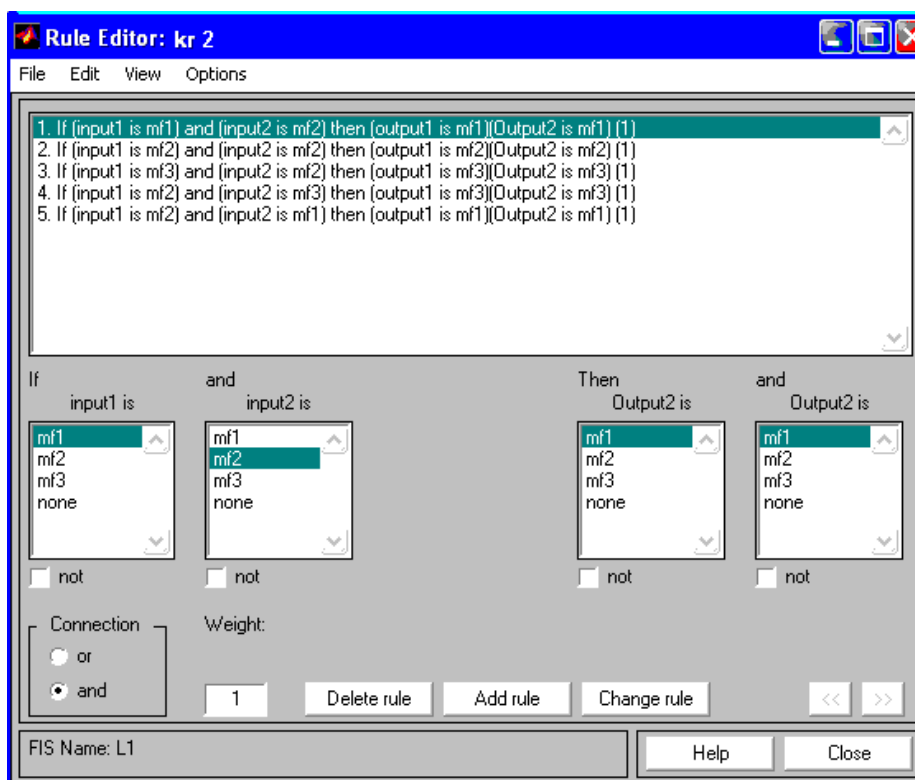


Рис. 3.9 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів C_i згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на рис. 3.10. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну І-складову регулятора, а «output2» – відповідно П-складову.

Для запуску синтезованого алгоритму перетягнуто на робоче поле створення моделі SIMULINK блок «Fuzzy Logic Controller» зі стандартної бібліотеки. У відкритому вікні «Fuzzy Logic Controller» було записано в запропонованому полі ім'я fis-файлу, а в головному вікні налаштування fis-файлу було вибрано File / Save to Workspace для завантаження у робочій простір середовища MATLAB нечіткого алгоритму управління.

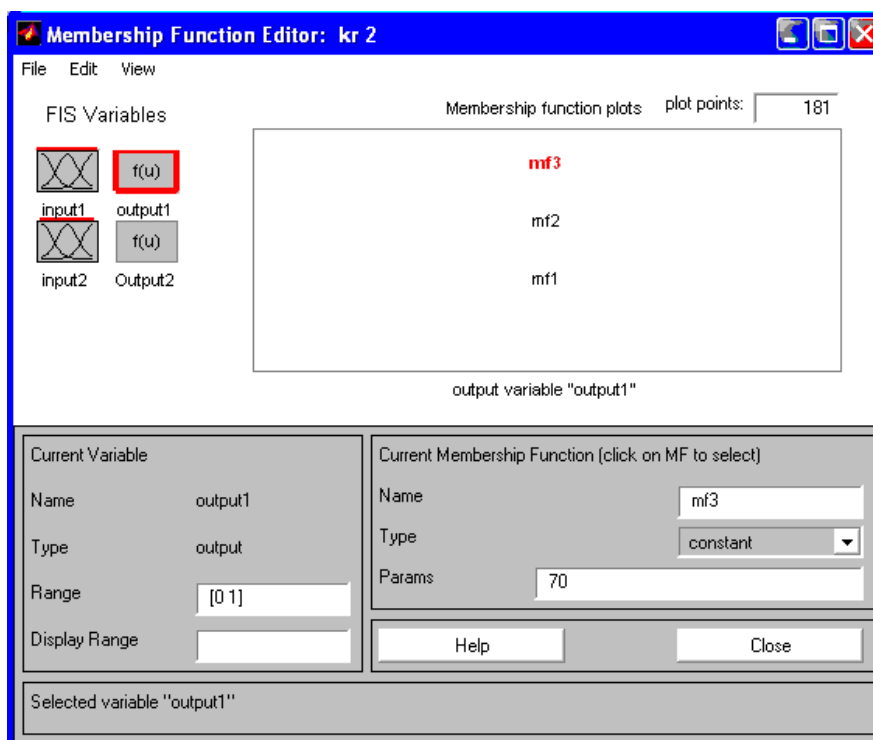


Рис. 3.10 – Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з нечітким регулятором, фрагмент якої представлений на рис. 3.11. З рисунку 3.11 видно, що управляюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

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

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

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

Слід зазначити, що при синтезі нечіткого логічного регулятора «Fuzzy Logic Controller» всі функції приналежності к нечітким множинам та логічні правила функціонування визначені на базі експертних даних. А потім скореговані при моделюванні методом «проб і помилок». Також логічні правила функціонування були визначені з урахуванням правил

функціонування нечітких регуляторів, представлених у відомих наукових роботах, одних із перших з Fuzzy управління.

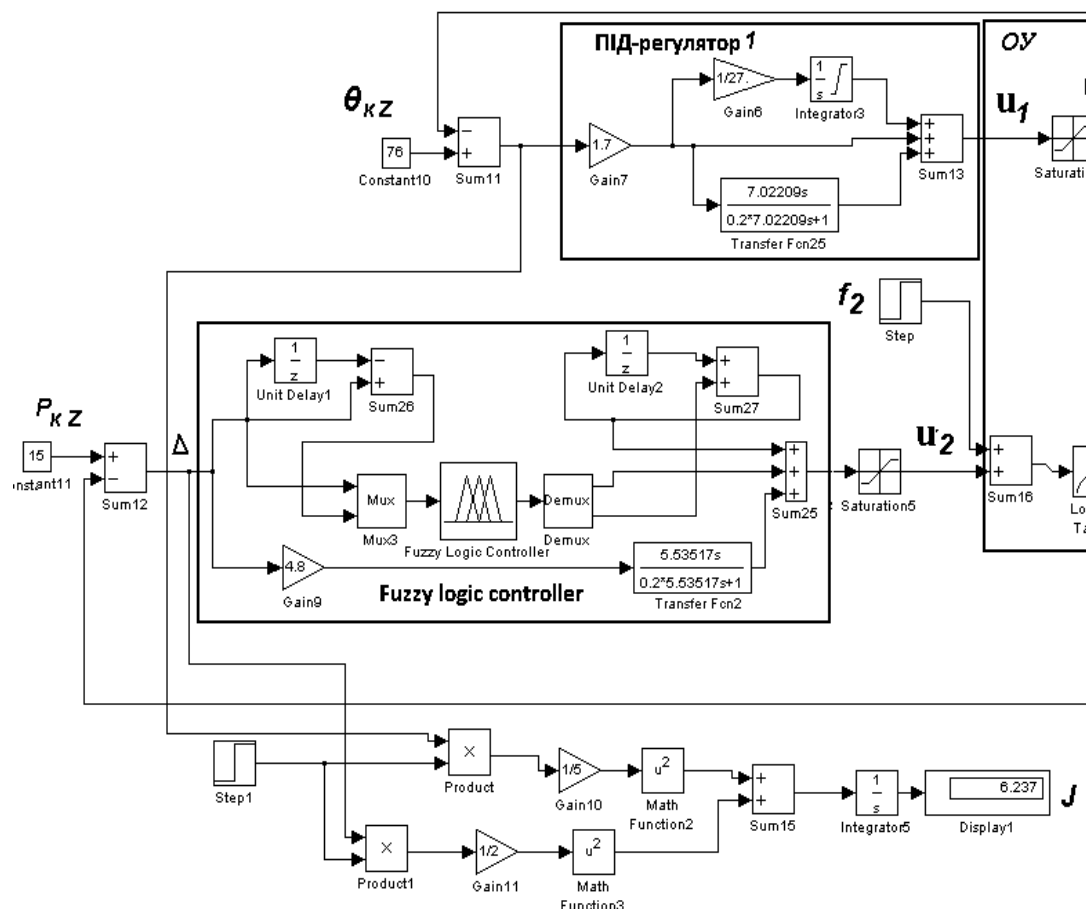


Рис. 3.11 – Фрагмент схеми моделювання САУ з нечітким регулятором

3.5 Застосування нечіткої логіки для підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора

Підстроювання регулятора може бути виконана оператором на підставі правил або автоматично, за допомогою блоку нечіткої логіки (рис. 3.12). Блок нечіткої логіки (фаззи-блок) використовує базу правил підстроювання і методи нечіткого висновку. Фаззи-підстроювання дозволяє зменшити перерегулювання, знизити час перехідного процесу і підвищити робастність ПД-регулятора.

Процес автонастроювання регулятора за допомогою блоку нечіткої логіки починається з пошуку початкових значень коефіцієнтів регулятора

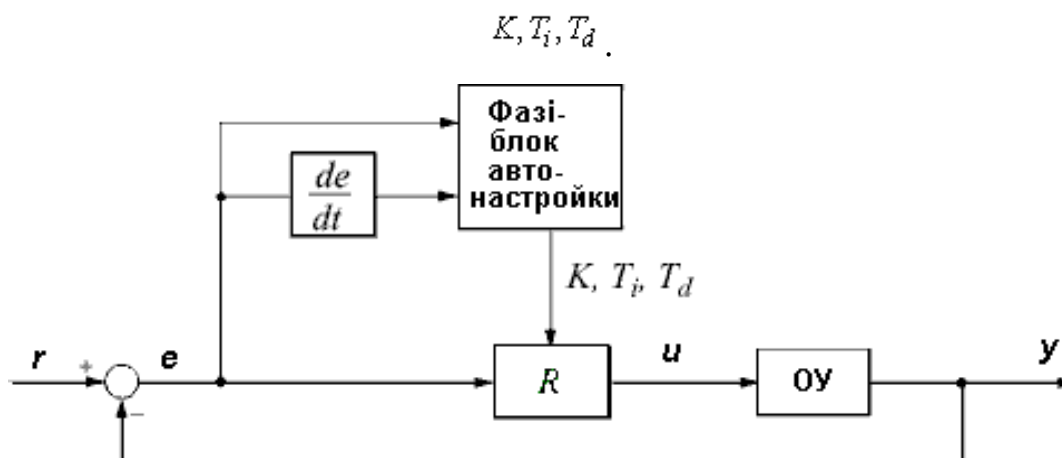


Рис. 3.12 – Структура САР з блоком автонастроювання на основі нечіткої логіки

Якщо відома статична характеристика за каналом регулювання яку можливо розділити на слідуючи відповідні зони впливу управляючої дії u , % на регульовану зміну X :

1. Зона високого впливу u , % на регульовану зміну X ,
2. Зона середнього впливу u , % на регульовану зміну X ,
3. Зона невеликого впливу u , % на регульовану зміну X .

Границі цих зон неможливо визначити чітко тому можливо застосувати алгоритм нечіткої логіки для коректування параметрів ПД-регулятора з метою покращення якості регулювання.

У нашому випадку коректування параметрів ПД регулятора за каналом « $u_2 - P_k$ » можливо якщо входними змінними для фазі-блоку автонастройки будуть входні та вихідні змінні відповідного каналу регулювання. За цими змінними можливо визначити зону статичної характеристики каналу регулювання.

У редакторі Fuzzy controller був визначений алгоритм нечіткого висновку Сугено-0 порядку для фазі-блоку авто настройки (рис. 3.13). Були визначені у відповідному редакторі функції приналежності до нечітких множин – управляючий вплив невеликий PM , управляючий вплив середній PE та управляючий вплив великий P (Рисунок 2). Також на рис. 3.14 представлені функції приналежності до

множин – регульована зміна велика та не велика за другим вхідним впливом input 2, фазі блока настройки.

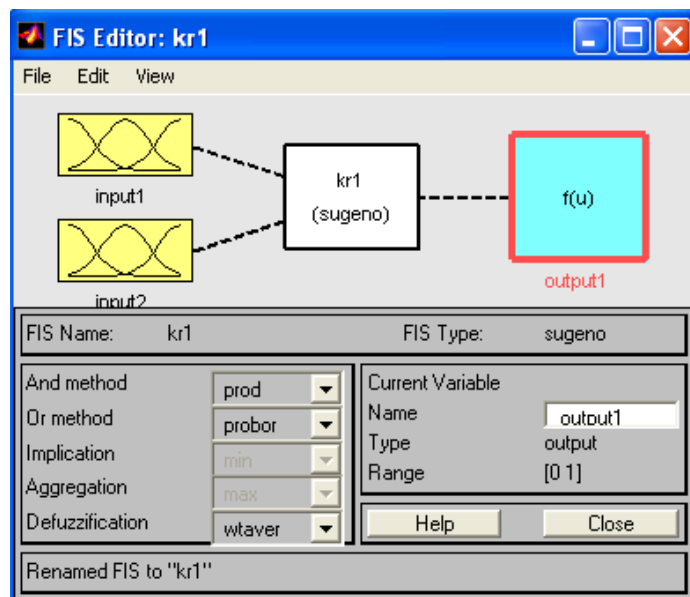


Рис. 3.13 – Вікно редактора Fuzzy controller для формування фазі-блоку авто настройки ПД-регулятора

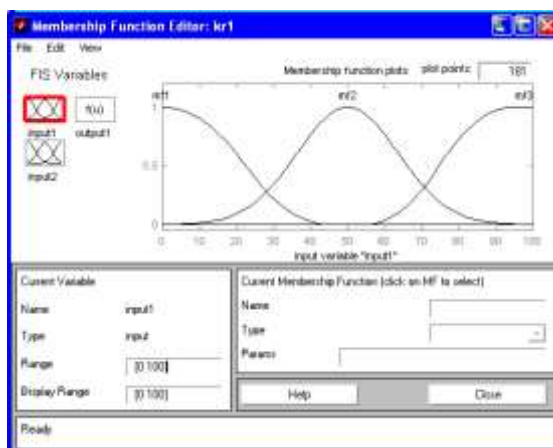


Рисунок 3.14 Вікно редактора формування функцій приналежностей до нечітких безлічей PM, PE, P

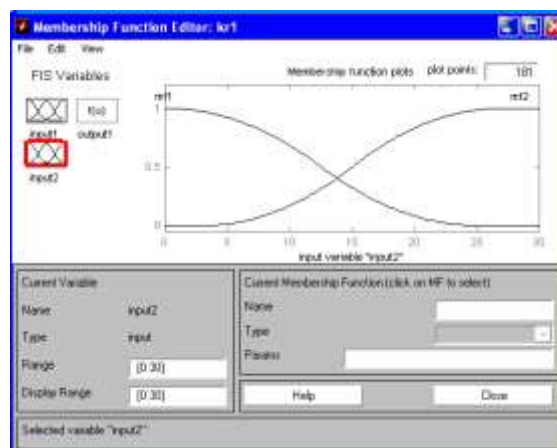


Рисунок 3.15 – Вікно редактора формування функцій приналежностей до нечітких безлічей $P_k \in PM$ та $P_k \in P$

База правил функціонування блоку коректування параметрів регулятора була визначена у наступному форматі:

П1: Якщо $P_k \in PM$ і $u \in PM$ то $w=1,2$;

П2: Якщо $P_k \in PM$ і $u \in PE$ то $w=1$;

ПЗ: Якщо $P_k \in PM$ і $u \in P$ то $w=0,7$;

П4: Якщо $P_k \in P$ і $u \in PM$ то $w=1,1$;

П5: Якщо $P_k \in P$ і $u \in PE$ то $w=1$;

П6: Якщо $P_k \in P$ і $u \in P$ то $w=0,9$.

Представлені правила були відображені у Fuzzy редакторі як показано на рисунку 3.16 згідно з таблицею бази правил 3.2. Також згідно з таблицею бази правил були визначені вихідні значення у вікні редактора як показано на рис. 3.17.

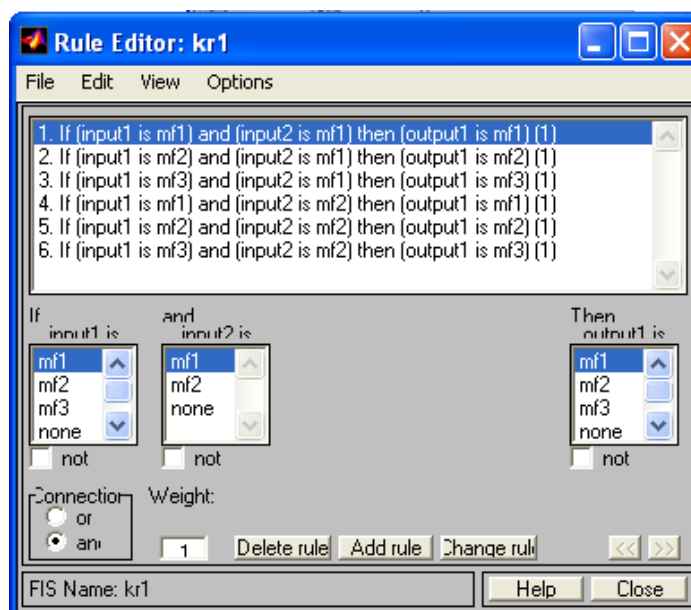


Рис. 3.16 – Вікно редактора правил функціонування Fuzzy – блока нечіткого керування

Таблиця 3.2 – Таблиця бази знань Fuzzy-блока ПІД-регулятора

$P_k \backslash u_2$	PM (Невелике)	PE (середнє)	P (Велике)
PM	1,2	1	0,7
Z	1,1	1	0,9

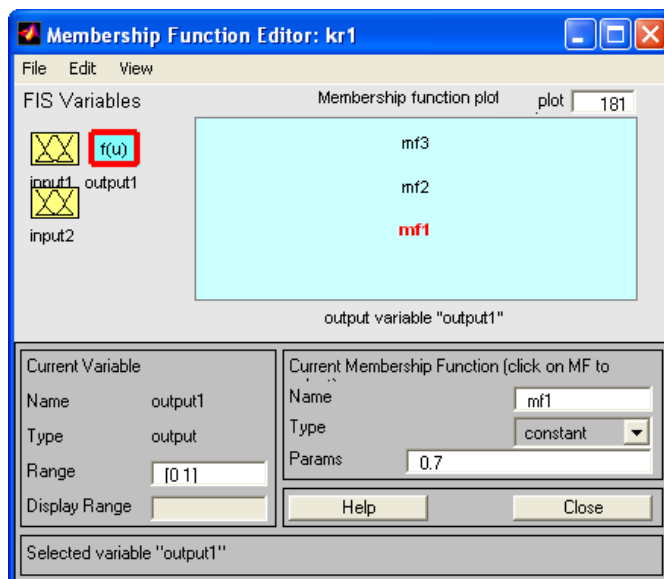


Рис. 3.17 – Вікно редактора вихідних значень Fuzzy-блока середовища MATLAB\Simulink

В остаточному випадку в програмного середовище MATLAB\Simulink була визначена схема моделювання САУ з ПД-регуляторами та з боком фазі-настройки що показана на рисунку 3.18.

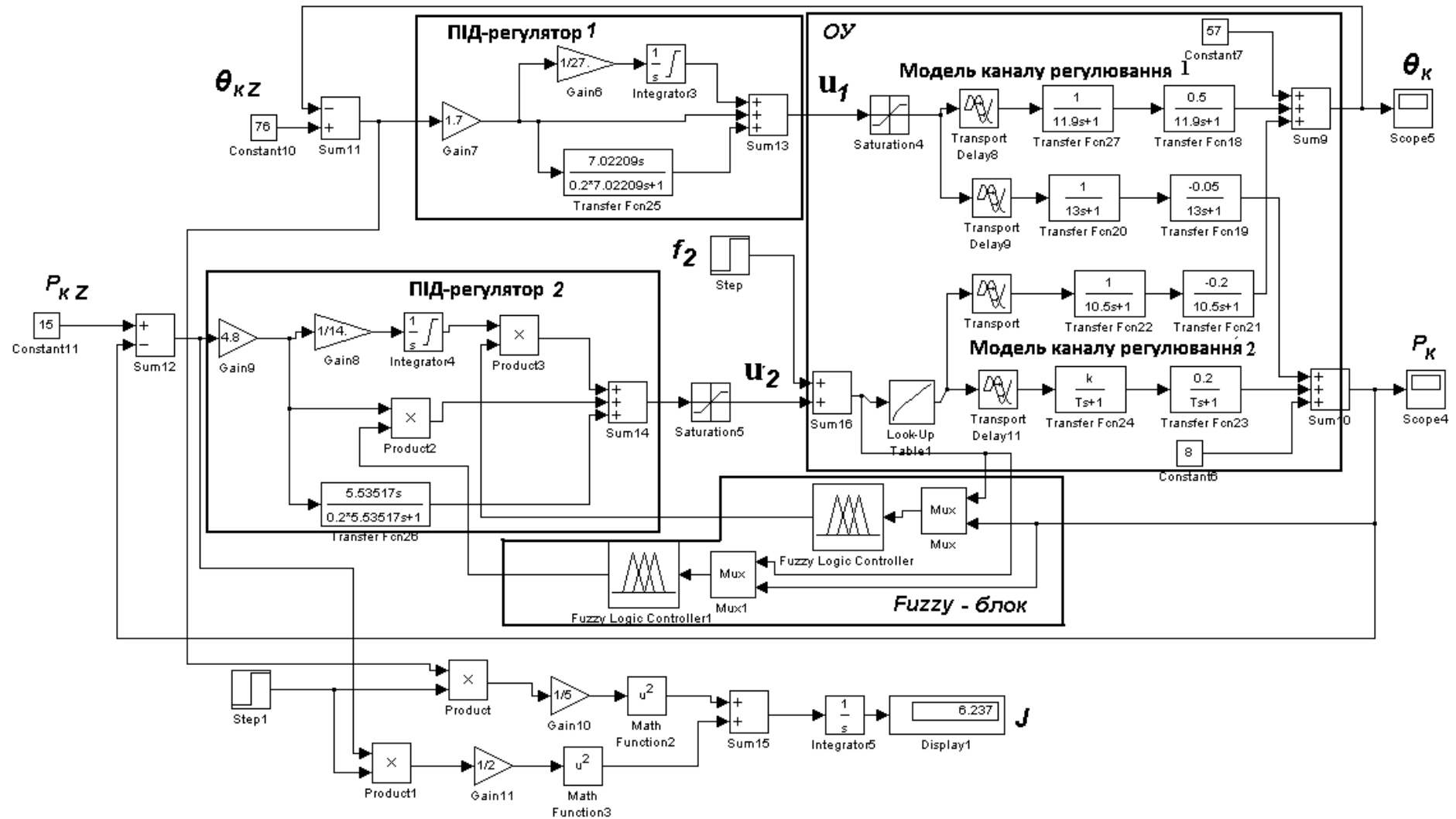


Рис. 3.18 – Структурна схема моделі САУ з традиційними ПІД-регуляторами і Fuzzy блоком, що реалізована засобами

3.6 Порівняльний аналіз функціонування САУ з традиційним ПД-регулятором і САУ з нечітким регулятором

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 ПД-регулятором.

На рис. 3.19 представлені відповідні схеми моделювання САУ з ПД регулятором та САУ з нечітким регулятором якій відтворює її складову ПД регулятора. Як можна побачити з рисунку диференціальна Д- складова однакова в різних системах управління. Такі системи були представлені паралельно для ви значення відповідних перехідних характеристик для порівняльного аналізу за прямими показниками якості регулювання.

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

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

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

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

.....

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

де x — вхідна змінна(ім'я для відомих значень даних), z — змінна виводу(ім'я для значення даних, яке буде обчислене). A_i та B_i — нечіткі

множини, визначені на X та Z відповідно за допомогою функції приналежності та (z) .

У представлений ситуації даних вивід у формі алгоритму Мамдані математично можна представити наступним чином.

1. Введення нечіткості (fuzzification): для заданого(чіткого) значення аргументу $x = x_0$ знаходяться степені істинності для передумов кожного правила $a_i = (x_0)$.

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

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

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

де через $\wedge$ позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

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

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

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

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

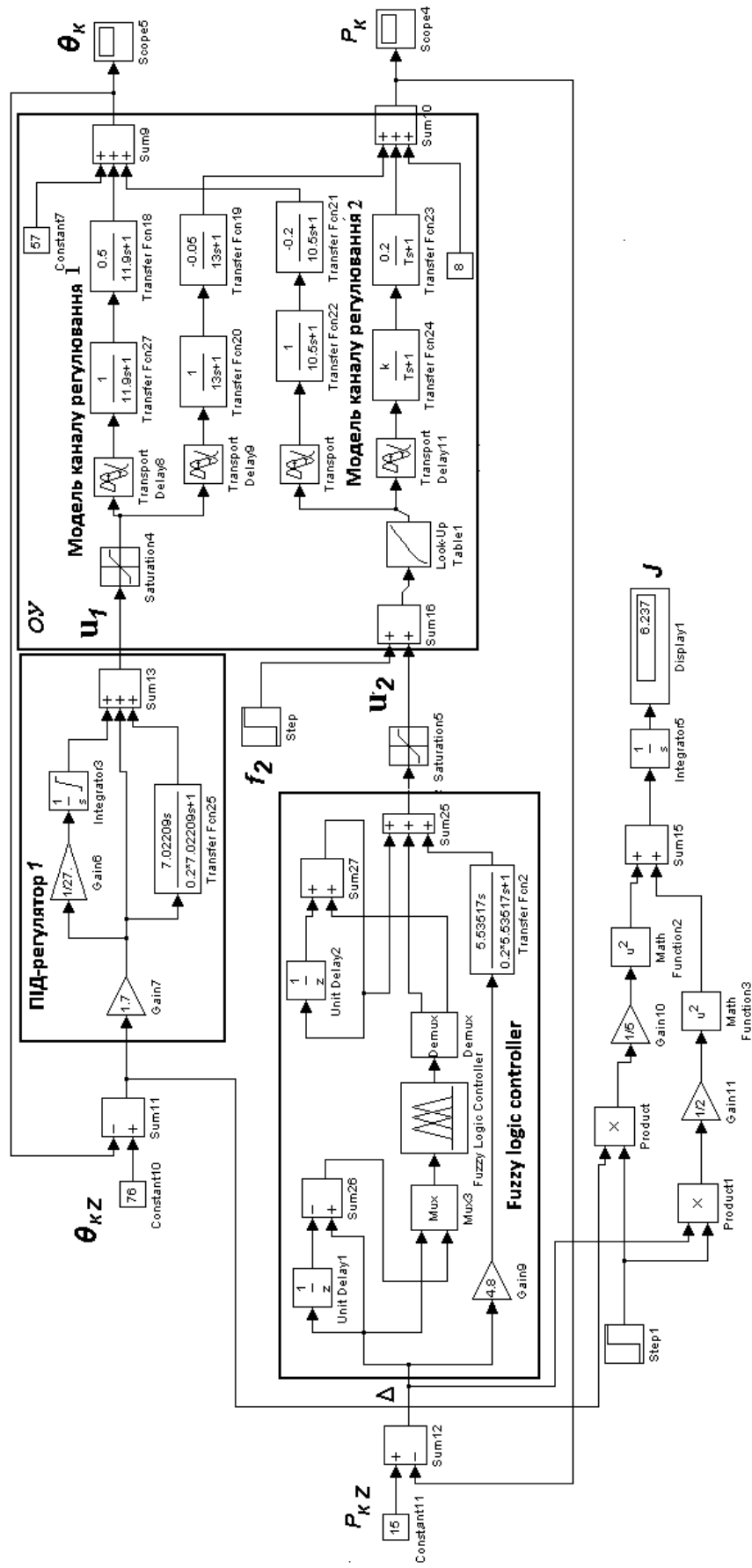


Рис. 3.19 – Структурні схеми моделей САУ з ПІД-регулятором і з нечітким регулятором для отримання графіків перехідних процесів з метою порівняльного аналізу функціонування різних САУ

Таким чином, для переходу від Сугено 0-го порядку до алгоритму Мамдані необхідно визначити вихідні функції приналежності $C_1(z)$, $C_2(z)$, $C_3(z)$ замість відповідних значень W_2 , $-W_2$, та C_1 , C_2 . На рис. 3.20 та 3.21 представлені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам – «приріст управляючого впливі» великий (PE), «приріст управляючого впливі» приблизно нульовий (Z), «приріст управляючого впливі» від’ємний (NE).

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

Для виконання чисельних розрахунків на етапі дефазифікації для алгоритму Мамадані використана формула центру ваги (тяжіння) (англ. *Centre of Gravity, CoG*) або центроїд площі що розраховується за формулою:

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

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

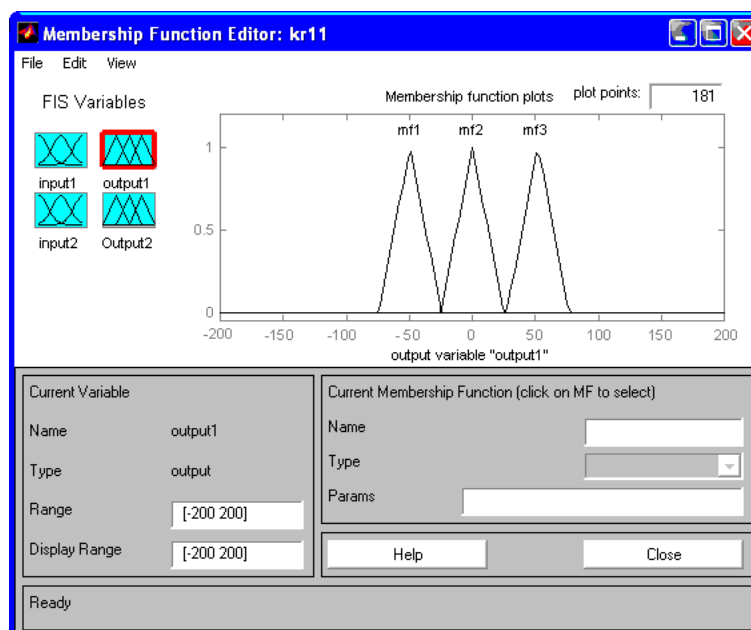


Рис. 3.20 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «управляючий вплив PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

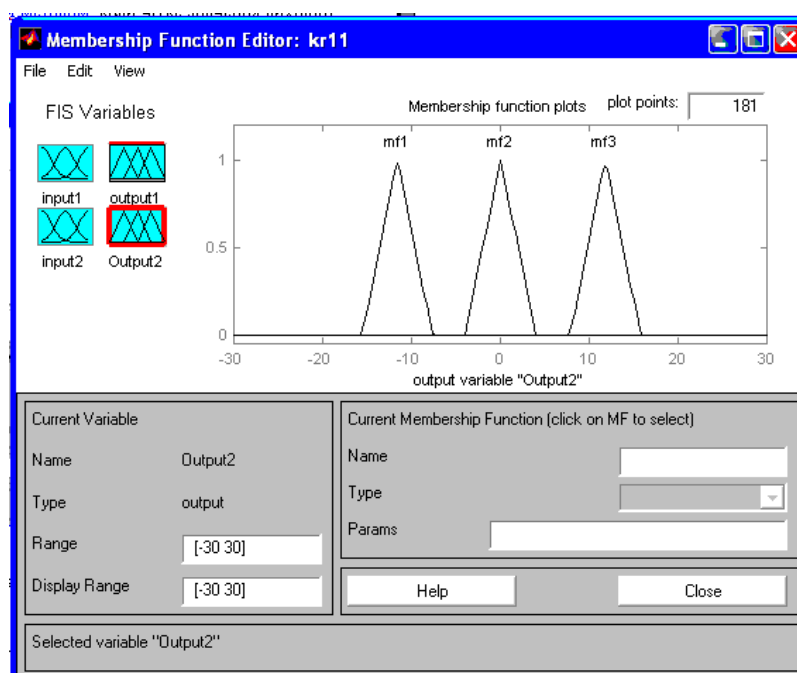


Рис. 3.21 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

При дефазифікації методом центру тяжіння звичайне (чітке) значення вихідної змінної дорівнює абсцисі центру ваги площі,

обмеженою графіком кривої функції приналежності відповідної вихідної змінної.

Таким чином, на рис. 3.22 представлені графіки перехідних процесів при детермінованому збурюванні.

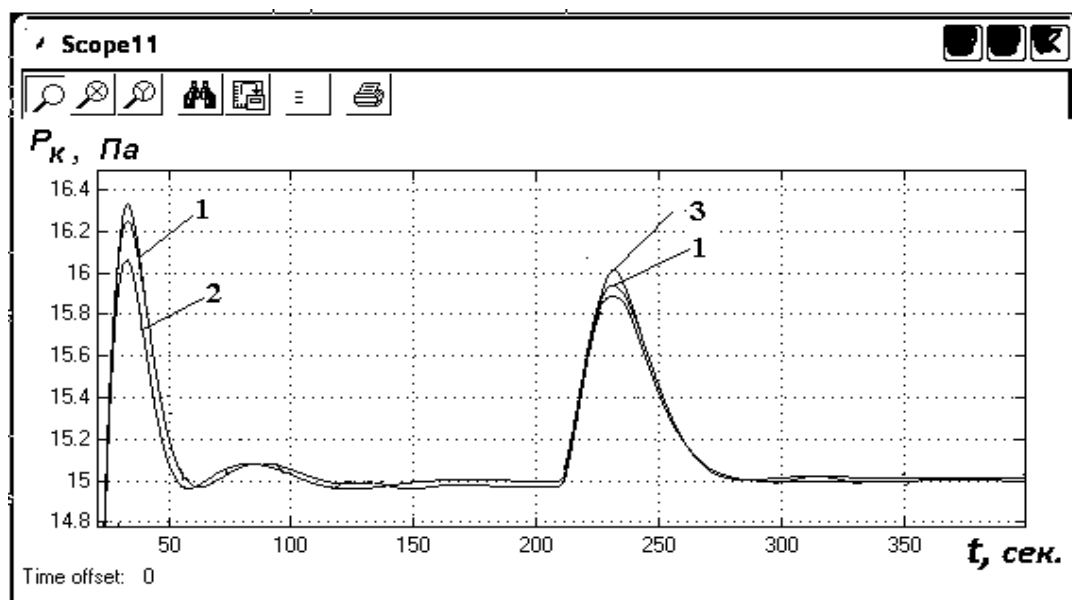


Рис. 3.22 – Графіки перехідних процесів за витратою повітря до топки котла що отримані в результаті моделювання різних САУ, графіки 1– перехідний процес у САУ з ПІД регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з Fuzzy-блоком настройки; графік 3 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором який функціонує згідно з алгоритмом виведення Мамдані

Згідно з графіками перехідних процесів можна зробити висновок що завдяки використанню нечіткого регулятора в системі не дало покращати якість регулювання за розрідженням в камері теплової обробки. Таким чином робота далі буде пов'язана з перетворенням системи з нечітким регулятором в неймережеву систему управління для подальшої процедури оптимізації.

3.7 Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів управління

Основні області застосування нейронних мереж: автоматизація процесу класифікації, автоматизація прогнозування, автоматизація процесу розпізнавання, автоматизація процесу прийняття розв'язків; управління, кодування і декодування інформації; апроксимація залежностей і ін. Штучні нейронні мережі (ШНМ) у цей час знаходять широке застосування в самих різних предметних областях. Одним з важливих напрямків використання штучних нейронних мереж є нейроуправління в системах автоматичного керування різних типів. Нейроуправління — це окремий випадок інтелектуального керування, при якому у якості інструмента для розв'язку завдань керування застосовуються штучні нейронні мережі.

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

Наприкінці XX-го століття в розвитку теорії автоматичного керування почався новий етап, пов'язаний з адаптивною постановкою основного завдання керування. Його особливість полягає у відсутності споконвічних знань про математичну модель об'єкта керування, будь то диференціальні рівняння або щільності ймовірностей випадкових зовнішніх впливів. Об'єкт — це чорний ящик, що зазнає невідомі випадкові впливи. Нам доступні тільки його входи і виходи. Ціль системи керування (СК) полягає в тому, щоб уже в

процесі функціонування визначити закон регулювання, що забезпечує оптимальну поведінку об'єкта. Для розв'язання цього завдання на додаток до основного контуру до системи керування вводиться контур адаптації (рис. 3.23).

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



Рис. 3.23 – Загальна схема адаптивної системи керування

Штучна нейронна мережа як нейрорегулятор здійснює нелінійне перетворення вхідного сигналу і формування управляючого впливу. При цьому регулятор може мати велику кількість оптимізованих параметрів (коефіцієнтів міжнейронних зв'язків), що дає можливість оптимізувати його практично під будь-який об'єкт з нелінійною статичною характеристикою.

У даній роботі нейрона мережа – це математична модель з параметрами, що оптимізуються, яка буде виконувати функції розробленого раніше нечіткого логічного регулятора.

3.8 Розробка моделі САУ на основі штучних нейронних мереж

Використання ШНМ дозволяє вирішувати завдання керування нелінійним об'єктом шляхом створення системи управління (СУ) з нейроконтролером (НК), що навчається. Тут під навчанням мається на увазі процес вироблення в СУ бажаної реакції на зовнішні сигнали шляхом багаторазових впливів на систему зовнішнім корегуванням. Зовнішнє коректування здійснюється “учителем”, якому відома бажана реакція СУ на певні впливи. Таким чином, при навчанні “учитель” повідомляє системі додаткову інформацію про те, вірна або невірна її реакція (рис. 3.24)

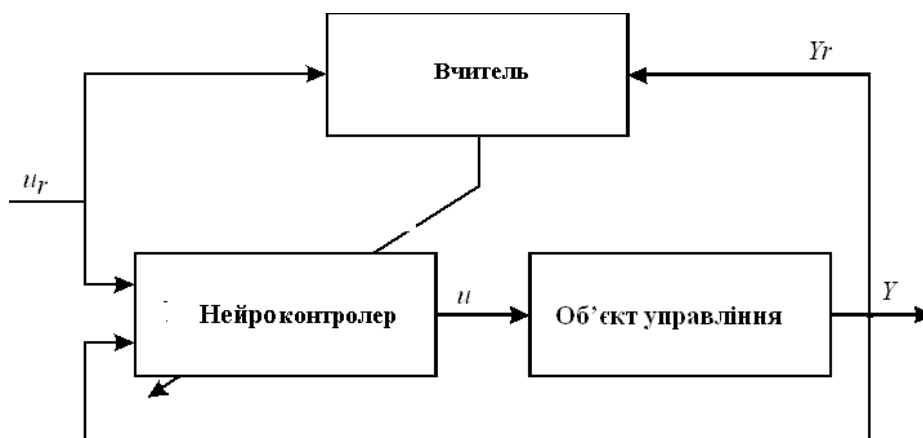


Рис. 3.24 – Загальна схема системи керування з нейроконтролером, що навчається

При адаптації навчання використовується для одержання інформації про стан і характеристики СУ, необхідної для оптимального керування в умовах невизначеності. По суті, адаптацію можна ототожнити з оптимізацією в умовах недостатньої апріорної інформації.

Математична модель, що застосовується у якості нейронелементу у нейромереживому алгоритмі управління, аналогічна відомим найбільш розповсюдженим моделям, які схожі з формальною моделлю нейрона Маккаллоха – Питса. У даній моделі сигнали, що поступили на входи нейроелементу, множаться на свої ваги. Сигнал першого входу x_1 множиться на відповідну вагу w_1 . У підсумку отримуємо $x_1 w_1$. І так до n-ого входу. У підсумку на останньому вході отримуємо $x_n w_n$. Потім всі множення передаються в суматор. Уже виходячи з його назви можна зрозуміти, що він робить. Він просто підсумовує всі вхідні сигнали, помножені на відповідні ваги:

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

Просто так подавати виважену суму на вихід досить безглуздо. Нейроелемент повинен якось обробити її і сформувати адекватний вихідний сигнал. Саме для цих цілей і використовують функцію активації. Вона перетворює зважену суму в якесь число, яке і є виходом нейрона.

Графічне представлення моделі нейроелемента з графічним представленням різних функцій активації що диференцовані відображено на рис. 3.25. Таки нейронелементи будуть складати нейронні мережі які відтворюють нелінійне перетворення в різних складових регулятора як показано на рис. 3.25.

Багатошарові нейронні мережі це більш складні мережі.. Такі мережі, крім вхідного і вихідного шарів нейронів, характеризуються ще і прихованим шаром (шарами). Зрозуміти їх розташування просто - ці шари знаходяться між вхідним і вихідним шарами. Але такі багатошарові нейрони мережі мають достатньо поширені відповідні розроблені методи тренування та визначення коефіцієнтів міжнейронних з'єднань. Один із відомих та достатньо поширених методів це алгоритм зворотного поширення помилки який присутній в програмній можливості середовища MATLAB 5.2. За допомогою цього

метода можливо налаштувати визначену нейронну мережу за відповідними командами в вікні Commabd Window середовища MATLAB.

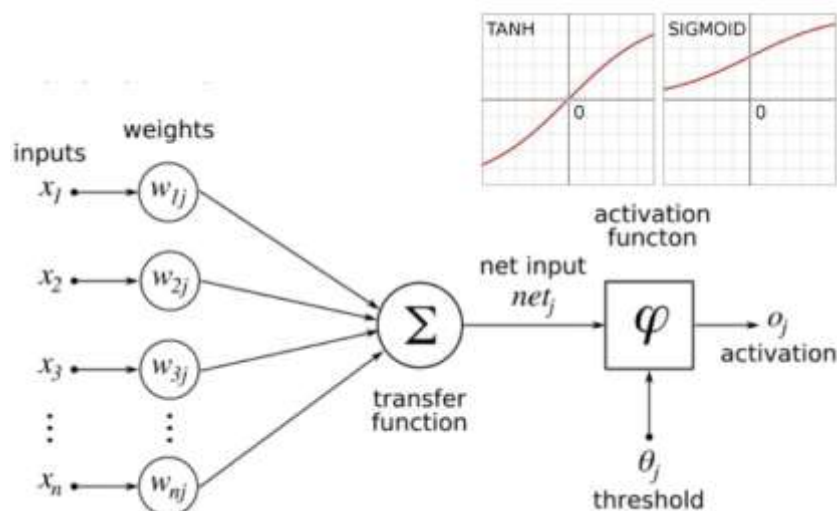


Рис. 3.25 – Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

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

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 (tansig). Така функція дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі управління. Графічне представлення функції відображено на рис. 3.26.

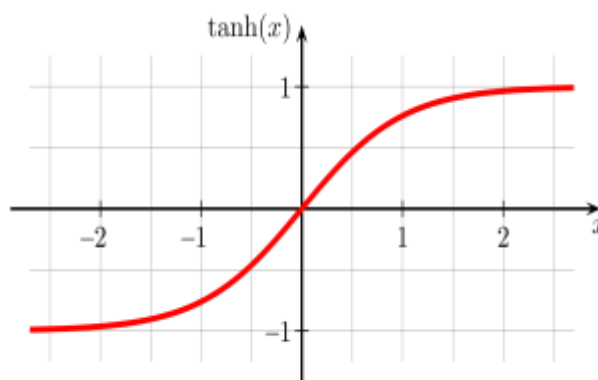


Рис. 3.26 – Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

Якщо розглядати варіант нейромержевого алгоритму управління то нейрорегулятор можливо спочатку налаштувати також за методом зворотного поширення. В цьому випадку треба визначити кількість визначених похибок регулювання для тренування нейронної мережі. На рис. 3.28 також зображені похибки на кожному нейроні для коректування ваг за методом зворотного поширення. Якщо така структура буде недостатня, то необхідно буде збільшити кількість нейронів в вхідному шарі мережі та збільшити кількість шарів до трьох. В такому випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рис. 3.27.

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

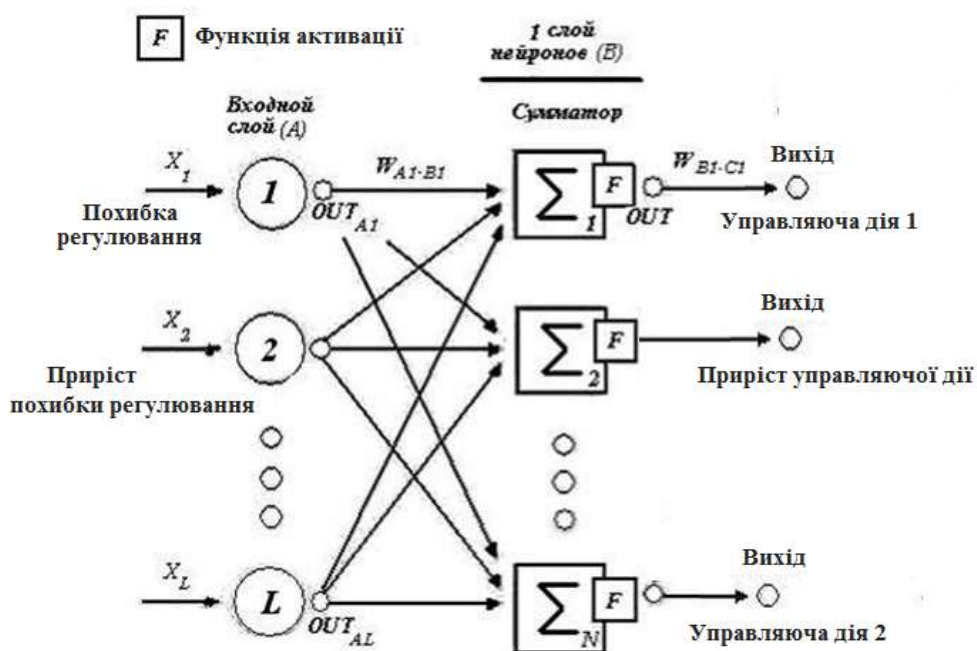


Рис. 3.27 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

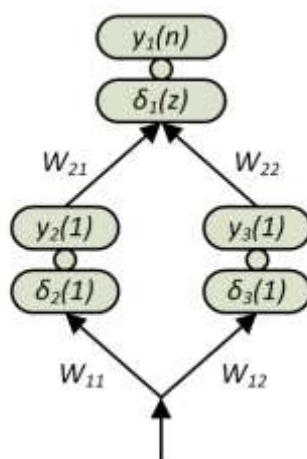


Рис. 3.28 – Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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

Таблиця 3.3 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	I	u	Δu
1	-8	-39	-0,27
2	-5	-24	-0,17
3	-0,5	-2,4	-0,0172
4	0	0	0
5	0,5	2,4	0,0175
6	5	25	0,18
7	8	39	0,27

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 рис. 3.29.

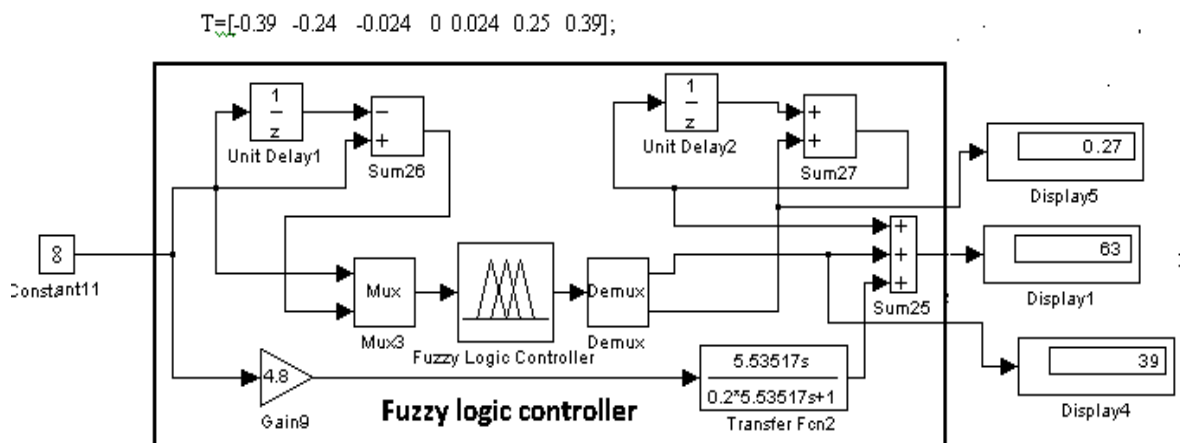


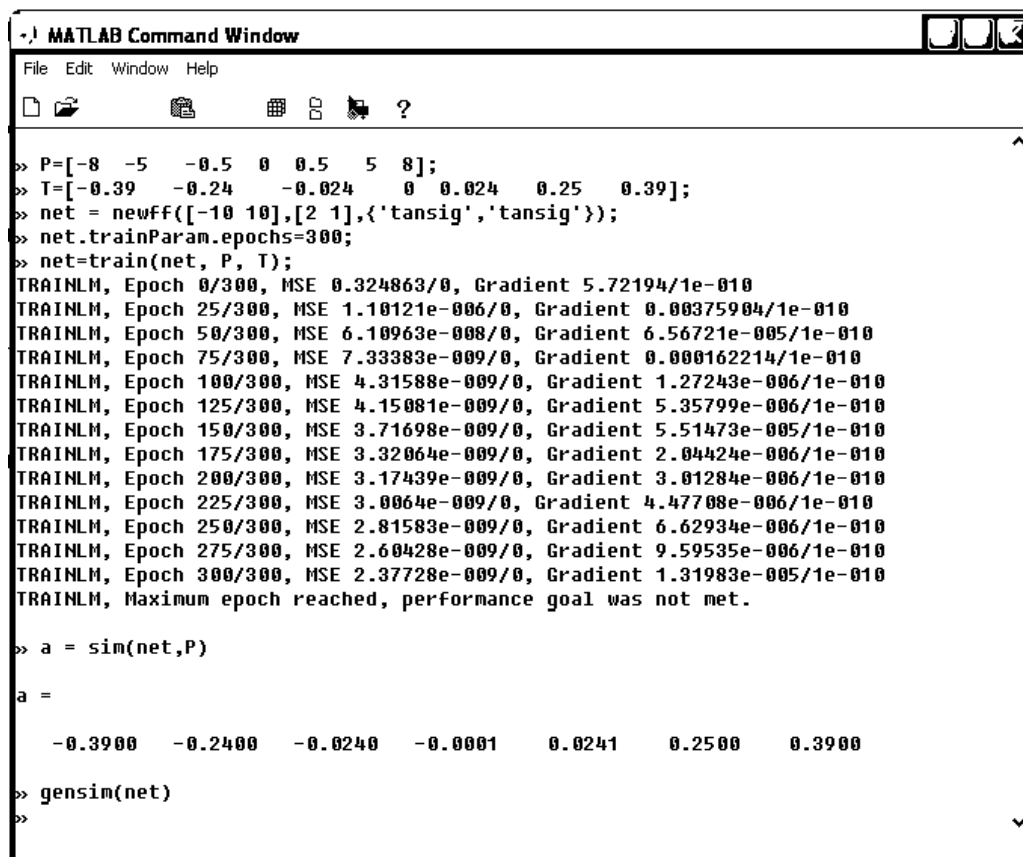
Рис. 3.29 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.30 і 3.31 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у командній строчці Matlab – command window, в результаті чого згенерується відповідна нейронна мережа.

```

» P=[-8 -5 -0.5 0 0.5 5 8];
» T=[-0.39 -0.24 -0.024 0 0.024 0.25 0.39];
» net = newff([-10 10],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.324863/0, Gradient 5.72194/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 1.10121e-006/0, Gradient 0.00375904/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 6.10963e-008/0, Gradient 6.56721e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 7.33383e-009/0, Gradient 0.000162214/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 4.31588e-009/0, Gradient 1.27243e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 4.15081e-009/0, Gradient 5.35799e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 3.71698e-009/0, Gradient 5.51473e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 3.32064e-009/0, Gradient 2.04424e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 3.17439e-009/0, Gradient 3.01284e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 3.0064e-009/0, Gradient 4.47708e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 2.81583e-009/0, Gradient 6.62934e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 2.60428e-009/0, Gradient 9.59535e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 2.37728e-009/0, Gradient 1.31983e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
    -0.3900    -0.2400    -0.0240    -0.0001     0.0241     0.2500     0.3900
» gensim(net)
»

```



```

- MATLAB Command Window
File Edit Window Help
[Icons] ?
» P=[-8 -5 -0.5 0 0.5 5 8];
» T=[-0.39 -0.24 -0.024 0 0.024 0.25 0.39];
» net = newff([-10 10],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.324863/0, Gradient 5.72194/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 1.10121e-006/0, Gradient 0.00375904/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 6.10963e-008/0, Gradient 6.56721e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 7.33383e-009/0, Gradient 0.000162214/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 4.31588e-009/0, Gradient 1.27243e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 4.15081e-009/0, Gradient 5.35799e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 3.71698e-009/0, Gradient 5.51473e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 3.32064e-009/0, Gradient 2.04424e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 3.17439e-009/0, Gradient 3.01284e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 3.0064e-009/0, Gradient 4.47708e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 2.81583e-009/0, Gradient 6.62934e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 2.60428e-009/0, Gradient 9.59535e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 2.37728e-009/0, Gradient 1.31983e-005/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
    -0.3900    -0.2400    -0.0240    -0.0001     0.0241     0.2500     0.3900
» gensim(net)
»

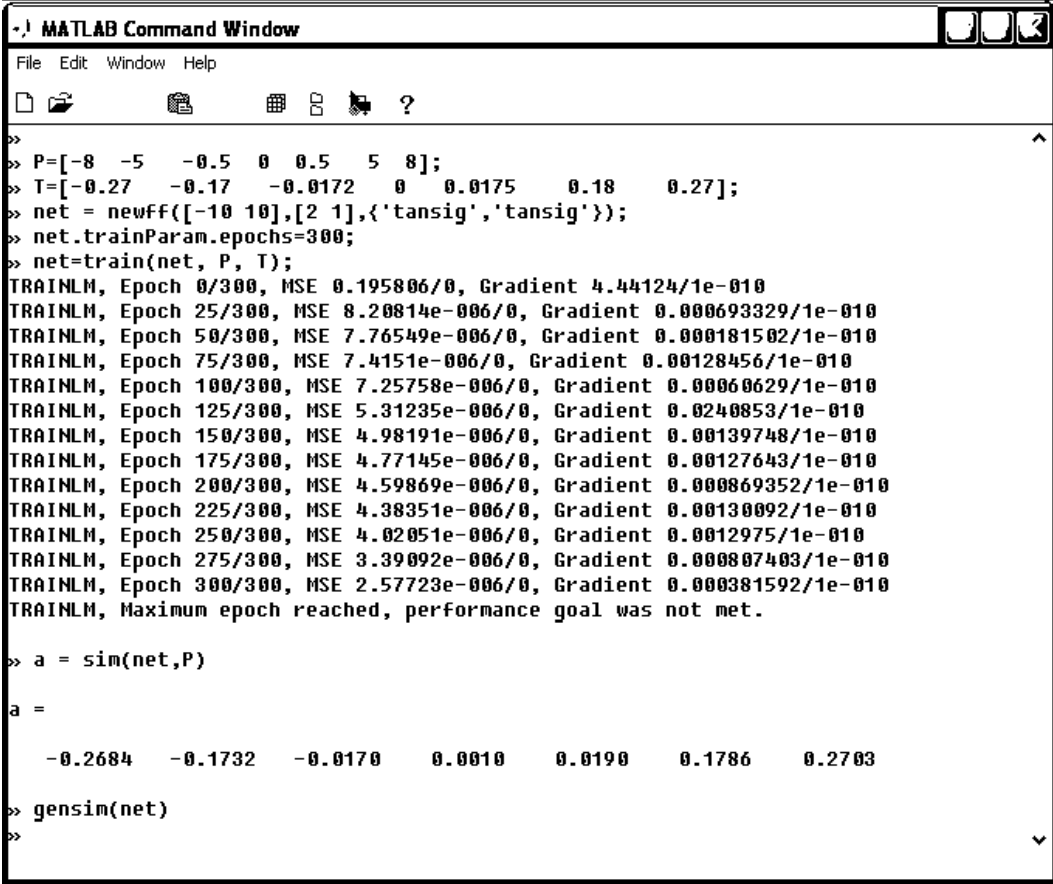
```

Рис. 3.30 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

» P=[-8 -5 -0.5 0 0.5 5 8];
» T=[-0.27 -0.17 -0.0172 0 0.0175 0.18 0.27];
» net = newff([-10 10],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.195806/0, Gradient 4.44124/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 8.20814e-006/0, Gradient 0.000693329/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 7.76549e-006/0, Gradient 0.000181502/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 7.4151e-006/0, Gradient 0.00128456/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 7.25758e-006/0, Gradient 0.00060629/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 5.31235e-006/0, Gradient 0.0240853/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 4.98191e-006/0, Gradient 0.00139748/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 4.77145e-006/0, Gradient 0.00127643/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 4.59869e-006/0, Gradient 0.000869352/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 4.38351e-006/0, Gradient 0.00130092/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 4.02051e-006/0, Gradient 0.0012975/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 3.39092e-006/0, Gradient 0.000807403/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 2.57723e-006/0, Gradient 0.000381592/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
    -0.2684    -0.1732    -0.0170     0.0010     0.0190     0.1786     0.2703
» gensim(net)
»

```



```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
[Icons]
» P=[-8 -5 -0.5 0 0.5 5 8];
» T=[-0.27 -0.17 -0.0172 0 0.0175 0.18 0.27];
» net = newff([-10 10],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.195806/0, Gradient 4.44124/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 8.20814e-006/0, Gradient 0.000693329/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 7.76549e-006/0, Gradient 0.000181502/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 7.4151e-006/0, Gradient 0.00128456/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 7.25758e-006/0, Gradient 0.00060629/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 5.31235e-006/0, Gradient 0.0240853/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 4.98191e-006/0, Gradient 0.00139748/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 4.77145e-006/0, Gradient 0.00127643/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 4.59869e-006/0, Gradient 0.000869352/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 4.38351e-006/0, Gradient 0.00130092/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 4.02051e-006/0, Gradient 0.0012975/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 3.39092e-006/0, Gradient 0.000807403/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 2.57723e-006/0, Gradient 0.000381592/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
    -0.2684    -0.1732    -0.0170     0.0010     0.0190     0.1786     0.2703
» gensim(net)
»

```

Рис. 3.31 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

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

Характеристики точності навчання показані на рис. 3.32, з яких можливо побачити, що десь на 300-м кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями було закінчено.

Остання команда яка вводиться для відтворення нейронної мережі в середовищі Simulink це команда `gensim(net)`. В результаті виконання цієї команди з'являється нейронна мережа як показано на рис. 3.33.

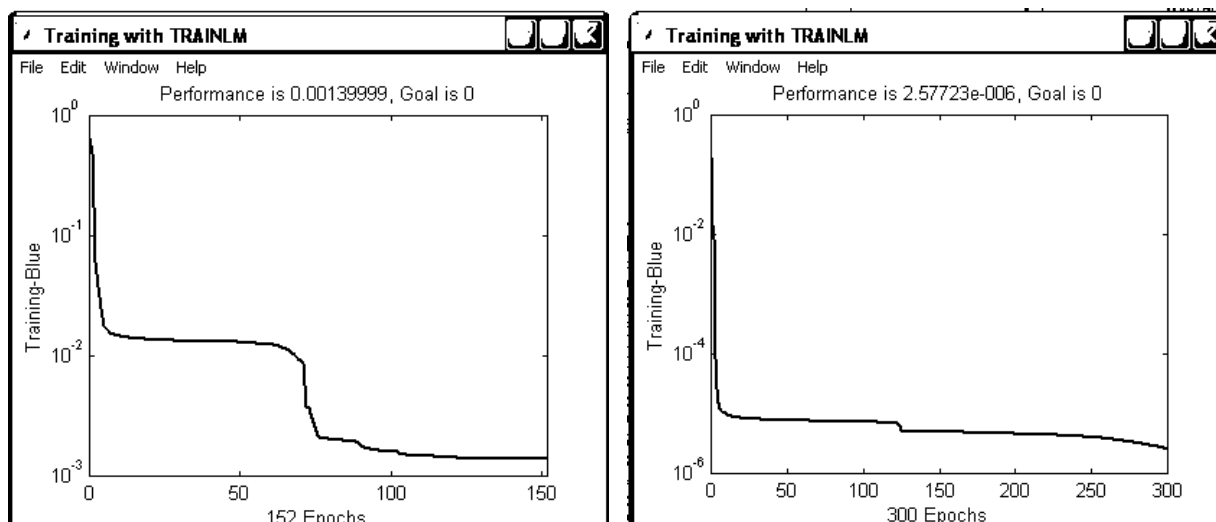


Рис. 3.32 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

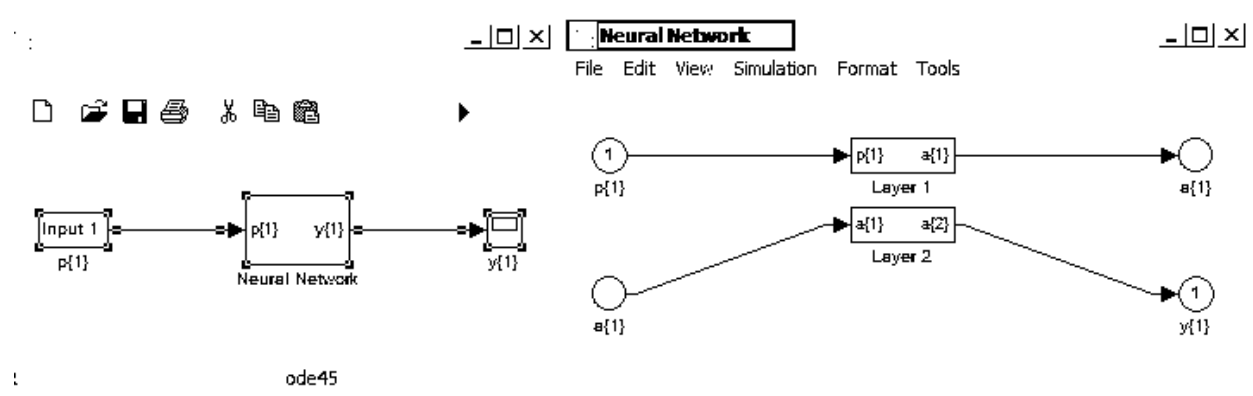


Рис. 3.33 – Сформована нейронна мережа що представляє складову нейрорегулятора

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі. На рис. 3.34 та 3.35 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову та II – складову нейрорегулятора струму двигуна окремо.

Фактичні значення:						
-0.2684	-0.1732	-0.0170	0.0010	0.0190	0.1786	0.2703
Бажані значення:						
-0.27	-0.17	-0.0172	0	0.0175	0.18	0.27

Рис. 3.34 - бажані та фактичні значення вих. сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову нейрорегулятора

Фактичні значення:						
-0.3900	-0.2400	-0.0240	-0.0001	0.0241	0.2500	0.3900
Бажані значення:						
-0.39	-0.24	-0.024	0	0.024	0.25	0.39

Рис. 3.35 – Бажані та фактичні значення вих. сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює II – складову нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених на рис. 3.34 та 3.35, 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):

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

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

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

Похибка для i -того нейрону прихованого шару розраховується за наступною формулою (2):

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

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

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

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 3.36:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0241 - 0.024) * (0.0241) * (1 - 0.0241) = 0.0000024 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) * 0.0000024 = \\ &= -0.0000000143 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) * 0.0000024 = \\ &= 0.0000000351 \end{aligned}$$

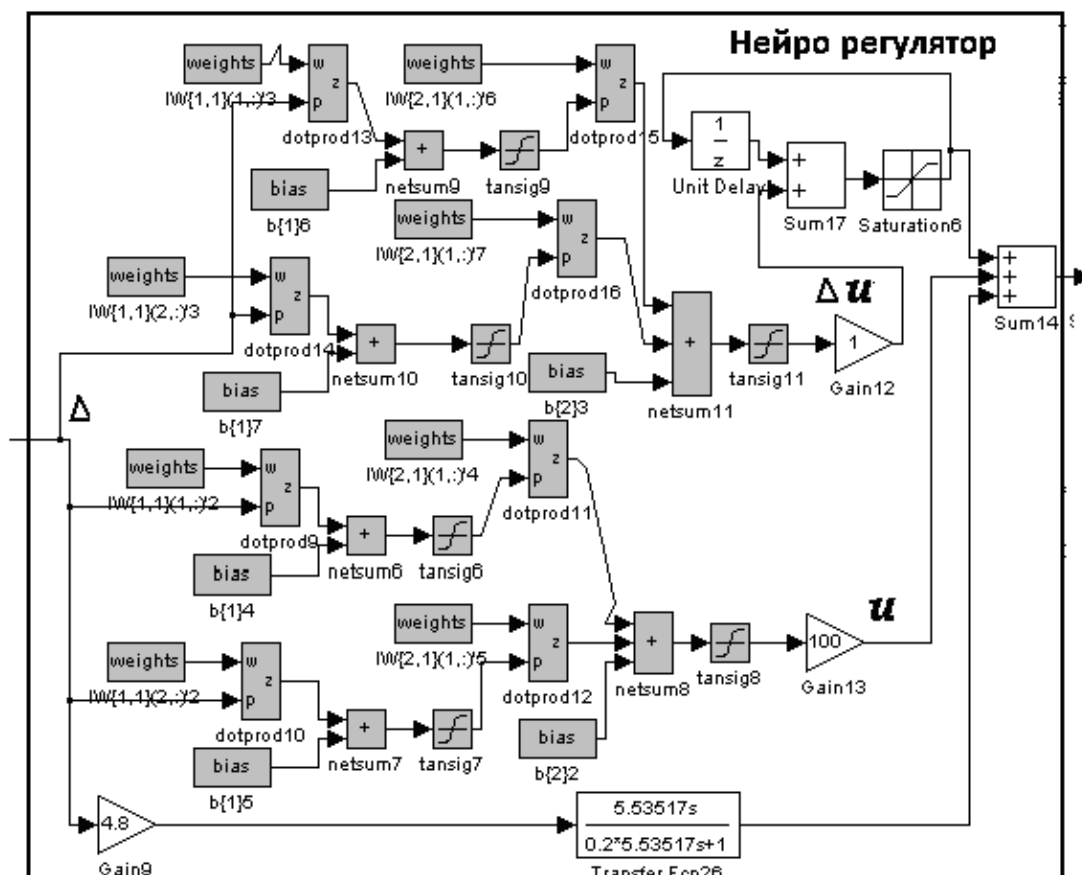
Розрахунок помилок для І – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0190 - 0.0175) * (0.0190) * (1 - 0.0190) = 0.0000279 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.9599 * (1 - 0.9599) * 7.3655548636428527 * 0.0000279 = 0.009443 \\ \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.9766 * (1 - 0.9766) * (-7.3307275810928836) * 0.0000279 = -0.005578 \end{aligned}$$



Ри. 3.37 – Схема моделювання нейронного регулятора

У результаті моделювання САУ з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САУ з нечітким регулятором та традиційним ПД-регулятором. Ці графіки представлені на рисунку 3.38. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором працює незначно гірше, ніж САУ з нечітким регулятором.

Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування складає 80 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПД регулятором, і 90 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому збуренні не значно більше в САУ з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.37. Незважаючи на це регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має 8-м ваг між нейронних з'єднань, а саме параметри які можна оптимізувати для

покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.37, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

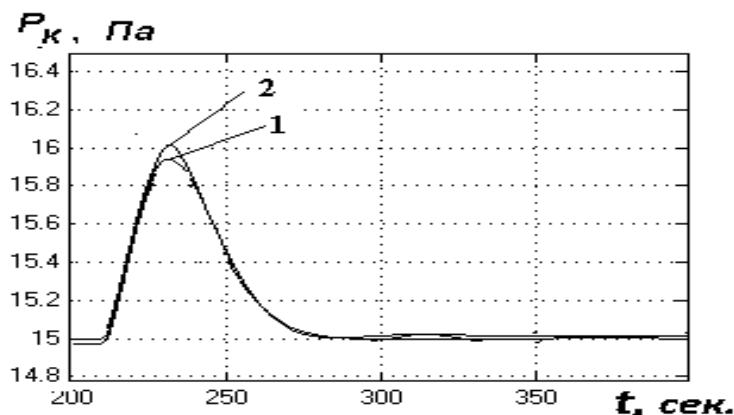


Рис. 3.38 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з ПД регуляторами

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

3.9 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором

Для покращення якості регулювання у роботі була проведена параметрична оптимізація САУ з нейро-регулятором. Оптимізувались вісім параметри настроювання нейрорегуляторів – це вагові коефіцієнти нейронних з'єднань першого-вхідного та другого шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась при таких же умовах, які були при оптимізації САУ з традиційним ПД регулятором.

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

параметричним оптимізатором, структурна схема яка відображена на рисунку 3.39.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленому рисунку 3.40. На рисунку 3.40 представлений результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації САР з нейрорегулятором за визначеним інтегральним критерієм якості роботи системи.

Згідно з рисунків 3.5 та 3.41 можна побачити що вдалося значно покращити якість регулювання порівнявши значення інтегральних критеріїв якості роботи системи. Значення інтегрального показника при САР з ПІД регулятором 6,13 а при САР з нейрорегулятором 4,68.

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

Результати параметричної оптимізації показують, що нейрорегулятор на відмінність від традиційного нечіткого регулятора, має велику можливість налаштування під обраний об'єкт з нелінійною статичною характеристикою каналів регулювання.

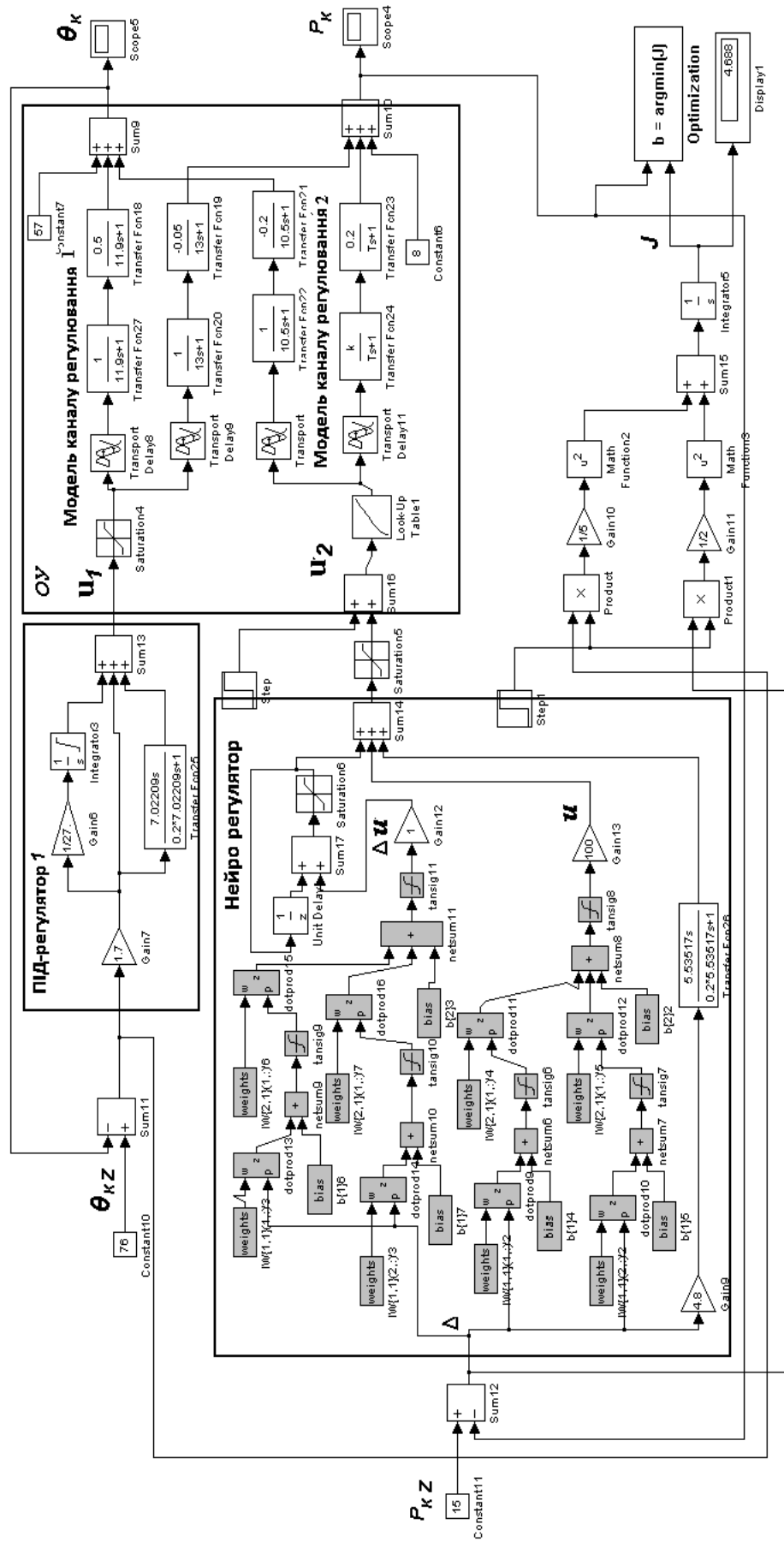
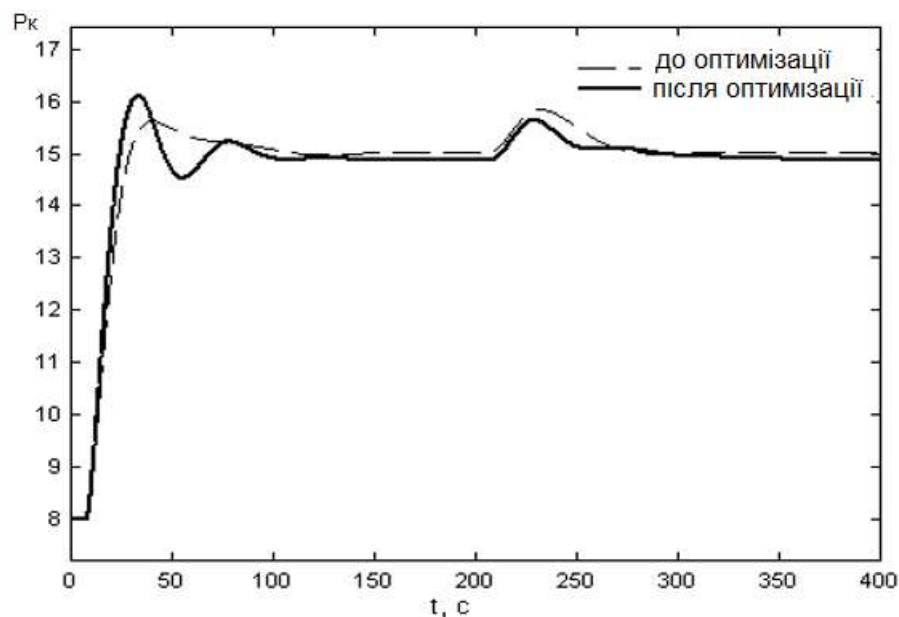


Рис. 3.39 – Структурна схема моделі САУ з нейронним регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink



Ім'я змінних	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критеріїв оптимізації:
k1	0.016425	-100	0.0086421	100	До - 6.8481
k2	-0.23081	-100	-0.21155	100	Після - оптимізації 4.6877
k3	-0.37181	-100	-0.49011	100	Кількість кроків процедури оптимізації:
k4	0.011092	-100	0.0099122	100	
k5	2.4068	-100	2.3717	100	
k6	0.83112	-100	0.82232	100	
					максимальна - 1000
					фактична - 401

Рис. 3.40 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора САР, представленого штучною нейронною мережею, за модульним інтегральним критерієм якості роботи системи

Для визначення принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора необхідно визначити, чи не втрачає стійкість САУ при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні $\pm 20\%$. Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САУ (рис. 3.41).

Параметри перевірки системи на грубість представлена на рисунку 3.41. Значення цих параметрів не відрізняються від попереднього випадку коли була виконана перевірка на грубість системи з ПД-регулятором. Перевірка системи на грубість САР з нейрорегулятором показала що система, завдяки використанню нейрорегулятора, нестала значно грубою порівняно з САР з

ПД регулятором при каналі регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою. Це можна побачити порівнявши результати.

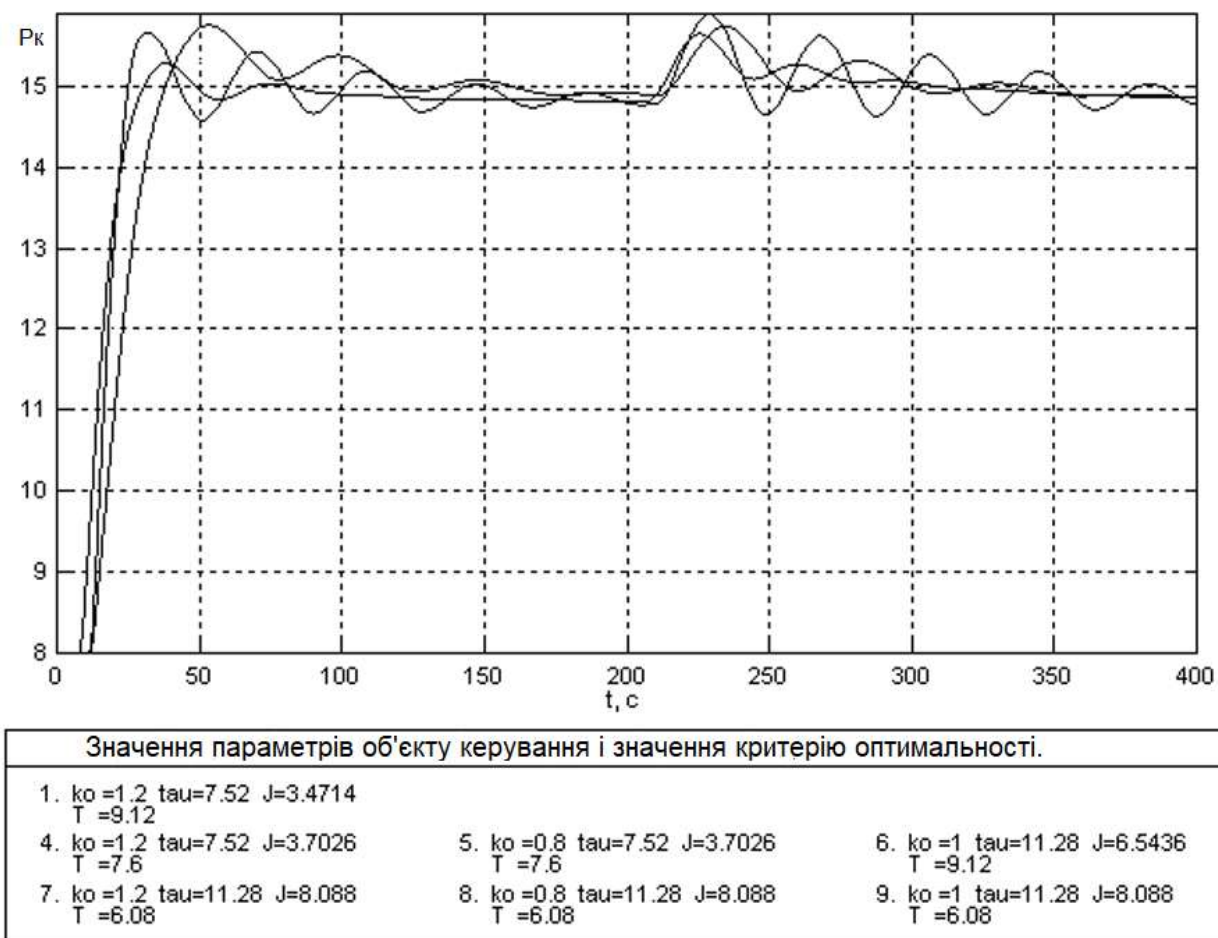


Рис. 3.41 – Вікно результатів перевірки на грубість САР з нейрорегулятором оптимізованим за компромісним інтегральним критерієм якості роботи системи

Згідно з рисунку 3.41 система з ПД регулятором значно груба також само як з САР нейрорегулятором і це незважаючи на те що нейрорегулятор є нелінійним елементом системи який в результаті оптимізації можливо підстроїти до роботи з каналом регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою.

Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, показав, що система в де яких випадках втрачає стійкість та відповідну якість регулювання.

Такий результат перевірки системи на грубість можливо вважати задовільним. При оптимізації параметрів нейрорегулятора за модульним інтегральним критерієм якості роботи система стала б ще більш груба. Отже можливо зробити висновок, що синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролеру для практичного застосування його у відповідній системі управління.

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

На заключному етапі розробки САУ був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САУ за виходом системи на номінальний режим функціонування та при збуренні пов'язаному зі зміною початкового значення (Рисунок 3.46). З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при внесенні збурення не значно менший при САУ з регулятором, що представлений 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 похибки регулювання різних САУ при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.42, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень регульованої зміни при різних САУ.

З рисунку 3.42 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням САУ з традиційним ПД-регулятором і САУ з нечітким регулятором функціонують практично ідентично, а САУ з нейронним

регулятором функціонує трохи краще. В кінцевому випадку показники функціонування різних САУ за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.4.

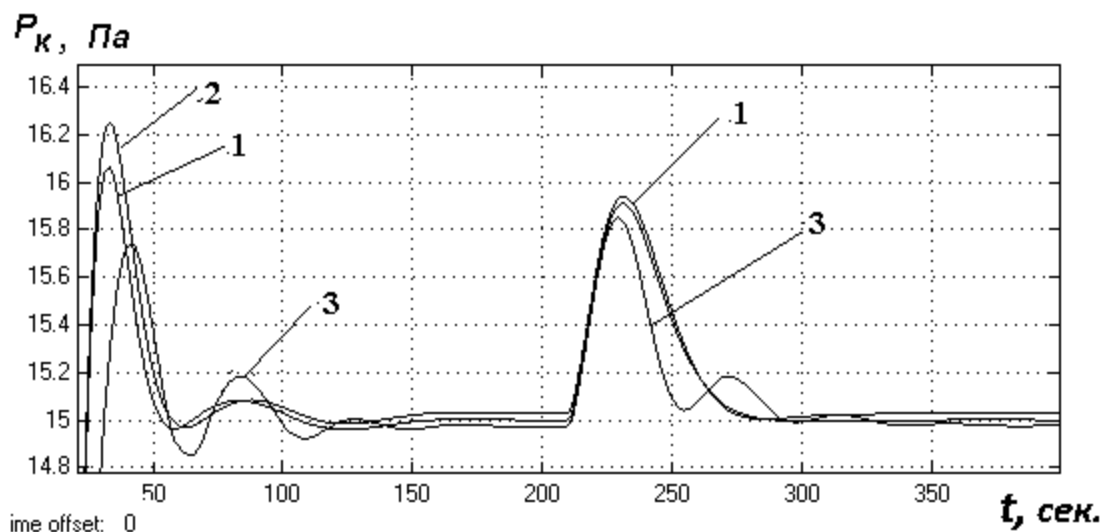


Рис. 3.42 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором графік; 3 – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж



Рис. 3.43 – Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

Таблиця 3.4 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПІД-регулятором	САУ з нечітким регулятором	САУ з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈90 с	≈90 с	≈100 с
Максимальне динамічне відхилення при збуренні	0,9	0,9	0,8
Інтегральний показник	6,13	-	4,68
Математичне очікування	15 Па	15 Па	15 Па
Середньоквадратичне відхилення	0,19	0,18	0,17

З таблиці 3.4 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САУ з нейронним регулятором функціонує краще ніж інші розглянуті САУ. САУ з традиційним ПІД-регулятором незначно гірше працює ніж САУ з нейрорегулятором але САУ з нечітким регулятором за різними показниками якості регулювання функціонує задовільно і переваг немає при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

3.11 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера

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

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

клавiшу Generate code. Згенерований код для SIMATIC STEP 7 наступний:

```
(*
*
* File: Kor1.scl
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "lpcod1/Subsystem"
*
* Model name           : Kor1
* Model version         : 1.2
* Model creator        : R1
* Model last modified by : R1
* Model last modified on : Tue Dec 11 21:08:56 2012
* Model sample time     : 0.1s
* Subsystem name        : Kor1/Subsystem
* Subsystem sample time : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 1.3 (R2012a) 24-Dec-2012
* ST code generated on   : Tue Dec 11 22:15:00 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((-0.00124025616 * rtb_Gain11) +
0.06042878073465272) * -2.0) + 1.0)) *
2.0) - 1.0) * -5.9512654549188) + (((1.0 / (EXP((-0.05993678755 * rtb_Gain11)
+ 4.43575106423473) * -2.0) +
1.0)) * 2.0) - 1.0) * -0.84789689889817)) + 0.5679) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) +
UnitDelay2_DSTATE;

```

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

```

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

```

```

*
* About '<S10>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S10>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S11>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S11>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S15>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S15>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal *)
Out1 := (((((1.0 / (EXP((((1.0 / (EXP((( -0.003955 * rtb_Gain11) + 0.057758307272)
* -2.0) + 1.0)) * 2.0) -
1.0) * -3.49186845743788) + (((1.0 / (EXP((( -0.0050612 * rtb_Gain11) +
3.778846331064233) * -2.0) + 1.0)) *
2.0) - 1.0) * -0.3575937517)) + 1.753) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 100.0) +
rtb_Product;

(* Update for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay2' *)
UnitDelay2_DSTATE := rtb_Product;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK
0

```

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.

3.12 Висновки за розділом

В процесі виконання розділу була розроблена модель САУ з нечітким регулятором та САУ з нейро регулятором. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Були визначені

функції приналежності до нечітких множин, сформована база правил функціонування регулятора у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначений алгоритм нечіткого виводу – Сугено 0-порядку. Було встановлено, що за якістю регулювання така САУ функціонує незначно гірше, ніж САУ з традиційним ПД-регулятором при об'єкті управління з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САУ, за характеристиками нечіткого регулятора було виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Тренування штучної нейронної мережі було виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink за відповідним виконавчим кодом. Була розроблена модель САУ з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором були проведена при тих же умовах, що і САУ з традиційним ПД-регулятором.

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 4,68 при САУ з нейрорегулятором і 6,13 при САУ з традиційним ПД-регулятором.

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора була сформована програма для промислового контролера.

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

Розділ 4. Удосконалення САР на основі розвитку її функціональної структури

4.1 Обґрунтування нових функцій, що мають бути реалізовані САК процесом теплової обробки залізобетонних виробів

Технологічним регламентом процесу теплової обробки залізобетонних виробів встановлені верхнє та нижнє обмеження на температуру повітря в камері, температуру бетону і розрідження в камері. Регулювання температури повітря в камері та розрідження реалізовано, а регулювання температури самого бетону не виконується. В умовах діючих нестационарних збурень випадкового характеру, що призводять до постійної зміни температури повітря в камері, температурний регламен для бетону може не виконуватись, що призведе до втрати якості бетону та зайвих витрат теплової енергії. Крім цього в системі передбачено роботу системи в режимі ізотермічного витримання і не передбачено програмного задатчика температури бетону. Тому функції існуючої системи керування повинні бути розширені. Таким чином актуальним є завдання побудови каскадної САР регулювання температури бетону з програмним задатчиком.

Перехід на регулювання безпосередньо за температурою бетону - це так зване прецизійне керування. У цьому випадку повітря в камері стає лише проміжним інструментом, а головним завданням для всієї САК є графік життя самого бетону.

Оскільки бетон не може нагрітись миттєво, каскадна система працює так: ми задаємо плавну траєкторію для бетону, а регулятор камери «підштовхує» його, тримаючи температуру повітря трохи вищою, але суворо контролюючи дельту (ΔT), щоб не перепалити поверхню блоку.

Коли ми керуємо температурою самого бетону, графік завдання для бетону є лінійним на етапі нагріву. Швидкість нагріву тіла бетону вибирається максимально безпечною – 10—12 °С за годину.

Специфікація завдання для САУ (уставки для температури бетону):

Етап 1: Витримка (2 години). Уставка для температури бетону – 20 °С.

Етап 2: Нагрів (5 годин). Плавний підйом від 20 °С до 80 °С. Швидкість: 12 °С /год (розрахунок: $(80 - 20) / 5 = 12$).

Етап 3: Витримка (6 годин). Стабільне утримання на завданні – 80 °С.

Етап 4: Охолодження (4 години). Плавне зниження до 80 °С. Швидкість: 10 °С /год.

При реалізації нових функцій повинні бути враховані певні обмеження які присутні в процесі теплової обробки бетонних блоків.

Якщо запустити каскад «в лоб», система може поводитися агресивно: на початку нагріву регулятор бетону побачить, що бетон холодний, і зажадає розігнати повітря в камері до 150 °С, щоб швидше його нагріти. Це спалить верхній шар блоків. Тому на вихід головного регулятора обов'язково накладаються динамічні обмеження:

Обмеження 1: Максимальна температура камери.

Вихід Головного регулятора (уставка для камери) жорстко обмежується зверху на рівні 85 – 90 °С. Повітря в камері ні за яких умов не повинно стати гарячішим за 90 °С.

Обмеження 2: Контроль максимальної дельти (ΔT).

Різниця між уставкою температури повітря камери та реальною температурою бетону не повинна перевищувати безпечний градієнт для бетону (зазвичай це 20 °С).

Як це працює на практиці: На старті бетону потрібно 20 °С. Система просить для температури повітря в камери 40 °С (працює обмеження за дельтою 20 °С). Пальник гріє камеру до 40 °С. Бетон починає прогріватися і

стає $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ – ліміт для камери автоматично зсувається до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Камера плавно «тягне» бетон за собою, випереджаючи його суворо на безпечну величину.

Каскадна система може також забезпечити ефективну роботу на етапі екзотермії (Самонагріву). Коли бетон прогріється до води $\approx 55\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і почне сам виділяти тепло, каскад відпрацює це ідеально і знизить температуру повітря в камері для компенса цього збурення.

В цілому можна сказати що розширення функцій САР може забезпечити ефективну роботу камери теплової обробки бетону в умовах зміни заданого значення температури. Задане значення в такому випадку — це чиста пряма лінія нагріву самого тіла бетону зі швидкістю $12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Каскадна структура автоматично підлаштує температуру повітря в камері так, щоб блоки прогрілися максимально швидко, але без термічних ударів та з повною економією газу під час самонагріву.

На рис. наведено приклад циклограми зміни температури бетону у камері під час циклу термічної обробки бетонних блоків. А в таблиці відповідні числові значення для кожного етапу.

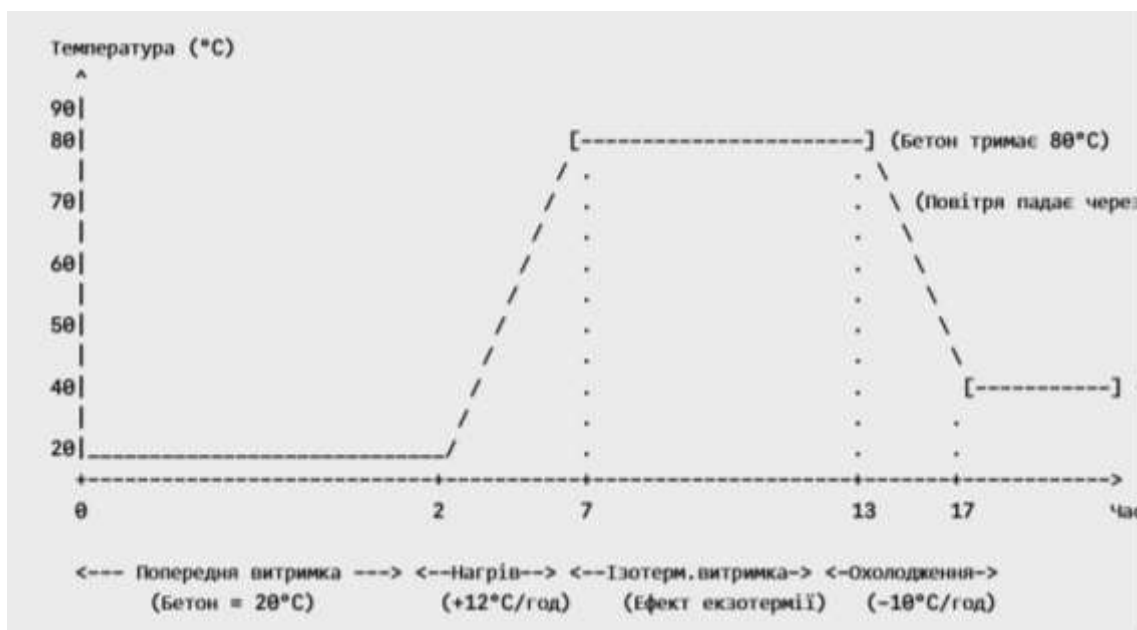


Рис. 4.1 – Циклограма зміни заданого значення температури бетону в камері в циклі його теплової обробки.

Таблиці 4.1 Задані значення температури бетону у камері на різних етапах теплової обробки

Точка графіка	Час від старту (год)	Уставка бетону (Задання головного регулятора)	Поведінка регулятора повітря (Внутрішній контур)
Старт (Точка 0)	0:00	20 °С	Повітря = 20 °С. Пальник вимкнений.
Кінець витримки	2:00	20 °С	Починається плавний підйом завдання бетону.
Кінець нагріву	7:00	80 °С	Повітря весь цей час йде паралельно вище (наприклад, 88 – 90 °С, «тягнути» лінійно бетон за собою.
Екзотермія (бл. 9 год)	9:00	80 °С	Уставка повітря плавно падає (до 72-75 °С, тому що бетон сам виділяє тепло і намагається перегнати графік.
Кінець витримки	13:00	80 °С	Починається етап плавного охолодження.
Кінець охолодження	17:00	40 °С	Повітря йде лінійно нижче бетону, вентилятор витяжки скидає вологу.

Провівши аналіз особливостей процесу теплової обробки бетонних блоків можна зробити висновок об актуальності розширення функцій існуючих САК за рахунок побудови каскадної САР температури бетону у камері відповідно з програмним задатчиком.

Концептуальна структура каскадної САР наведена на рис. 4.2.

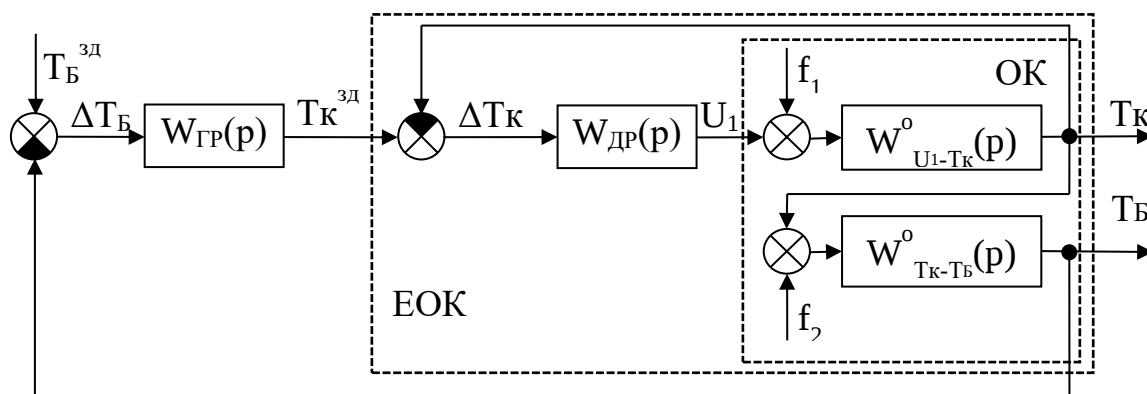


Рис. 4.2. Структура схема каскадної САР температури бетона в камері теплової обробки залізобетонних виробів

4.2 Загальні принципи побудови САР каскадної структури

Часто об'єкти керування являють собою розподілені в просторі техно логічні агрегати (наприклад, теплообмінник). У цих випадках для вимірюван ня доступні не тільки вихідні змінні об'єкта, але й «внутрішні» («проміжні») змінні. Важливим фактором тут є те, що зміни внутрішніх (проміжних) змін них, які викликані змінами збурень, проявляються раніше, ніж зміни вихідної змінної, які викликані цими ж збуреннями. Таким чином, з'являється можли вість розглянути ще один варіант підвищення динамічної точності системи за рахунок попереджуючої реакції КП на збурення, причому у даному випадку – безпосередньо не контролювані. Як внутрішні змінні слід обирати такі, які несуть у собі інформацію про велику кількість діючих на ОК збурень. Чим бі льше реальних збурень діє на внутрішню змінну, тим більше інформації (не прямої) про неї буде в КП, тим якість стабілізації у може бути вище. Розглянемо наступну структурну схему САР.

інерційність у 1-ій частині каналу регулювання об'єкта завжди менші, ніж у всьому каналі, то допоміжний регулятор почне відпрацьовувати виниклу помилку регулювання Δu_n раніше і тому зможе забезпечити вищу динамічну точність стабілізації u_n , а за рахунок цього знизить вплив f_1 на u .

Збурення f_2 не впливає на u_n . Його присутність підкреслює, що між u_n та u немає однозначної відповідності, тобто неможливо за відомим $u^{3д}$ заздалегідь розрахувати відповідне йому задане значення $u_n^{3д}$ для допоміжного регулятора. Необхідне значення $u_n^{3д}$ визначається в контурі головного зворотного зв'язку, коли головний регулятор $W^{pr}_y(P)$ намагається забезпечити $\Delta u = 0$. Якщо $\Delta u \equiv 0$, це буде означати, що необхідне $u_n^{3д}$ знайдене. Таким чином, у внутрішньому контурі, допоміжним регулятором забезпечується ефективна стабілізація u_n на рівні $u_n^{3д}$, а в контурі головного зворотного зв'язку головним регулятором визначається те задане значення $u_n^{3д}$, яке повинно підтримуватися допоміжним регулятором.

4.3 Розробка структурної схеми модернізованої САК

На основі існуючих САК та аналізу процесу теплової обробки залізобетонних виробів була розроблена каскадна САК температури бетону в камері з програмним задатчиком. В якості проміжної точки було обрано температуру повітря в камері теплової обробки залізобетонних виробів. Структурна схема САК представлена на рис. 4.3. Для регулювання температури в якості керуючої дії (U1) будемо використовувати положення регулюючого органу подачі газу. Система представлена в спрощеному вигляді і розглядається тільки контур регулювання температури.

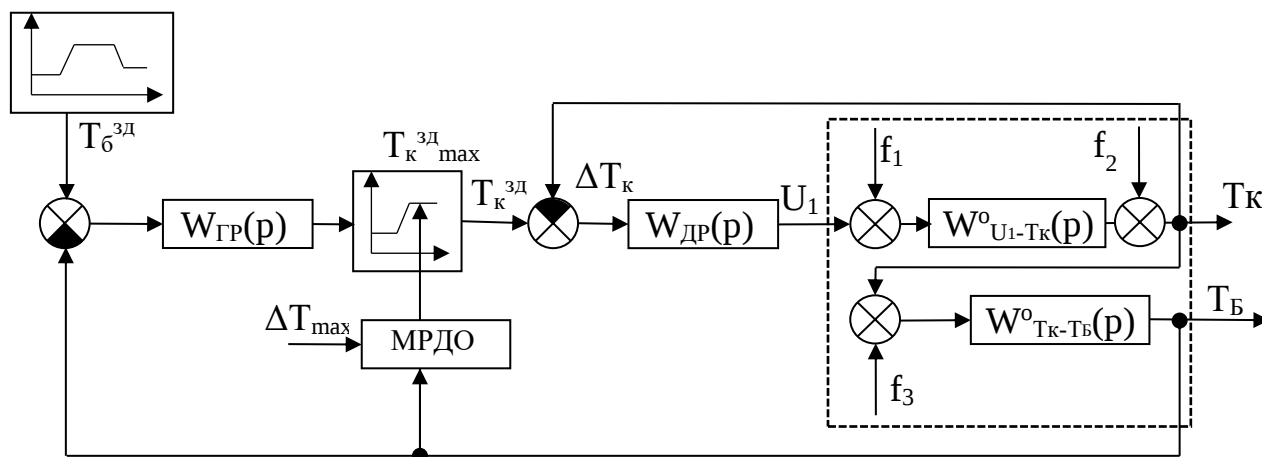


Рис. 4.3 – Структурна схема каскадної САР температури бетону у камері теплової обробки залізобетонних виробів.

На схемі

ОК – об'єкт керування;

T_B – температура бетону в камері, $^{\circ}\text{C}$;

T_K – температура повітря в камері, $^{\circ}\text{C}$;

$W_{U_1-T_K}^o(p)$ – передаточна функція ОК за каналом « $U_1 - T_K$ »;

$W_{T_K-T_B}^o(p)$ – передаточна функція ОК за каналом « $T_K - T_B$ »;

$W_{ДР}(p)$ – передаточна функція допоміжного регулятора;

$W_{ГР}(p)$ – передаточна функція головного регулятора;

ΔT_B – помилка регулювання температури бетону в камері, $^{\circ}\text{C}$;

$T_B^{зд}$ – задане значення температури бетону в камері, $^{\circ}\text{C}$;

ΔT_K – помилка регулювання температури повітря в камері, $^{\circ}\text{C}$;

$T_K^{зд}$ – задане значення температури повітря в камері, $^{\circ}\text{C}$;

U_1 – положення регулюючого органу подачі газу, %х.р.о.;

f_1, f_2, f_3 – вектори неконтрольованих збурень;

ПЗД – програмний задатчик температури бетону;

МРДО – модуль розрахунку динамічного обмеження заданного значення

$T_K^{зд}$;

$T_K^{зд_{\max}}$ – максимальне задане значення температури повітря в камері;

$\Delta T_{\max}$ – максимальна допустима різниця температур повітря в камері та температури бетону ($T_k - T_b$).

Температура повітря в камері T_k обрана в якості проміжної точки, оскільки цей параметр є зручним для вимірювання, інерційність ОК в проміжній точці є суттєво меншою, ніж в ОК в цілому, в проміжній точці є змога компенсувати певну частину неконтрольованих збурень.

В інженерній практиці представлена структура називається каскадним регулюванням з динамічним обмеженням (веденим обмеженням). Загальний принцип роботи системи наступний:

1. Зовнішній (Головний) регулятор стежить за температурою бетону. Порівнює фактичну температуру бетону з нашим заданим технологічним графіком. Якщо бетон відстає від графіка, цей регулятор розуміє: «*Треба додати тепла*» — і видає завдання (уставку) для другого регулятора внутрішнього регулятора.

2. Блок обмеження (МРДО): Математичний блок у контролері безперервно бере *поточну фактичну* температуру бетону, додає до неї ваші $\Delta T_{\max}$ (це значення технолог може змінюватися) і ставить жорстку «стелю» ($T_k^{\text{зд}}_{\max}$). Скільки б головний регулятор не «панікував» і не вимагав тепла, уставка для камери фізично не зможе перевищити $T_k^{\text{зд}}_{\max}$.

3. Внутрішній (Допоміжний) регулятор стежить за температурою повітря в камері. Керує виконавчими механізмами (клапаном газу), прагнучи тримати температуру повітря чітко за тією уставкою, яку йому дозволив блок обмеження.

Якби ми керували процесом «по-старому» (просто гріли б повітря за жорстким графіком), ми б гарантовано отримували брак. Такий підхід вирішує одразу три головні проблеми:

1. Виключено температурний шок (захист від тріщин): на самому початку, коли бетон ще холодний (наприклад, $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, система фізично не нагріє повітря в камері вище $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. У міру того як бетон прогрівається до 30

°C, планка для камери автоматично піднімається до 50 °C. Різниця між поверхнею виробу та його серединою ніколи не перевищить небезпечні 20 °C.

2. Автоматичне врахування екзотермії цементу: Коли в середині циклу бетон почне бурхливо виділяти власне хімічне тепло і гріти сам себе, зовнішній регулятор побачить, що бетон справляється сам, і почне плавно знижувати уставку для камери. Система припинить витрачати зайвий газ.

3. Незалежність від зовнішніх факторів: Зима на вулиці чи літо, привезли холодний щебінь чи теплий — системі байдуже. Вона не прив'язана до жорсткого часу, а «тягне» за собою прогрів повітря рівно з тією швидкістю, з якою на це здатна відповісти маса бетону в даний момент.

4.4 Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів керування

Настроювальні параметри регуляторів будемо отримувати за результатами оптимального параметричного синтезу каскадної САР. На першому етапі ми проведемо розрахунок початкових значень настроювальних параметрів регуляторів. Для розрахунку початкових значень параметрів допомжного регулятора будемо використовувати інженерні (спрощені) методики розрахунку на основі моделі ОК першого порядку за каналом $U_{\Gamma} - \theta_{\text{пк}}$. Розрахунок початкових параметрів головного регулятора проводиться на основі моделі еквівалентного ОК в склад якого входить вже внутрішній контур САР. Для отримання параметрів моделі цього об'єкта нам також знадобиться модель ОК за каналом $U_1 - T_{\text{б}}$. Порядок отримання параметрів моделі еквівалентного ОК та формули для розрахунку початкових параметрів регуляторів наведено у літературі [5,6]. Далі на основі отриманих початкових параметрів регуляторів проведемо їх оптимальний параметричний синтез за

інтегральним квадратичним показником якості. Спочатку оптимізуємо внутрішній регулятор, а потім головний регулятор.

Надалі проведемо розробку імітаційної моделі САР та дослідження її роботи.

4.5 Доопрацювання математичної моделі ОК для вирішення задачі регулювання

При розробці каскадної структурної схеми САР температури бетону в камері теплової обробки залізобетонних виробів нам потрібна модель ОК не тільки за каналом $U_1 - T_k$, яка в цілому в нас є, а ще модель ОК за каналом $T_k - T_b$. Це потребувало переробки існуючої моделі динаміки каналів регулювання і зміни моделей динаміки за каналом регулювання $U_1 - T_k$, та додаванням моделі за каналом $T_k - T_b$. За літературними даними коефіцієнт передачі за каналом $T_k - T_b$ приблизно дорівнює одиниці а постійна часу та запізнення в декілько разів більше ніж в каналі $U_1 - T_k$. Конкретні значення залежать від камери теплової обробки бетону. Тому конкретні значення динамічних параметрів приймемо евристично в декілько разів більше ніж в каналі $U_1 - T_k$. Отримана схема моделювання ОК наведена на рис. 4.4, а нормовані перехідні характеристики моделей першого і другого порядків каналів керування ОК $U_1 - T_k$ та $U_1 - T_b$ наведено на рис. 4.5.

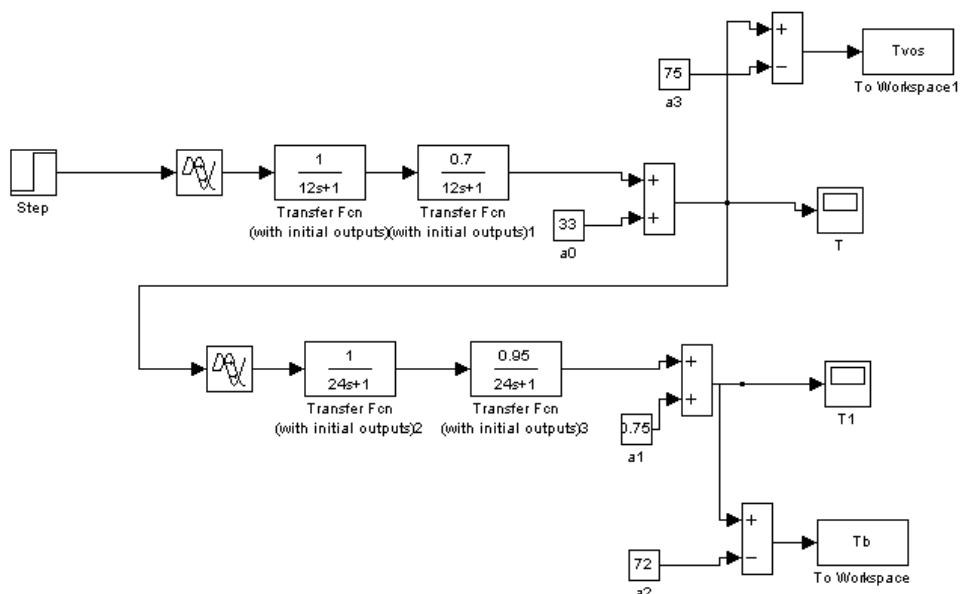


Рис. 4.4 – Схема моделювання моделі динаміки ОК.

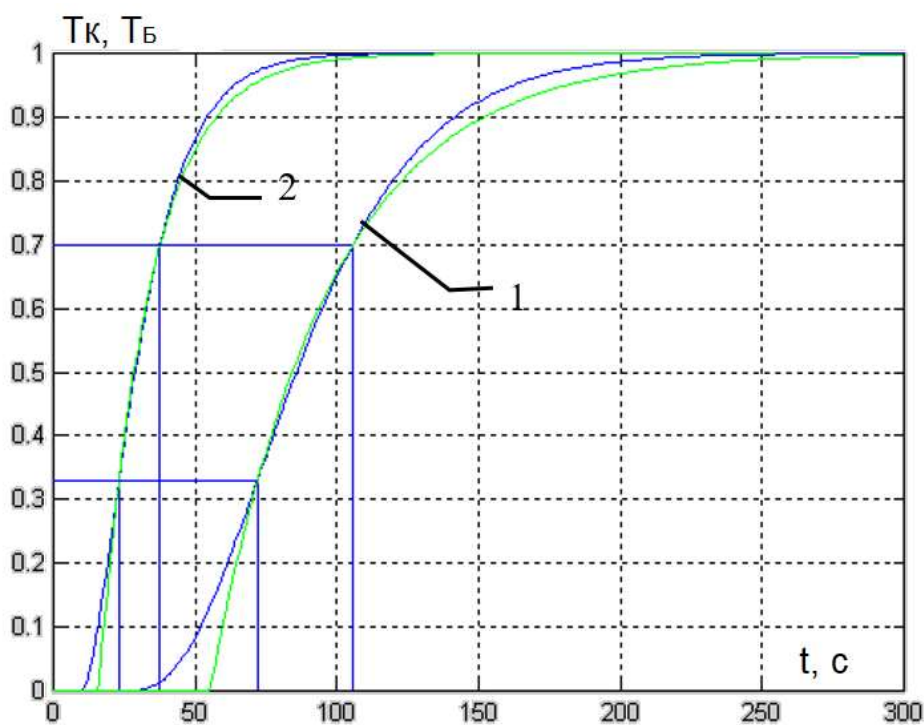


Рис. 4.5 – Нормовані перехідні характеристики моделей першого порядку за каналами керування $U_1 - T_b$ (граф.1) та $U_1 - T_k$ (граф.2)

Передаточні функції моделей першого порядку мають наступний вигляд:

$$W_{\text{уг}-\theta_6}^0(p) = \frac{0,7 \cdot 0,95 \cdot e^{-55p}}{42p + 1} \quad W_{\text{уг}-\theta_{\text{пк}}}^0(p) = \frac{0,7 \cdot e^{-16p}}{18p + 1}.$$

Моделі першого порядку каналів керування необхідні для розрахунку початкових параметрів типових алгоритмів ПІД-регулювання.

4.6 Розробка імітаційної моделі каскадної САР температури бетону та дослідження її роботи

Дослідження роботи каскадної САР температури бетону будемо проводити як у режимі стабілізації так і в режимі відтворення заданого значення яке формується програмним задатчиком. Модель динаміки ОК була змінена тому на першому етапі дослідження проведемо оптимальний параметричний синтез САР з ПІД регуляторами. Загальна структурна схема моделювання каскадної САР наведена на рис. 4.6. На першому етапі проведемо оптимальний параметричний синтез регулятора внутрішнього контуру регулювання теператури повітря у камері теплової обробки бетону.

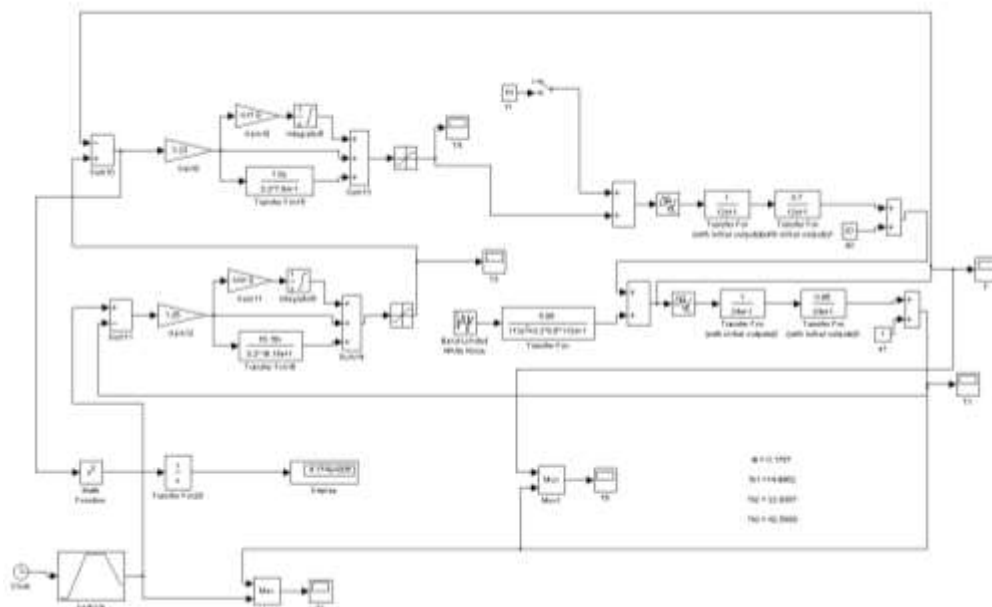


Рис. 4.6 – Загальна схема моделювання каскадної САР температури бетону у камері теплової обробки залізобетонних виробів

Схема моделювання для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора і перевірки на грубість в середовищі Simulink представлена на рис. 4.7. Інтегральний критерій оптимальності залишаємо незмінним – інтегральний модульний. Результати оптимального параметричного синтезу регулятора наведено на рис. 4.8.

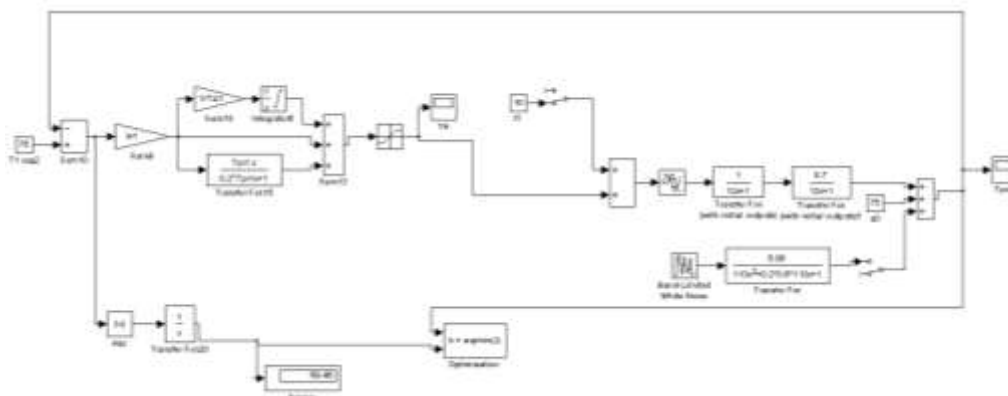
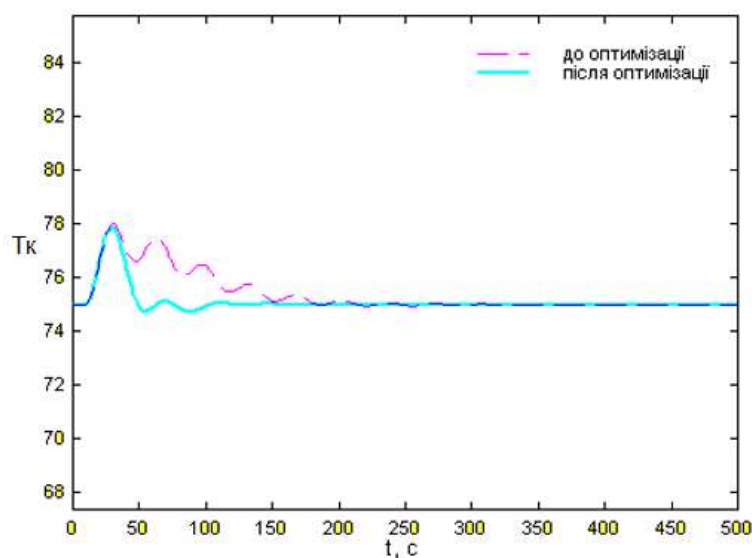


Рис. 4.7 – Схема моделювання САР температури повітря в камері для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора і перевірки на грубість.



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
kr1	3.2329	0.1	2	5	до - 209.4596
Tiz1	17.851	4	41	150	після - 69.4621
Tpr1	7.5594	2	17	40	оптимізації.
					Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 300
					фактична - 134

Рис. 4.8 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора температури повітря у камері теплової обробки залізобетонних виробів

В процесі роботи камери теплової обробки бетону може змінюватися еквівалентний час запізнення в каналах ОК та коефіцієнт передачі. Слід відзначити, що внаслідок нелінійності параметри каналів можуть варіювати в межах до $\pm 20\%$. При цьому дослідження САР на грубість слід проводити в умовах дії детермінованих ступінчастих неконтрольованих збурень $10\% \times p.o.$ Результати перевірки САР на грубість наведено на рис. 4.9.

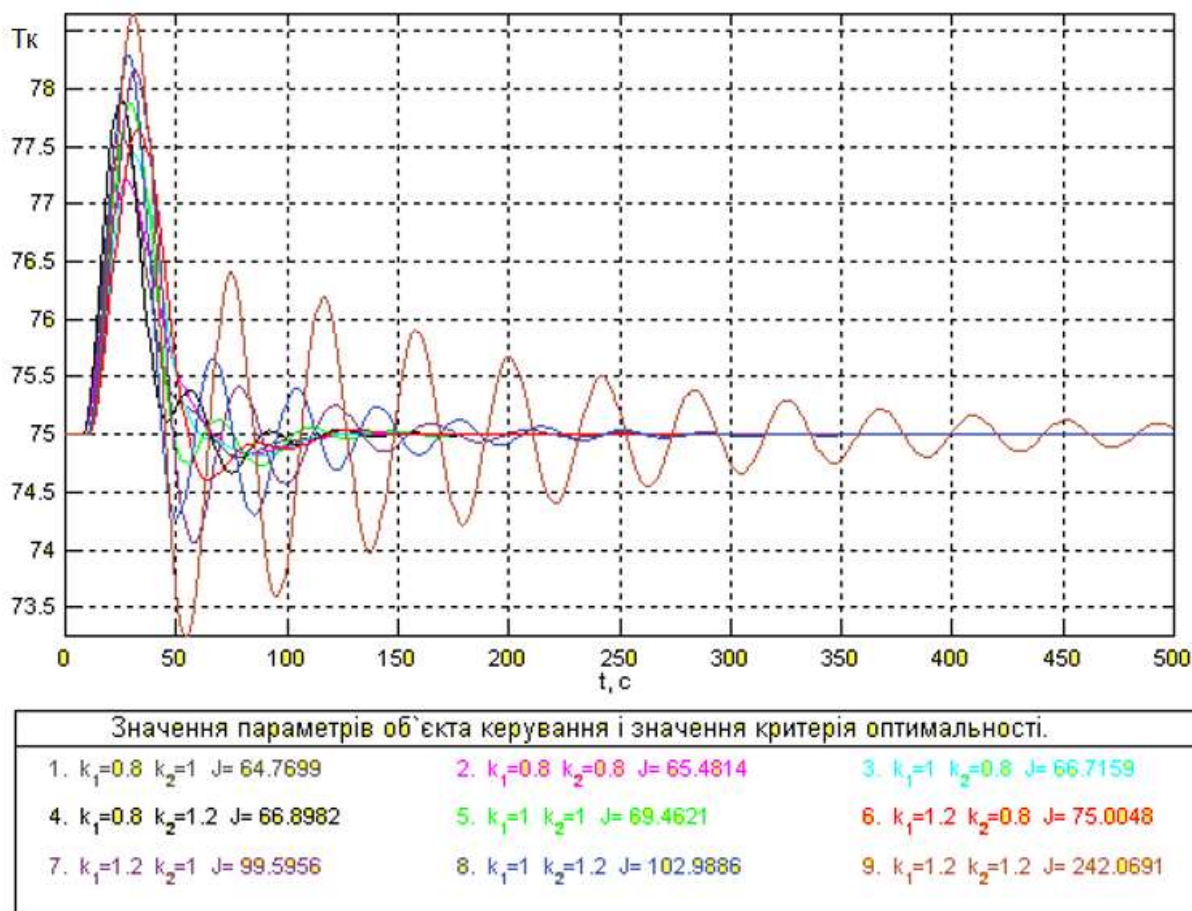


Рис. 4.9 – Результати аналізу на грубість САР з ПІД-регуляторами при зміні часу запізнєння та коефіцієнту передачі в каналі керування

За результатами перевірки можна зробити висновок що САР є грубою.

На наступному етапі проведемо оптимальний параметричний синтез головного регулятора каскадної САР температури бетону у камері. Параметри допоміжного регулятора температури повітря вже визначено, таким чином оптимізуємо тільки параметри головного регулятора. Схема моделювання для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора і перевірки на грубість в середовищі

Simulink представлена на рис. 4.10. Результати оптимального параметричного синтезу регулятора наведено на рис. 4.11.

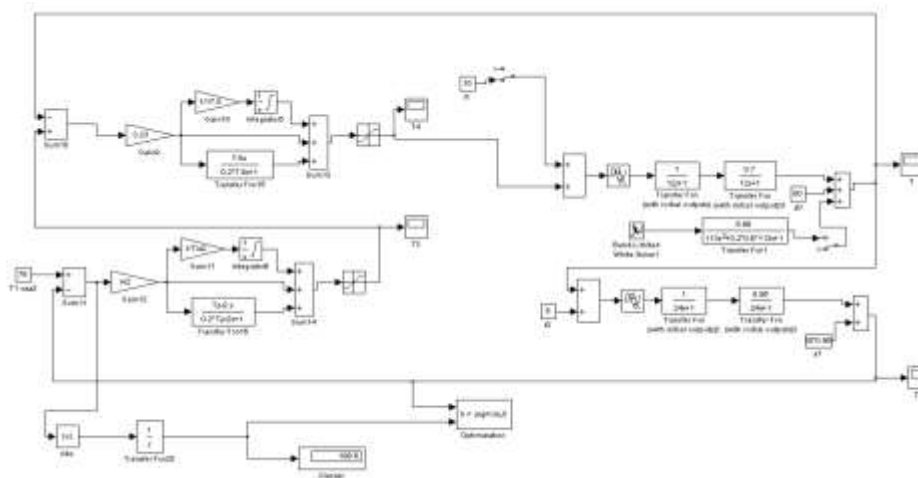
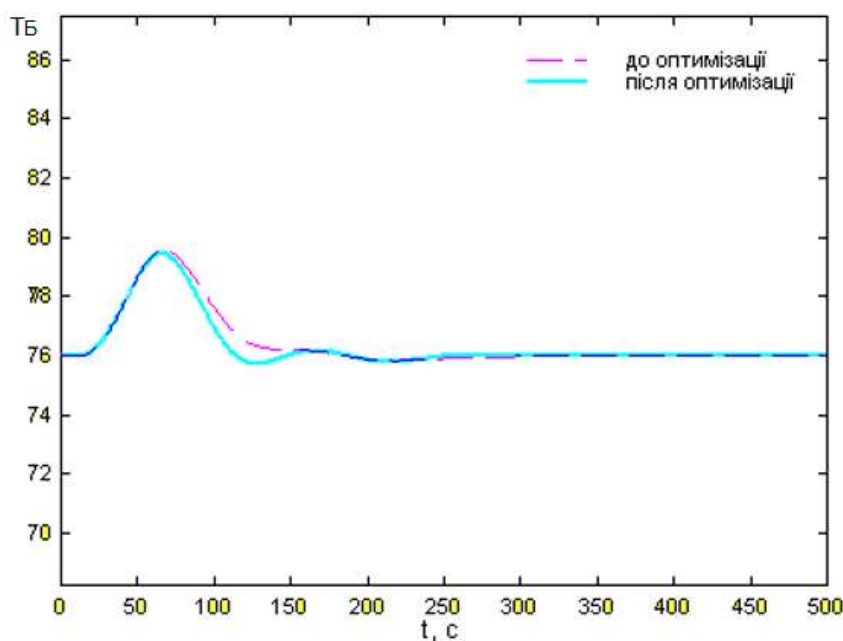


Рис. 4.10 – Схема моделювання САР температури бетону в камері для оптимізації налаштувань ПД-регулятора і перевірки на грубість



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
kr2	1.2591	0.1	1	5	до - 230.162
Tiz2	41.8043	4	41	150	після - 198.6382
Tpr2	16.1468	2	17.1	40	оптимізації.
					Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 300
					фактична - 85

Рис. 4.11 – Результати оптимізації налаштувань головного ПД-регулятора температури бетону у камері теплової обробки залізобетонних виробів

В каналі регулювання $\theta_{пк} - \theta_6$ при певних обставинах може змінюватися час запізнення і коефіцієнт передачі. Тому проведемо перевірку системи на грубість при зміні одночасно часу запізнення та коефіцієнту передачі у межах до $\pm 20\%$. Результати перевірки на грубість наведено на рис. 4.12.

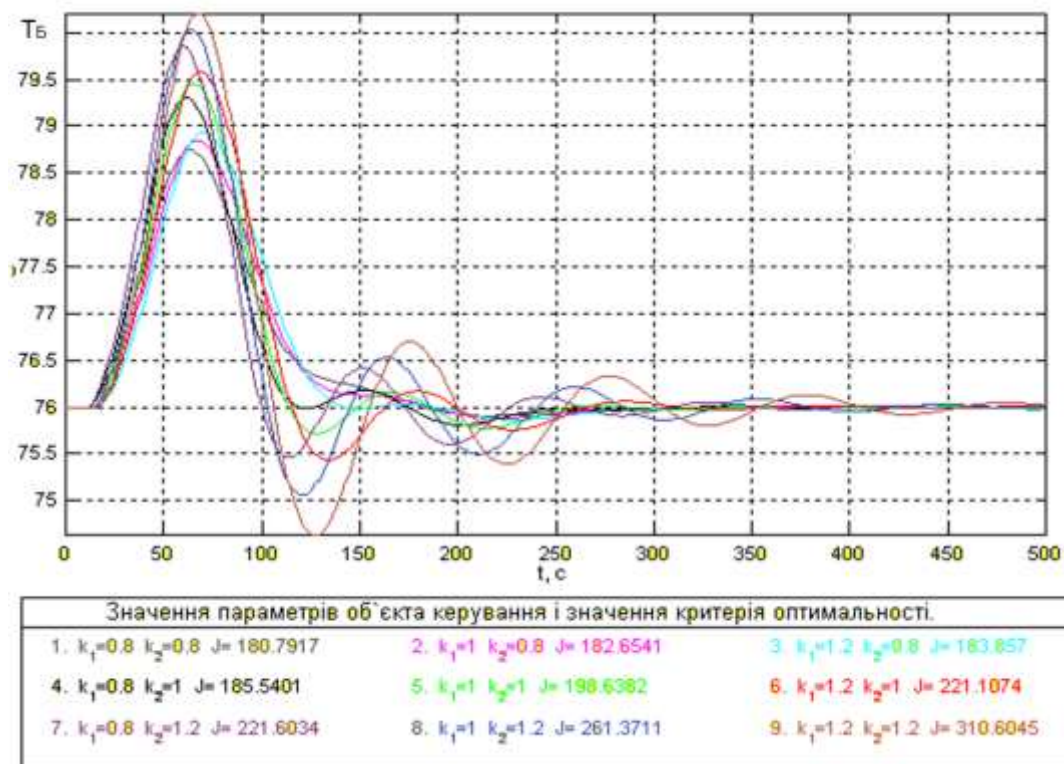


Рис. 4.12 – Результати аналізу на грубість каскадної САР з ПІД-регуляторами при зміні часу запізнення та коефіцієнтів передачі в каналі $T_k - T_b$.

За результати перевірки можна зробити висновок що каскадна САР температури бетону у камері є грубою, тобто вона цілком працездатна.

Для порівняння роботи каскадної САР температури бетону з одноконтурною САР базової структури з ПІД регулятором, проведемо оптимальний параметричний синтез такої САР. Схема моделювання для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора і перевірки на грубість в середовищі Simulink представлена на рис. 4.13. Результати оптимального параметричного синтезу регулятора наведено на рис. 4.14.

Проведемо перевірку системи на грубість при зміні одночасно часу запізнення та коефіцієнту передачі у межах до $\pm 20\%$. Результати перевірки на грубість наведено на рис. 4.15.

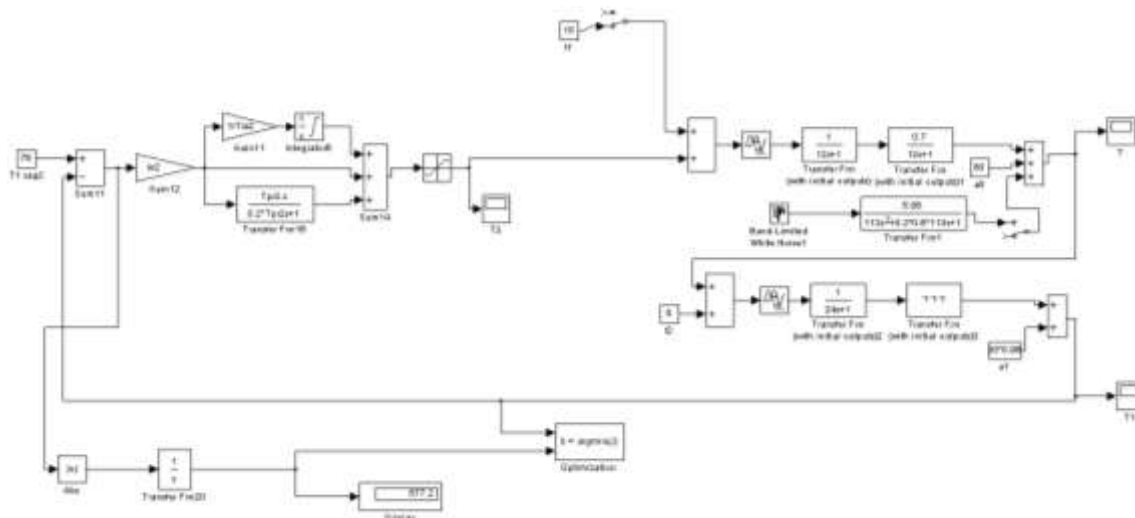
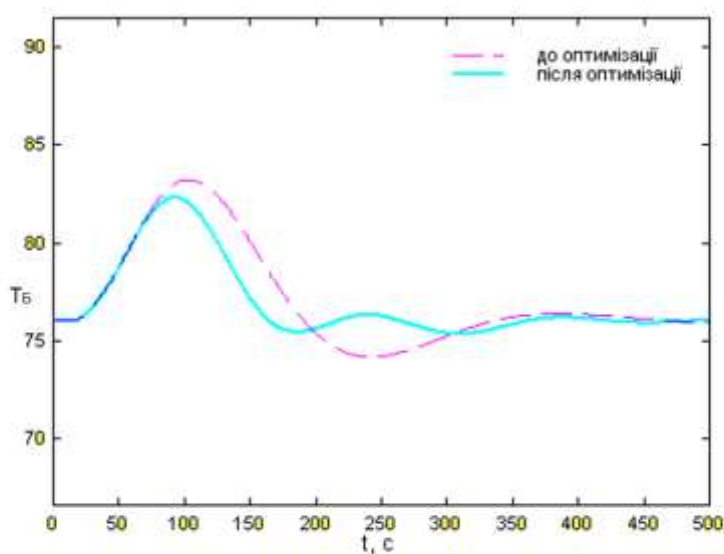


Рис. 4.13 – Схема моделювання одноконтурної САР температури бетону в камері для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора і перевірки на грубість



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
kr2	1.9109	0.1	1.25921	5	до - 887.7152
Ti2	51.2506	4	41.8113	150	після - 577.2301
Tr2	27.0129	2	16.1397	40	оптимізації.
					Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 300
					фактична - 136

Рис. 4.14 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора одноконтурної САР температури бетону у камері теплової обробки залізобетонних виробів

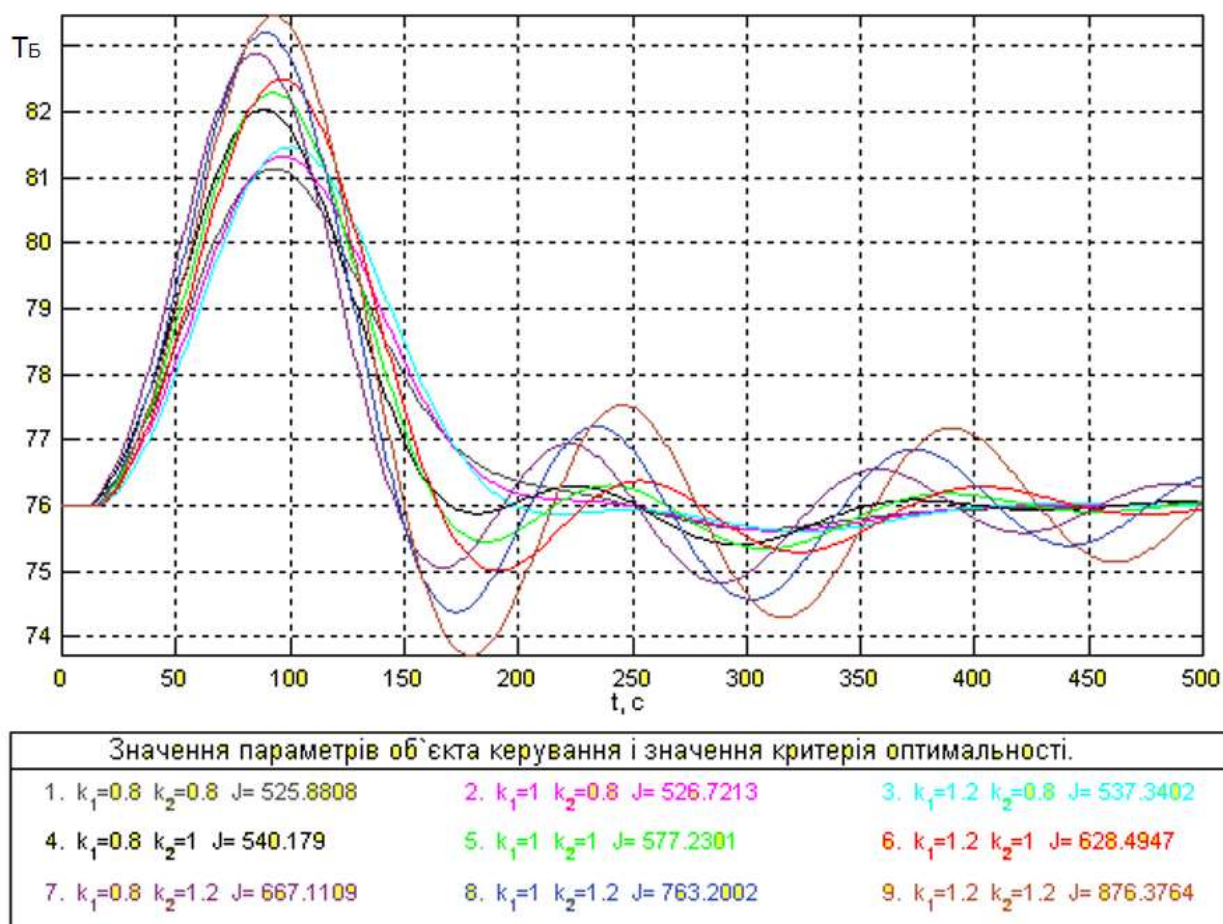


Рис. 4.15 – Результати аналізу на грубість одноконтурної САР з ПД-регулятором при зміні часу запізнення та коефіцієнтів передачі в каналі $T_k - T_B$

За результатами перевірки можна зробити висновок що одноконтурна САР температури бетону у камері є грубою, тобто вона цілком працездатна.

Проведемо порівняльний аналіз роботи каскадної САР та звичайної одноконтурної САР температури бетону у камері в перехідних режимах роботи. Схема моделювання для проведення порівняльного аналізу наведена на рис. 4.16 а перехідні характеристики наведено на рис 4.17.

За результатами моделювання (рис. 3.13) можна зробити висновок що каскадна САР температури бетону в камері забезпечує більш високу динамічну точність підтримання температури бетону на заданому значенні. Максимальне динамічне відхилення в каскадній САР майже в два рази менше, а інтегральний модульний показник якості менший майже в три рази. Тобто

використання каскадного принципу керування цілком обгрунтовано і цей варіант системи ми будемо розглядати у подальших дослідженнях.

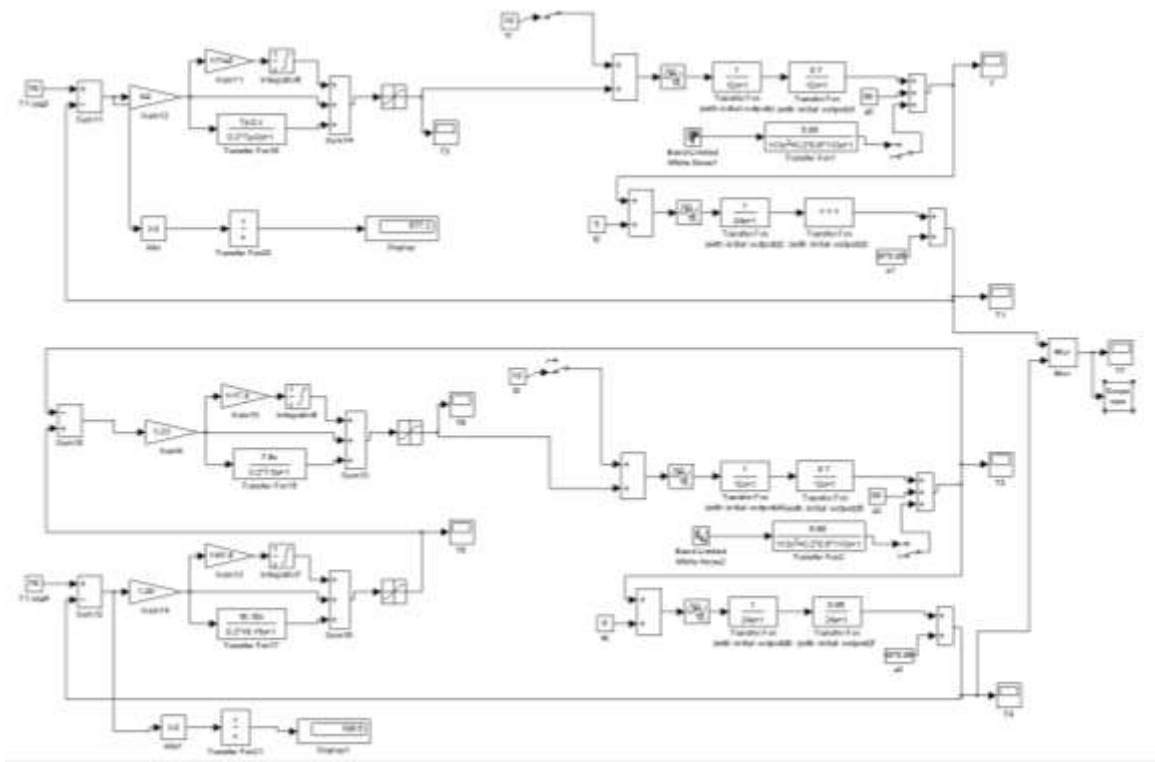


Рис. 4.16 – Схема моделювання одноконтурної САР та каскадної САР температури бетону для проведення порівняльного аналізу

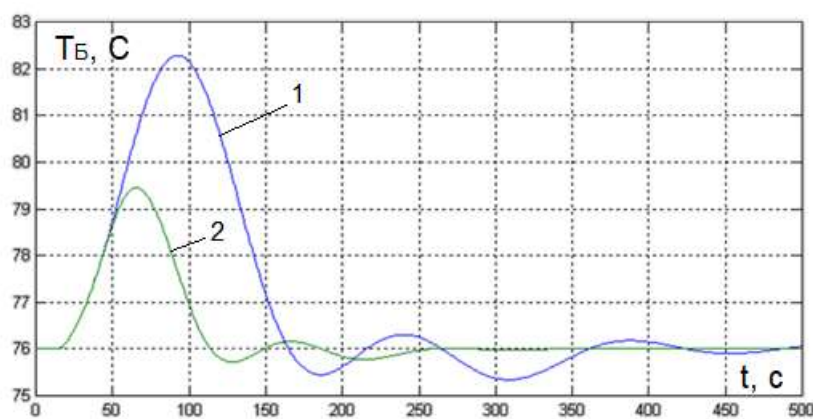


Рис. 4.17– Перехідні характеристики САР температури бетону базової структури (1) та каскадної САР (2)

Проведемо дослідження роботи каскадної САР температури бетону у камері в режимі відтворення заданого значення яке формується програмним

здатчиком на інтервалі одного повного циклу теплової обробки бетонних виробів. Час циклу складає десь 16 годин. На рис. 4.18 наведена схема моделювання цієї САР, а на рис. 4.19 наведено налаштування програмного задатчика температури бетону.

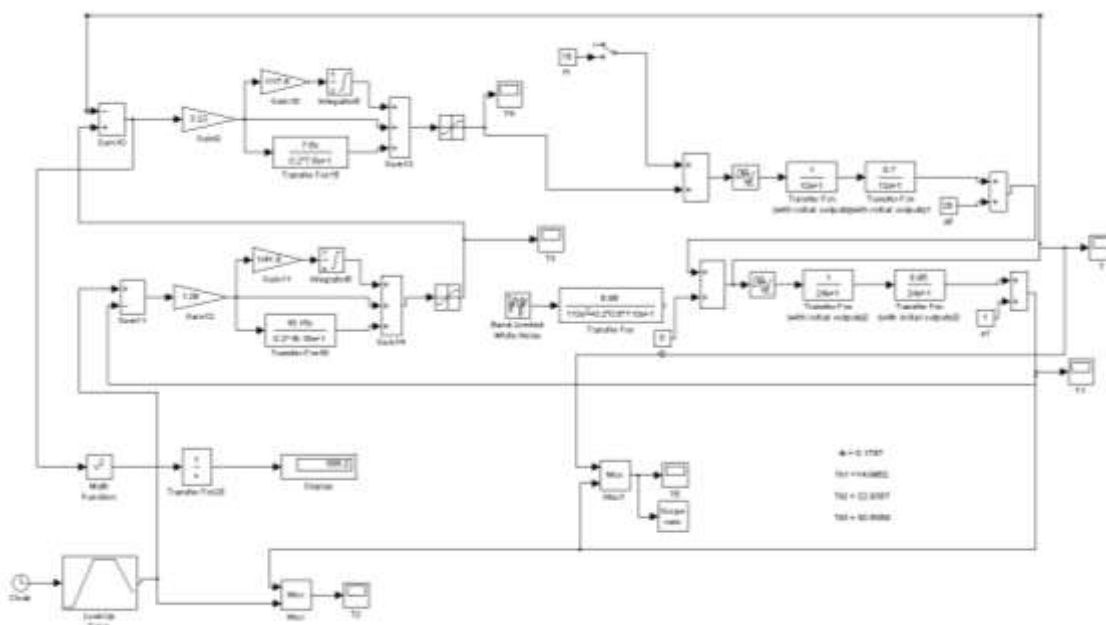


Рис. 4.18 – Схема моделювання каскадної САР температури бетону у камері з програмним задатчиком

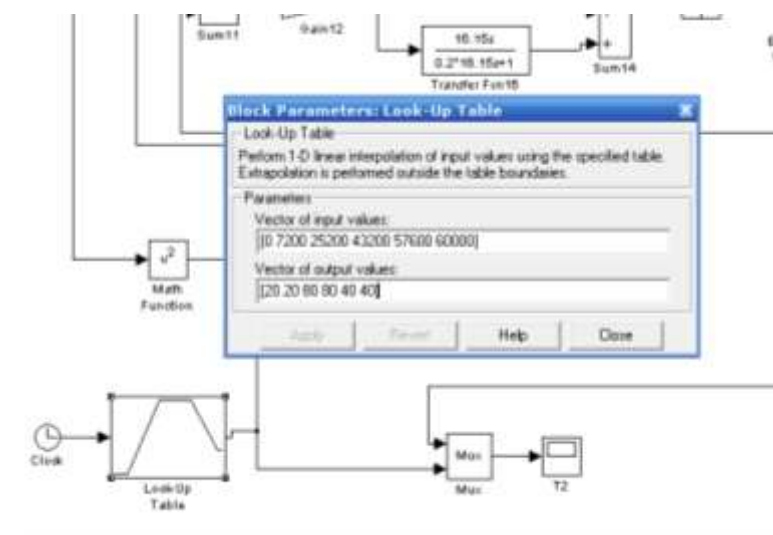


Рис. 4.19 – Налаштування програмного задатчика температури бетону у камері на інтервалі часу одного циклу його теплової обробки (приблизно 16 годин)

На рис. 4.20 та 4.21 наведено результати моделювання каскадної САР температури бетону в камері.

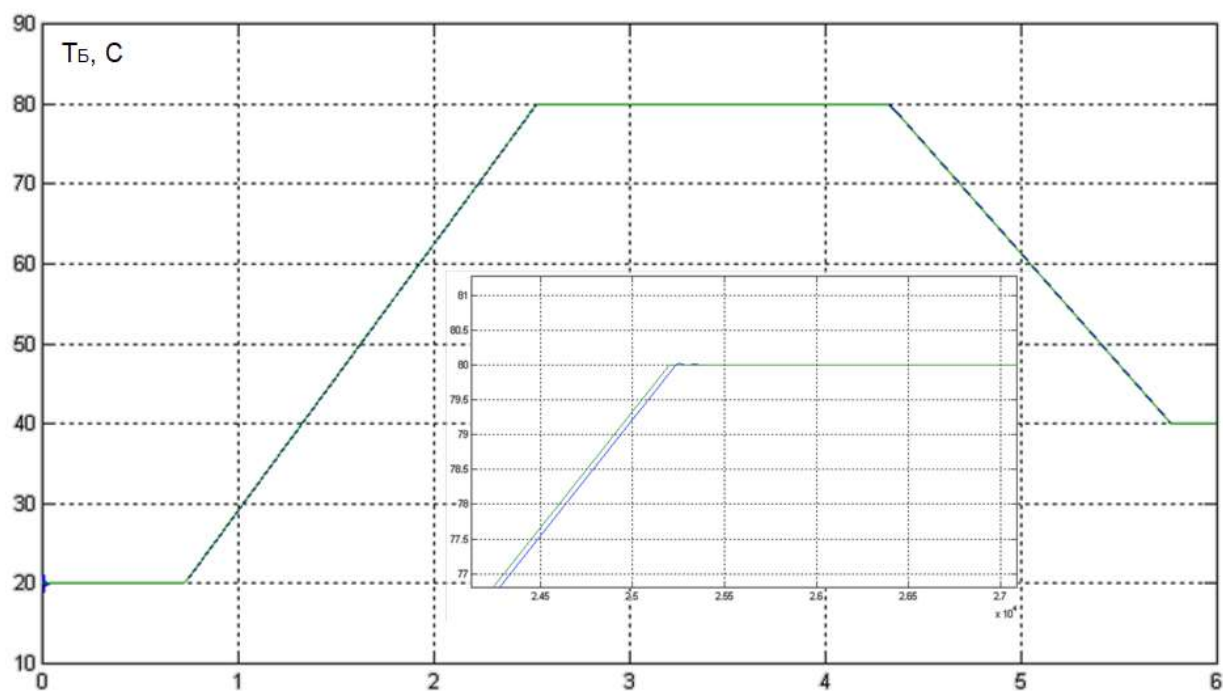


Рис. 4.20 – Графік зміни температури бетону у камері на інтервалі часу одного циклу його теплової обробки (приблизно 16 годин)

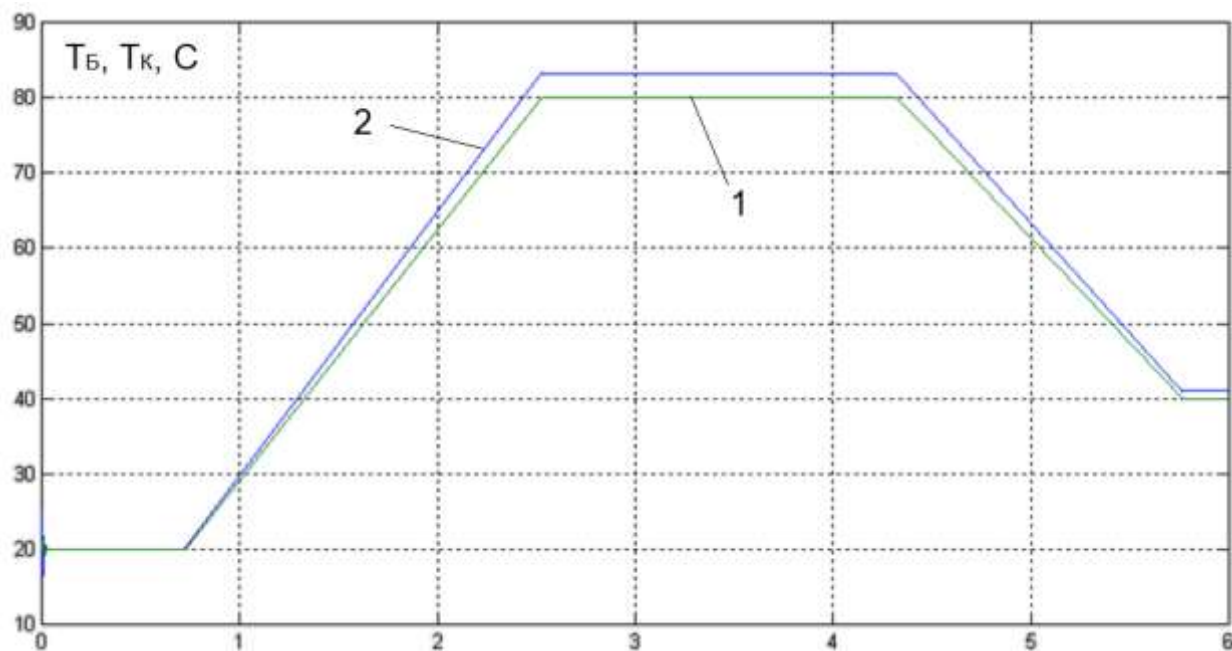


Рис. 4.21 – Графік зміни температури бетону у камері (1) та температури повітря в камері (2) на інтервалі часу одного циклу теплової обробки бетону

За результатами моделювання можна зробити висновок, що заданезначенн змінюється досить повільно і динамічні похибки відтворення досить малі. При роботі системи різниці температур повітря та температури бетону не перевищувала 20 °С. І ні які обмеження на завдання температури повітря в камері не були потрібні. Але це тільки один з можливих випадків роботи системи. Якщо динаміка прогріву бетону буде в сто або двісті разів повільніша то різниці в температурах буде наближуватися до 20 °С.

Далі наведено результати моделювання при дії неконтрольованих збурень випадкового характеру. На рисунку 4.22 наведено графіки зміни температури повітря у камері та температури бетону у камері на інтервалі часу одного циклу теплової обробки бетону.

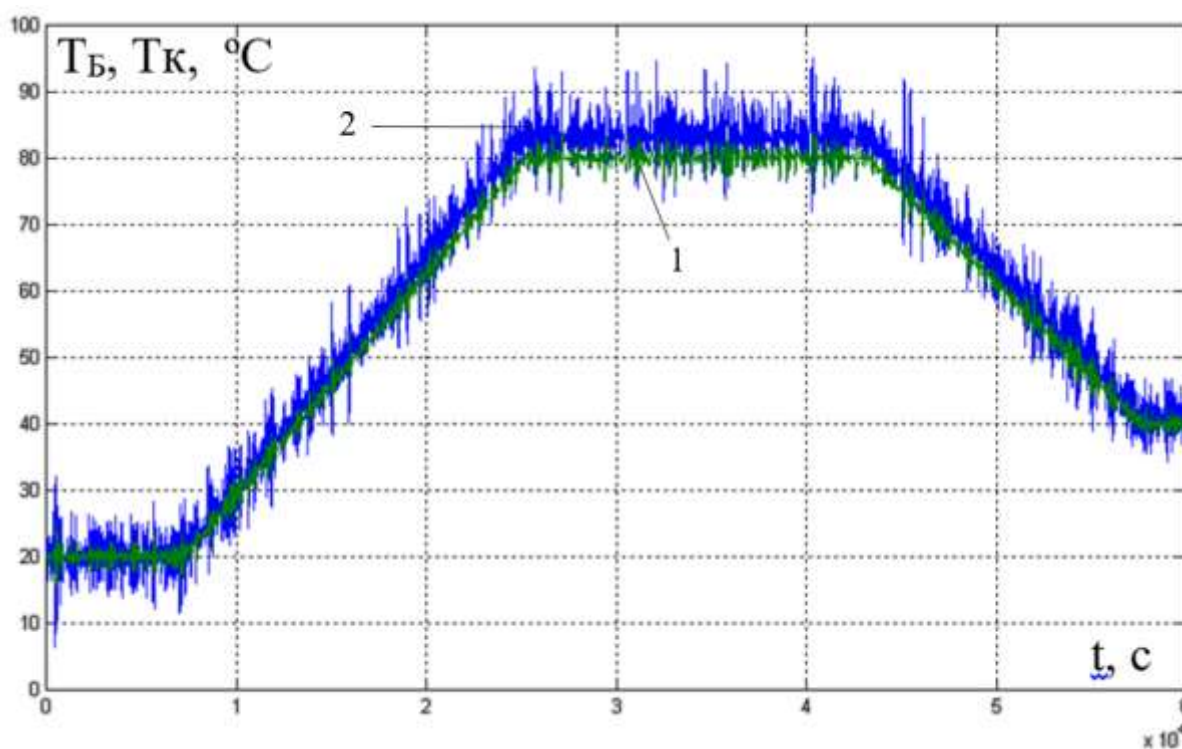


Рис. 4.22 – Графік зміни температури бетону у камері (зелений графік) та температури повітря в камері (синій графік) на інтервалі часу одного циклу теплової обробки бетону

Проведемо порівняння роботи одноконтурної САР та каскадної САР температури бетону при дії неконтрольованих збурень випадкового характеру. На рис. 4.23 наведено схему моделювання одноконтурної САР з

програмним задатчиком температури бетону в камері. А на рисунках 4.24 та 4.25 графіки зміни температури бетону в камері для одноконтурної САР та САР каскадної структури. За результатами моделювання можна побачити що

Каскадна система працює краще і забезпечує більш високу динамічну точність підтримання температури на заданому значенні.

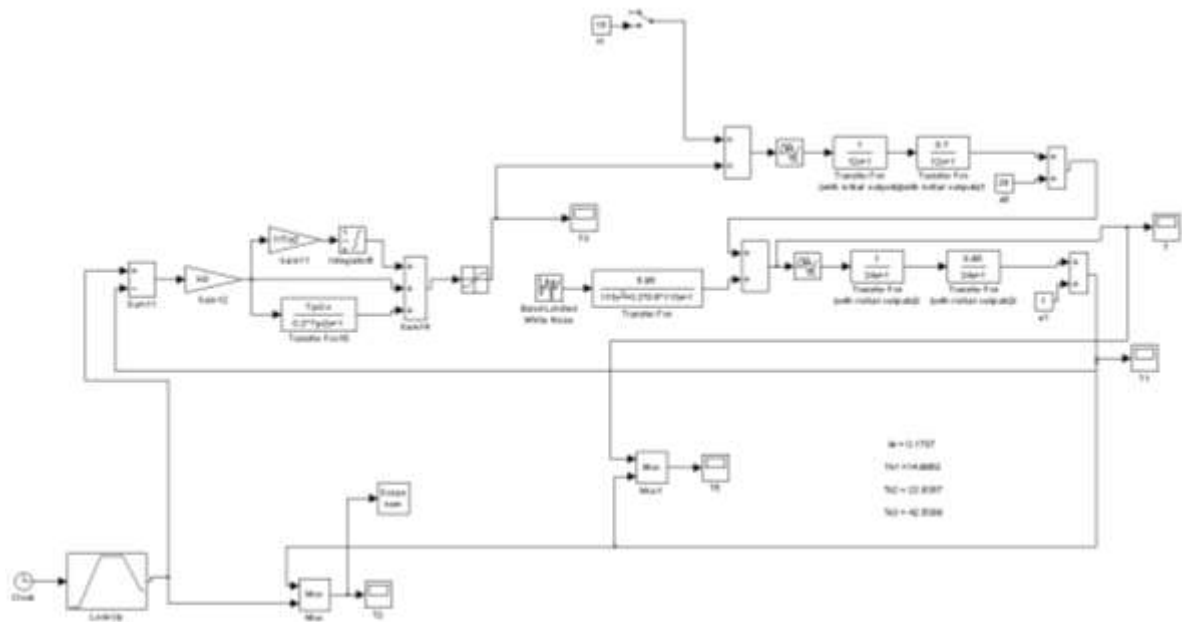


Рис. 4.23 – Схема моделювання одноконтурної САР температури бетону у камері з програмним задатчиком

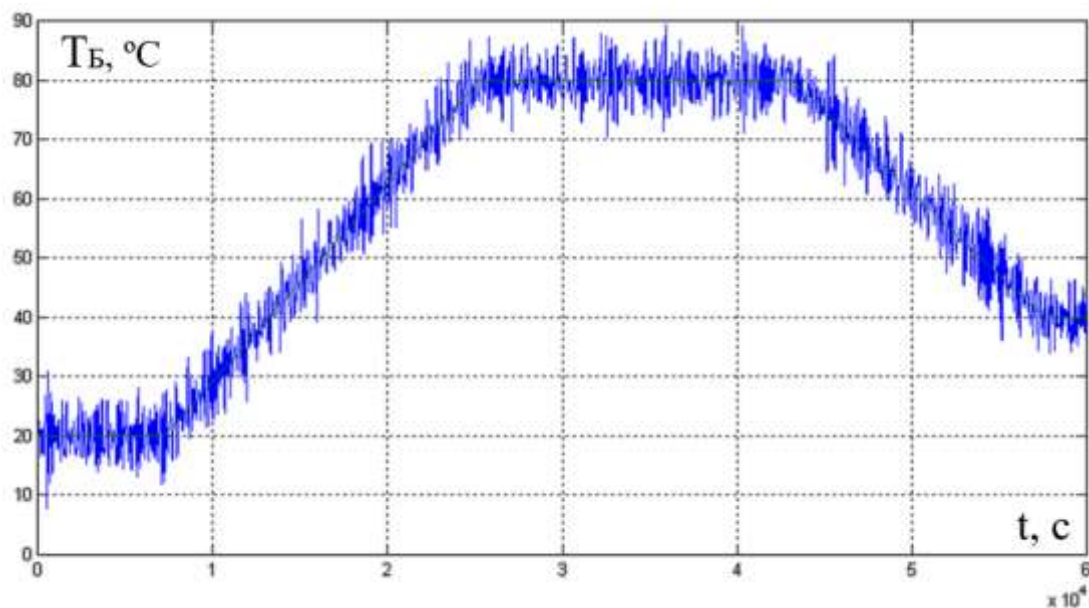


Рис. 4.24 – Графік зміни температури бетону у камері на інтервалі часу одного циклу теплової обробки бетону для одноконтурної САР

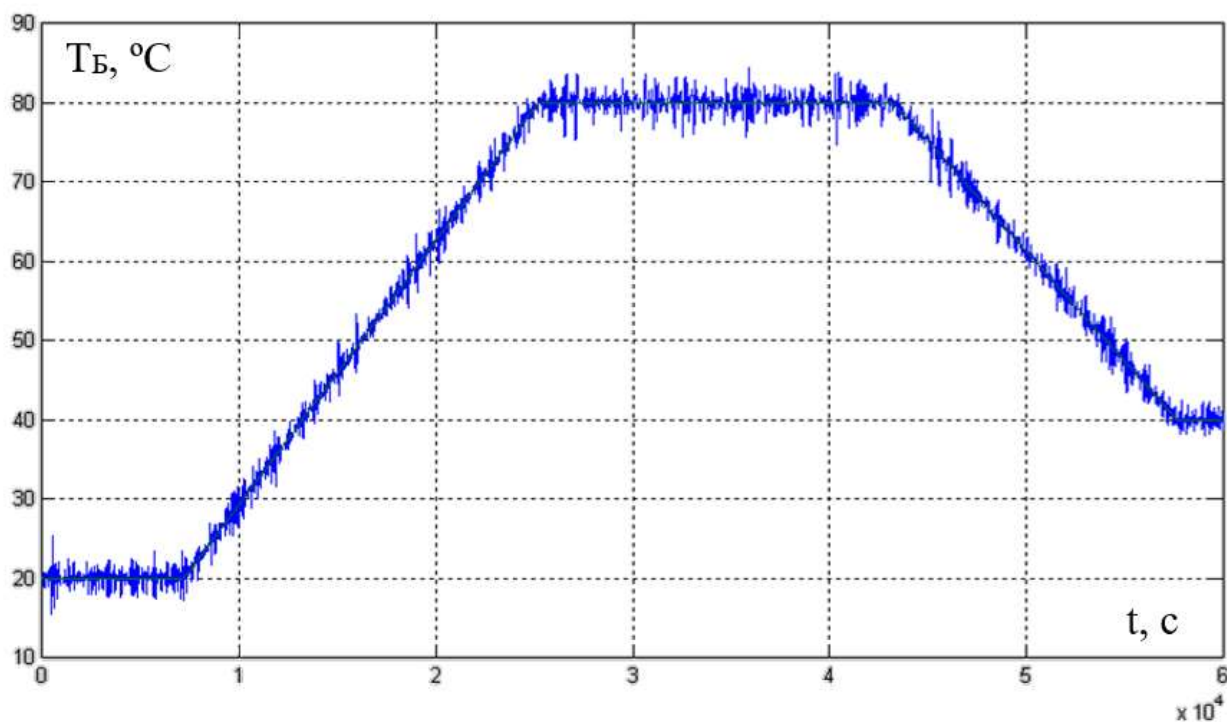


Рис. 4.25 – Графік зміни температури бетону у камері на інтервалі часу одного циклу теплової обробки бетону для САР каскадної структури

Це підтверджується результатами розрахунку оцінки середньоквадратичного відхилення похибки регулювання температури бетону у камері. Для одноконтурної САР цей показник склав – $3,23^{\circ}\text{C}$, а для САР каскадної структури цей показник склав – $1,13^{\circ}\text{C}$. Таким чином оцінка середньоквадратичного відхилення для каскадної САР приблизно в 2,9 рази менше. Це каже про високу динамічну точність каскадної САР.

В цілому можна зробити висновок що використання каскадної системи автоматичного регулювання (САР) із динамічним обмеженням уставки температури повітря – це, мабуть, найефективніший спосіб керування тепловою обробкою ЖБВ. Ось детальний розбір усіх переваг та фінансової вигоди (на чому саме ми економимо) від впровадження такої системи.

Технологічні переваги

1. Повна ліквідація температурного браку (тріщин)

Головна проблема бетону — внутрішні термічні напруження. Якщо повітря в камері нагрівається надто швидко, зовнішні шари виробу розширюються, а серцевина залишається холодною. Бетон починає рвати. Каскад із обмеженням $\Delta\theta_{\max}$ фізично не дозволить повітрю «втекти» вперед більш ніж, наприклад, на 15–20 °С від поточної температури самого бетону. Процес нагріву стає максимально лагідним.

2. Гарантований набір міцності (без пересушування)

Якщо температура середовища значно вища за температуру виробу, волога з поверхні бетону інтенсивно випаровується. Без води реакція гідратації цементу припиняється, і поверхня стає крихкою. Обмеження різниці температур зберігає вологу всередині форми, забезпечуючи ідеальні умови для дозрівання бетону.

3. Автоматична компенсація інерції

Камера теплової обробки — це величезний інерційний об'єкт. Одноконтурний регулятор завжди буде або запізнюватися, або перегрівати середовище. Каскад вирішує це: внутрішній (швидкий) контур миттєво реагує на коливання тиску газу та температури повітря, а зовнішній (повільний) — плавно веде сам бетон за технологічним графіком.

Економічні переваги: Що і як ми економимо?

Впровадження такої системи автоматизації окупається дуже швидко завдяки трьом головним факторам економії:

1. Величезна економія газу (енергоресурсів) — до 20–30%

Це головна стаття економії. Коли цемент твердіє, відбувається екзотермічна реакція — хімічне виділення власного тепла. У звичайних системах (по повітрю) клапан продовжує «сліпо» качати газ в камеру. У каскадній системі, як тільки бетон починає гріти сам себе, зовнішній регулятор бачить, що температура виробу росте швидше за графік. Система миттєво прикриває або повністю закриває клапан подачі газу, дозволяючи виробу дозрівати за рахунок власного тепла.

2. Скорочення часу циклу пропарки (підвищення продуктивності) – на 15–20%

Через страх зіпсувати виріб тріщинами, технологи на «простих» системах змушені закладати графіки з величезним запасом часу (робити нагрів дуже повільним). Каскадна система працює на межі дозволеного теплового градієнта. Вона веде нагрів так швидко, як це безпечно можливо для бетону. Це дозволяє швидше звільняти камери та здійснювати більше формовок за зміну (збільшується оборотність форм).

3. Зменшення витрат на цемент (оптимізація рецептури)

Коли термообробка ідеально контролюється, бетон гарантовано та стабільно набирає необхідну відпускну міцність (наприклад, 70% від марочної) за один цикл. Це дозволяє технологам упевнено працювати на мінімально необхідній кількості цементу в рецепті, без потреби «перестраховуватися» і закладати надлишкові кілограми дорогого цементу в кожен кубометр суміші.

4. Відсутність витрат на виправлення браку

Утилізація пошкодженого залізобетону, зрізання тріщин або, що гірше, повернення продукції від замовника через недовідпущене сушіння — це прямі збитки. Автоматика зводить людський фактор і ймовірність такого браку практично до нуля.

4.7 Висновки за розділом

Розроблено та досліджено модернізовану каскадну САР процесом процесом теплової обробки залізобетонних виробів. САР реалізує додаткову функцію: функцію регулювання температури бетону з алгоритмом каскадної структури та програмним задатчиком. Реалізація цієї функції забезпечує підвищення динамічної точності підтримання температури бетону у камері на заданому значенні в умовах дії параметричних і координатних зберень та дає

можливість забезпечити високу якість отриманого бетону та зниження витрат теплової енергії на його виготовлення.

У роботі проведено низку порівняльних аналізів САР базової структури та САР, що реалізує функцію каскадного регулювання. Дослідження показали серйозні переваги використання каскадної САР температури бетону і актуальність її подальшого використання.

В цілому проаналізував переваги використання такої каскадної САР можна зробити висновок що така система знижує витрати на газ, прискорює випуск готової продукції з тієї ж кількості камер, захищає від штрафів за неякісний або тріснутий залізобетон.

Розділ 5. Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи на підприємстві

5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми керування процесом теплової обробки залізобетонних виробів і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок

Як правило, камера теплової обробки залізобетонних виробів й допоміжне устаткування розташовуються в одному приміщенні компактно, тому виберемо централізовану схему розміщення модулів системи керування.

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

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

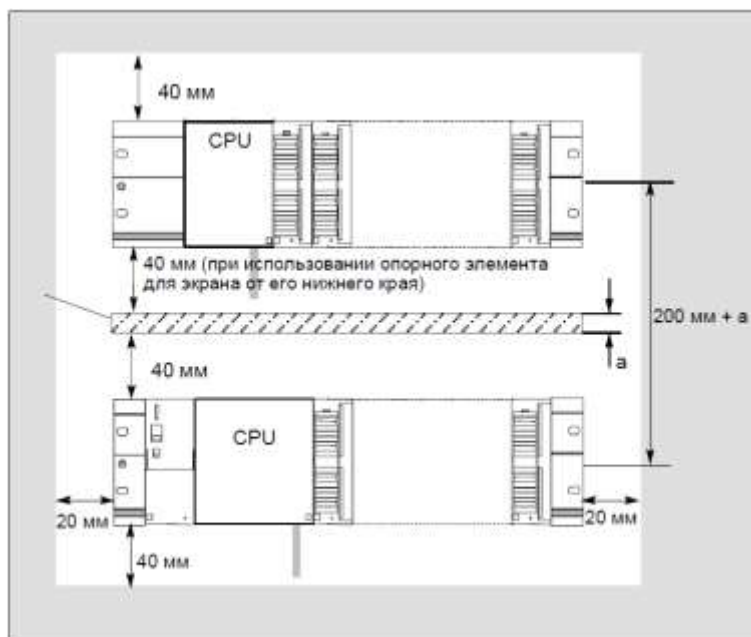


Рис. 5.1 – Зазори при встановленні S7-300 у шафі

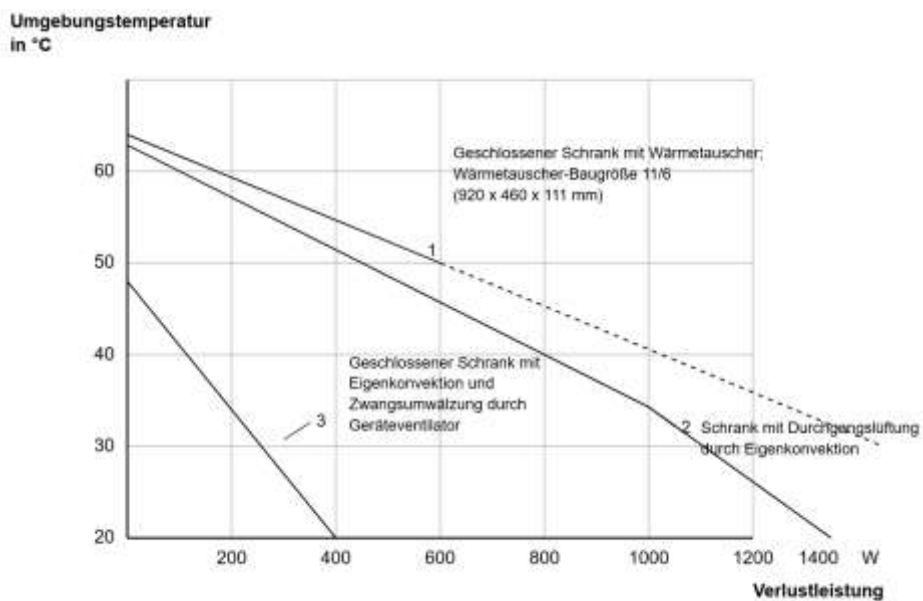


Рис. 5.2 – Діаграма припустимих потужностей розсіювання

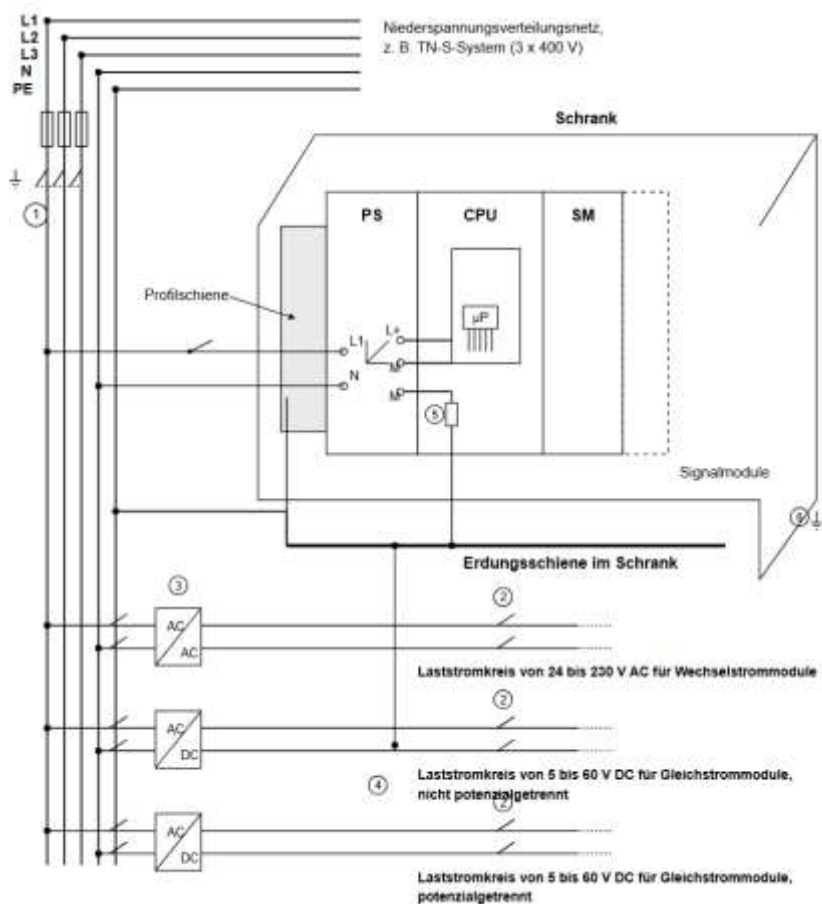


Рис. 5.3 – Схема заземлення в шафі

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

Технічну структуру системи управління розробимо на базі контролера Simatic S7-300. Для реалізації алгоритмів керування в модулях ПЗО контролера повинні бути передбачені:

- аналогові входи (4),
- аналогові виходи (2),
- дискретні входи (8),
- дискретні виходи (5).

Виходячи з сформованої таблиці та середньої складності алгоритмів керування, для реалізації системи керування скористаємося контролером CPU 313C-2DP



Рис. 5.4 – Центральний процесор CPU 313C-2DP (6ES7 313-6CG04-0AB0)

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

- Мікропроцесор; 100-200 нс на виконання бінарної інструкції.
- Робоча пам'ять об'ємом 64 Кбайт, RAM (приблизно 20 К інструкцій); для виконання завантаженої секції програми та зберігання оперативних даних.

- Мікрокарта пам'яті (до 8 Мбайт), яка у ролі завантажувальної пам'яті, а також збереження архіву проекту (з коментарями і таблицею символів), архівування даних і управління рецептами.

- Гнучкі можливості розширення; підключення до 31 модуля S7-300 (4-рядна конфігурація).

- Інтерфейс MPI; дозволяє встановлювати одночасно до 8 з'єднань з програмованими контролерами S7-300/400, програматорами, комп'ютерами та панелями операторів.

- Набір вбудованих входів і виходів; 16 дискретних входів = 24В і 16 дискретних виходів = 24В/0.5А .

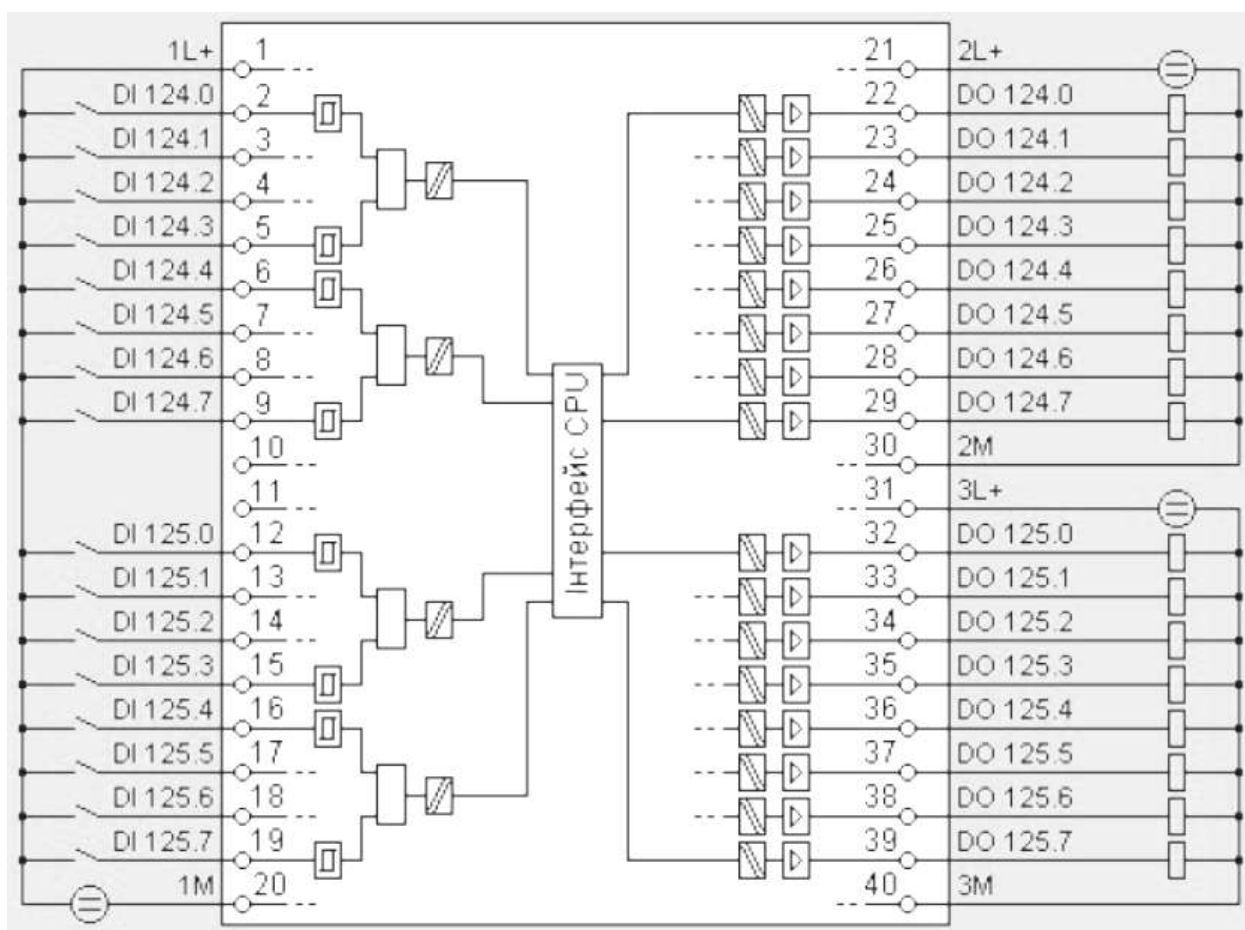


Рис. 5.5 – Схеми зовнішніх підключень CPU 313C-2DP

Рекомендації щодо підключення дискретних сигналів. У тих випадках, коли від контакторів приходять сигнали ~220 В змінного струму, то для

їхнього перетворення в сигнали ≈ 24 В постійного струму слід використовувати інтерфейсні реле, наприклад, фірми Relpol.

Для захисту вихідних ланцюгів модулів дискретного виходу від індуктивних перенапруг, які виникають при відключенні індуктивностей (катушок реле й контакторів), при монтажі слід керуватися наступними рекомендаціями:

Schutzbeschaltungen für gleichstromdurchflossene Spulen

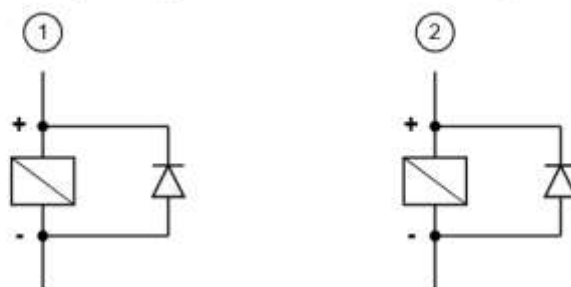


Abb. 3-2. Schutzbeschaltungen für gleichstromdurchflossene Spulen

- ① mit Diode
- ② mit Z-Diode

Schutzbeschaltungen für wechselstromdurchflossene Spulen

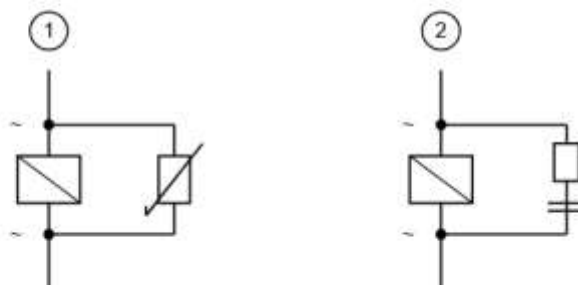


Abb. 3-3. Schutzbeschaltungen für wechselstromdurchflossene Spulen

- ① mit Varistor
- ② mit RC-Glied

Рис. 5.6 – Рекомендації Siemens при підключенні дискретних виходів

Для вводу/виводу аналогових сигналів був обраний аналоговий модуль вводу/виводу SM 334; AI 4 / AO 2 x 8 Bit (6ES7 334-0CE01-0AA0)

Номер для замовлення

6ES7 334-0CE01-0AA0

Характеристики

- 4 входи, 2 виходи;
- дозвіл вимірюваного значення 8 бітів + знак;
- обраний вид виміру: - напруга; - струм;
- гальванічна розв'язка між каналами и ланцюгами живлення електроніки.

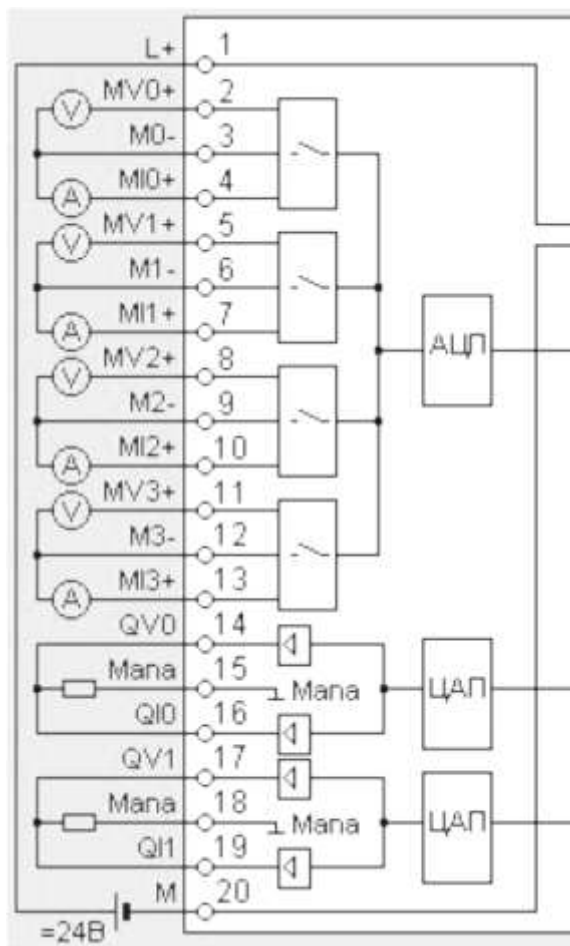


Рис. 5.7 – Схема підключення і принципова схема SM 334; AI 4 / AO 2 x 8 Bit

У таблиці нижче представлені технічні дані модуля та огляд параметрів, що налаштовуються чи встановлені за замовчуванням.

Після вибору контролера та модулів ПЗО отримуємо схему технічної структури системи керування (рис. 5.8)

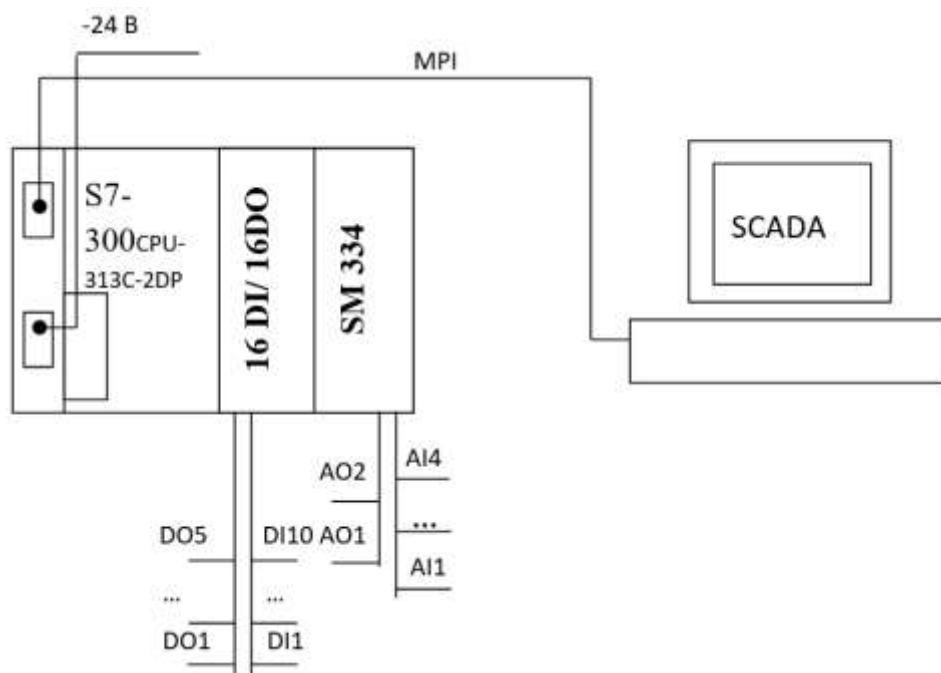


Рис. 5.8 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом теплової обробки залізобетонних виробів.

Існуюча система керування доповнена алгоритмами формування програмного завдання, каскадного регулювання та алгоритмами на основі нейронних мереж. Інтегровані алгоритми не потребують істотного збільшення обчислюваних ресурсів. Потрібно тільки організувати введення сигналу датчику температури бетону в камері. Але існуюча система має технічні резерви і не потребує технічних доповнень.

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

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені алгоритми керування процесом теплової обробки залізобетонних виробів може розроблятися безпосередньо у середовищі Simatic Step 7 з використанням стандартних мов програмування контролерів. Для цього потрібно розроблені у системі Matlab алгоритми керування перевести у цифрову форму та вид придатний для програмування, а потім написати відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загалі такий підхід потребує багато часу.

Альтернативою цьому є варіант конвертації отриманих алгоритмів з системи Matlab у потрібну середу програмування контролерів. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.

Для програмної реалізації розроблених алгоритмів скористуємось пакетом Simulink PLC Coder з його бібліотекою функціональних блоків PLCLib. Для цього з використанням блоків бібліотеки PLCLib проведемо цифрову реалізацію алгоритмів керування у моделі Simulink. Розглянемо конвертацію алгоритмів регулювання з ПД регуляторами та нейронними мережами. Отримана модель з алгоритмами підготовленими до конвертації наведена на рис. 5.9.

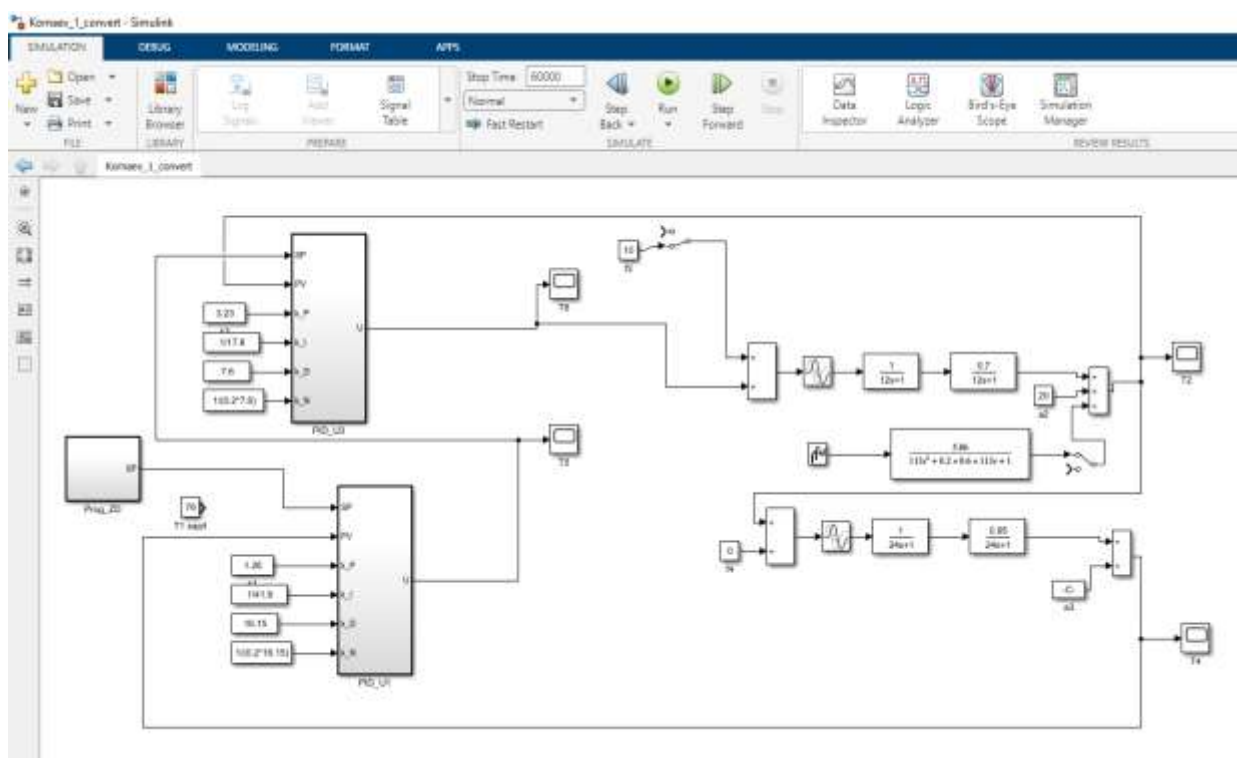


Рис. 5.9 – Схема моделювання САК процесом теплової обробки залізобетонних виробів

На рис. 5.10 – 5.12 наведені схеми моделювання ПД регулятору та задатчика.

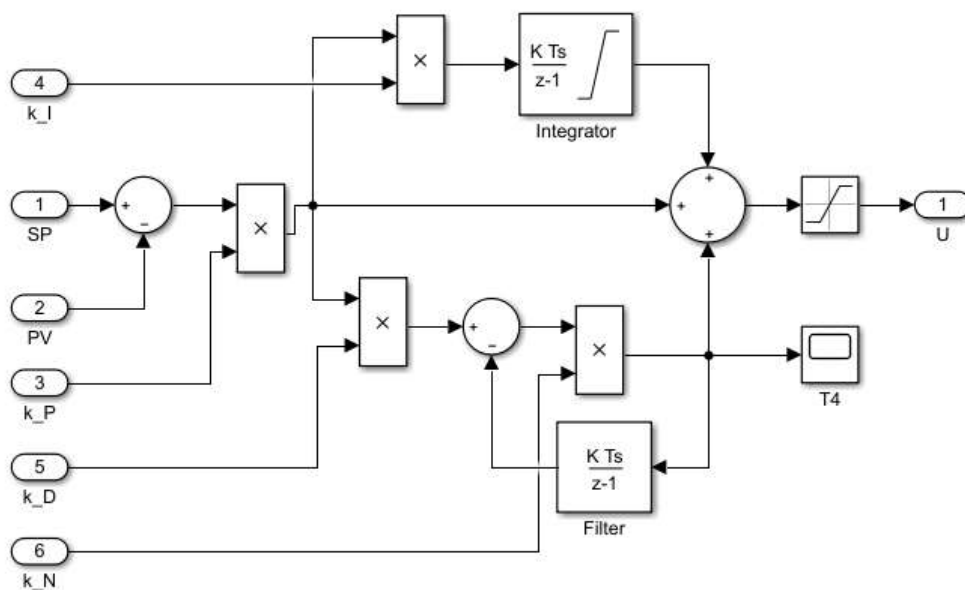


Рис. 5.10 – Схема цифрового ПД-регулятора.

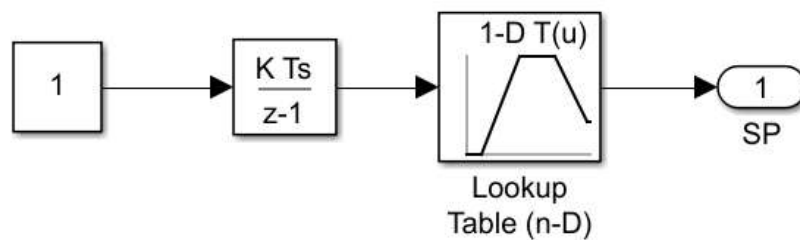


Рис. 5.11 – Схема моделювання задатчика.

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

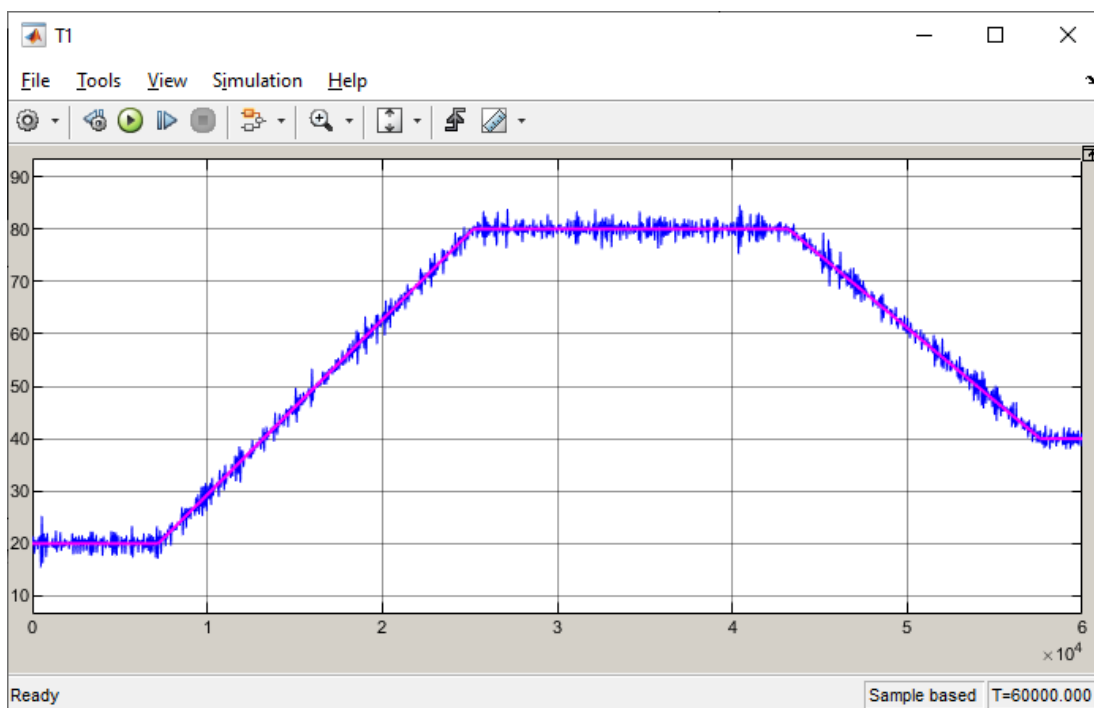


Рис. 5.12– Температура бетону в камері теплової обробки залізобетонних виробів

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

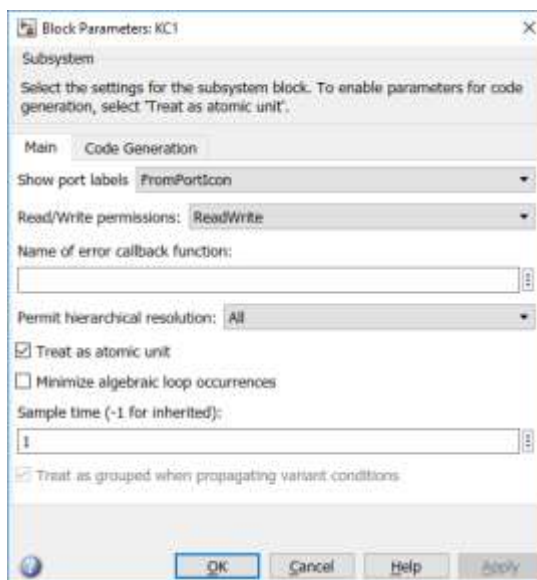


Рис. 5.13 – Вікно налаштування підсистем для їх конвертації

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

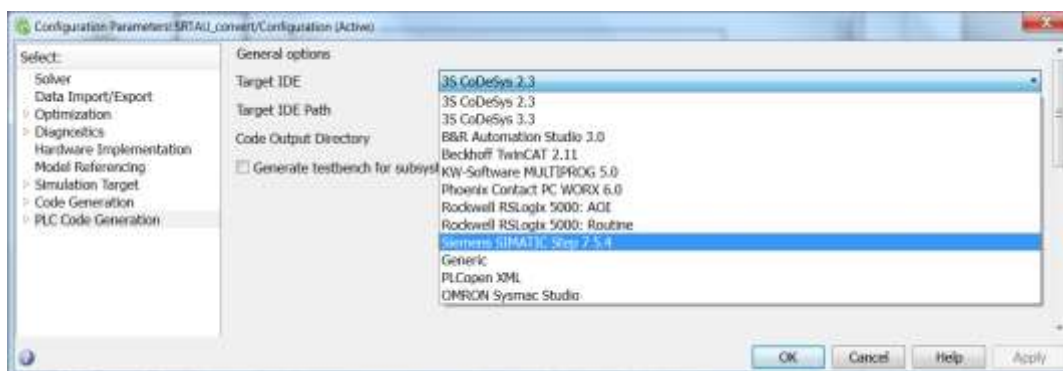


Рис. 5.14 – Вікно налаштування пакету Simulink PLC Coder

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для блоку ПД регулятора та блоку задатчика. На рис. 5.15 та 5.16 наведена процедура генерації коду для ПД регулятора.

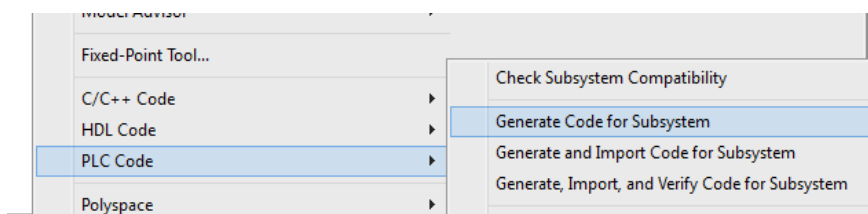


Рис 5.15 – Компіляція коду

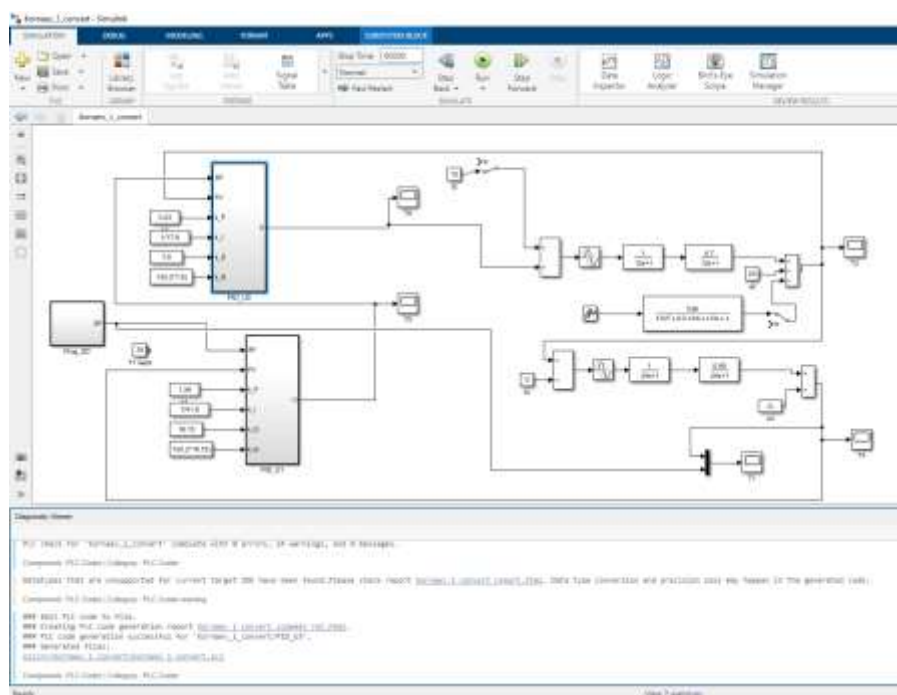


Рис. 5.16 – Результати успішної генерації коду ПД-регулятора для середовища SIMATIC Step7 5.4

На рис. 5.17 наведено вихідний генерований код мовою SCL для ПІД-регулятора.

```

1  *
2  *
3  *
4  *
5  * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "Kernaux_1_convert/PID_U3"
6  *
7  * Model name          : Kernaux_1_convert
8  * Model version       : 1.0
9  * Model creator       : user
10 * Model last modified by : user
11 * Model last modified on : Tue Jan 09 21:23:13 2020
12 * Model sample time    : 1s
13 * Subsystem name      : Kernaux_1_convert/PID_U3
14 * Subsystem sample time : 1s
15 * Simulink PLC Code version : 5.0 (R2022a) 15-Nov-2021
16 * ST code generated on : Tue Jan 09 21:28:09 2020
17 *
18 * Target IIR selection : Simulink IIR-Step 2
19 * Test Bench included  : No
20 *
21 *
22 FUNCTION_BLOCK PID_U3
23 VAR_INPUT
24   setpointType: INT;
25   SP: REAL;
26   PV: REAL;
27   K_P: REAL;
28   K_I: REAL;
29   K_D: REAL;
30   K_N: REAL;
31 END_VAR
32 VAR_OUTPUT
33   U: REAL;
34 END_VAR
35 VAR
36   Integrator_OUTDT: REAL;
37   Filter_DTSTY: REAL;
38   rtn_Product: REAL;
39   rtn_Product2: REAL;
40 END_VAR
41 CASE setpointType OF
42   0:
43     *
44     *
45     *
46     *
47     *
48     *
49     *
50     *
51     *
52     *
53     *
54     *
55     *
56     *
57     *
58     *
59     *
60     *
61     *
62     *
63     *
64     *
65     *
66     *
67     *
68     *
69     *
70     *
71     *
72     *
73     *
74     *
75     *
76     *
77     *
78     *
79     *
80     *
81     *
82     *
83     *
84     *
85     *
86     *
87     *
88     *
89     *
90     *
91     *
92     *
93     *
94     *
95     *
96     *
97     *
98     *
99     *
100    *
101    *
102    *
103    *
104    *
105    *
106    *
107    *
108    *
109    *
110    *
111    *
112    *
113    *
114    *
115    *
116    *
117    *
118    *
119    *
120    *
121    *
122    *
123    *
124    *
125    *
126    *
127    *
128    *
129    *
130    *
131    *
132    *
133    *
134    *
135    *
136    *
137    *
138    *
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    *
1000   *
1001   *
1002   *
1003   *
1004   *
1005   *
1006   *
1007   *
1008   *
1009   *
1010   *
1011   *
1012   *
1013   *
1014   *
1015   *
1016   *
1017   *
1018   *
1019   *
1020   *
1021   *
1022   *
1023   *
1024   *
1025   *
1026   *
1027   *
1028   *
1029   *
1030   *
1031   *
1032   *
1033   *
1034   *
1035   *
1036   *
1037   *
1038   *
1039   *
1040   *
1041   *
1042   *
1043   *
1044   *
1045   *
1046   *
1047   *
1048   *
1049   *
1050   *
1051   *
1052   *
1053   *
1054   *
1055   *
1056   *
1057   *
1058   *
1059   *
1060   *
1061   *
1062   *
1063   *
1064   *
1065   *
1066   *
1067   *
1068   *
1069   *
1070   *
1071   *
1072   *
1073   *
1074   *
1075   *
1076   *
1077   *
1078   *
1079   *
1080   *
1081   *
1082   *
1083   *
1084   *
1085   *
1086   *
1087   *
1088   *
1089   *
1090   *
1091   *
1092   *
1093   *
1094   *
1095   *
1096   *
1097   *
1098   *
1099   *
1100   *
1101   *
1102   *
1103   *
1104   *
1105   *
1106   *
1107   *
1108   *
1109   *
1110   *
1111   *
1112   *
1113   *
1114   *
1115   *
1116   *
1117   *
1118   *
1119   *
1120   *
1121   *
1122   *
1123   *
1124   *
1125   *
1126   *
1127   *
1128   *
1129   *
1130   *
1131   *
1132   *
1133   *
1134   *
1135   *
1136   *
1137   *
1138   *
1139   *
1140   *
1141   *
1142   *
1143   *
1144   *
1145   *
1146   *
1147   *
1148   *
1149   *
1150   *
1151   *
1152   *
1153   *
1154   *
1155   *
1156   *
1157   *
1158   *
1159   *
1160   *
1161   *
1162   *
1163   *
1164   *
1165   *
1166   *
1167   *
1168   *
1169   *
1170   *
1171   *
1172   *
1173   *
1174   *
1175   *
1176   *
1177   *
1178   *
1179   *
1180   *
1181   *
1182   *
1183   *
1184   *
1185   *
1186   *
1187   *
1188   *
1189   *
1190   *
1191   *
1192   *
1193   *
1194   *
1195   *
1196   *
1197   *
1198   *
1199   *
1200   *
1201   *
1202   *
1203   *
1204   *
1205   *
1206   *
1207   *
1208   *
1209   *
1210   *
1211   *
1212   *
1213   *
1214   *
1215   *
1216   *
1217   *
1218   *
1219   *
1220   *
1221   *
1222   *
1223   *
1224   *
1225   *
1226   *
1227   *
1228   *
1229   *
1230   *
1231   *
1232   *
1233   *
1234   *
1235   *
1236   *
1237   *
1238   *
1239   *
1240   *
1241   *
1242   *
1243   *
1244   *
1245   *
1246   *
1247   *
1248   *
1249   *
1250   *
1251   *
1252   *
1253   *
1254   *
1255   *
1256   *
1257   *
1258   *
1259   *
1260   *
1261   *
1262   *
1263   *
1264   *
1265   *
1266   *
1267   *
1268   *
1269   *
1270   *
1271   *
1272   *
1273   *
1274   *
1275   *
1276   *
1277   *
1278   *
1279   *
1280   *
1281   *
1282   *
1283   *
1284   *
1285   *
1286   *
1287   *
1288   *
1289   *
1290   *
1291   *
1292   *
1293   *
1294   *
1295   *
1296   *
1297   *
1298   *
1299   *
1300   *
1301   *
1302   *
1303   *
1304   *
1305   *
1306   *
1307   *
1308   *
1309   *
1310   *
1311   *
1312   *
1313   *
1314   *
1315   *
1316   *
1317   *
1318   *
1319   *
1320   *
1321   *
1322   *
1323   *
1324   *
1325   *
1326   *
1327   *
1328   *
1329   *
1330   *
1331   *
1332   *
1333   *
1334   *
1335   *
1336   *
1337   *
1338   *
1339   *
1340   *
1341   *
1342   *
1343   *
1344   *
1345   *
1346   *
1347   *
1348   *
1349   *
1350   *
1351   *
1352   *
1353   *
1354   *
1355   *
1356   *
1357   *
1358   *
1359   *
1360   *
1361   *
1362   *
1363   *
1364   *
1365   *
1366   *
1367   *
1368   *
1369   *
1370   *
1371   *
1372   *
1373   *
1374   *
1375   *
1376   *
1377   *
1378   *
1379   *
1380   *
1381   *
1382   *
1383   *
1384   *
1385   *
1386   *
1387   *
1388   *
1389   *
1390   *
1391   *
1392   *
1393   *
1394   *
1395   *
1396   *
1397   *
1398   *
1399   *
1400   *
1401   *
1402   *
1403   *
1404   *
1405   *
1406   *
1407   *
1408   *
1409   *
1410   *
1411   *
1412   *
1413   *
1414   *
1415   *
1416   *
1417   *
1418   *
1419   *
1420   *
1421   *
1422   *
1423   *
1424   *
1425   *
1426   *
1427   *
1428   *
1429   *
1430   *
1431   *
1432   *
1433   *
1434   *
1435   *
1436   *
1437   *
1438   *
1439   *
1440   *
1441   *
1442   *
1443   *
1444   *
1445   *
1446   *
1447   *
1448   *
1449   *
1450   *
1451   *
1452   *
1453   *
1454   *
1455   *
1456   *
1457   *
1458   *
1459   *
1460   *
1461   *
1462   *
1463   *
1464   *
1465   *
1466   *
1467   *
1468   *
1469   *
1470   *
1471   *
1472   *
1473   *
1474   *
1475   *
1476   *
1477   *
1478   *
1479   *
1480   *
1481   *
1482   *
1483   *
1484   *
1485   *
1486   *
1487   *
1488   *
1489   *
1490   *
1491   *
1492   *
1493   *
1494   *
1495   *
1496   *
1497   *
1498   *
1499   *
1500   *
1501   *
1502   *
1503   *
1504   *
1505   *
1506   *
1507   *
1508   *
1509   *
1510   *
1511   *
1512   *
1513   *
1514   *
1515   *
1516   *
1517   *
1518   *
1519   *
1520   *
1521   *
1522   *
1523   *
1524   *
1525   *
1526   *
1527   *
1528   *
1529   *
1530   *
1531   *
1532   *
1533   *
1534   *
1535   *
1536   *
1537   *
1538   *
1539   *
1540   *
1541   *
1542   *
1543   *
1544   *
1545   *
1546   *
1547   *
1548   *
1549   *
1550   *
1551   *
1552   *
1553   *
1554   *
1555   *
1556   *
1557   *
1558   *
1559   *
1560   *
1561   *
1562   *
1563   *
1564   *
1565   *
1566   *
1567   *
1568   *
1569   *
1570   *
1571   *
1572   *
1573   *
1574   *
1575   *
1576   *
1577   *
1578   *
1579   *
1580   *
1581   *
1582   *
1583   *
1584   *
1585   *
1586   *
1587   *
1588   *
1589   *
1590   *
1591   *
1592   *
1593   *
1594   *
1595   *
1596   *
1597   *
1598   *
1599   *
1600   *
1601   *
1602   *
1603   *
1604   *
1605   *
1606   *
1607   *
1608   *
1609   *
1610   *
1611   *
1612   *
1613   *
1614   *
1615   *
1616   *
1617   *
1618   *
1619   *
1620   *
1621   *
1622   *
1623   *
1624   *
1625   *
1626   *
1627   *
1628   *
1629   *
1630   *
1631   *
1632   *
1633   *
1634   *
1635   *
1636   *
1637   *
1638   *
1639   *
1640   *
1641   *
1642   *
1643   *
1644   *
1645   *
1646   *
1647   *
1648   *
1649   *
1650   *
1651   *
1652   *
1653   *
1654   *
1655   *
1656   *
1657   *
1658   *
1659   *
1660   *
1661   *
1662   *
1663   *
1664   *
1665   *
1666   *
1667   *
1668   *
1669   *
1670   *
1671   *
1672   *
1673   *
1674   *
1675   *
1676   *
1677   *
1678   *
1679   *
1680   *
1681   *
1682   *
1683   *
1684   *
1685   *
1686   *
1687   *
1688   *
1689   *
1690   *
1691   *
1692   *
1693   *
1694   *
1695   *
1696   *
1697   *
1698   *
1699   *
1700   *
1701   *
1702   *
1703   *
1704   *
1705   *
1706   *
1707   *
1708   *
1709   *
1710   *
1711   *
1712   *
1713   *
1714   *
1715   *
1716   *
1717   *
1718   *
1719   *
1720   *
1721   *
1722   *
1723   *
1724   *
1725   *
1726   *
1727   *
1728   *
1729   *
1730   *
1731   *
1732   *
1733   *
1734   *
1735   *
1736   *
1737   *
1738   *
1739   *
1740   *
1741   *
1742   *
1743   *
1744   *
1745   *
1746   *
1747   *
1748   *
1749   *
1750   *
1751   *
1752   *
1753   *
1754   *
1755   *
1756   *
1757   *
1758   *
1759   *
1760   *
1761   *
1762   *
1763   *
1764   *
1765   *
1766   *
1767   *
1768   *
1769   *
1770   *
1771   *
1772   *
1773   *
1774   *
1775   *
1776   *
1777   *
1778   *
1779   *
1780   *
1781   *
1782   *
1783   *
1784   *
1785   *
1786   *
1787   *
1788   *
1789   *
1790   *
1791   *
1792   *
1793   *
1794   *
1795   *
1796   *
1797   *
1798   *
1799   *
1800   *
1801   *
1802   *
1803   *
1804   *
1805   *
1806   *
1807   *
1808   *
1809   *
1810   *
1811   *
1812   *
1813   *
1814   *
1815   *
1816   *
1817   *
1818   *
1819   *
1820   *
1821   *
1822   *
1823   *
1824   *
1825   *
1826   *
1827   *
1828   *
1829   *
1830   *
1831   *
1832   *
1833   *
1834   *
1835   *
1836   *
1837   *
1838   *
1839   *
1840   *
1841   *
1842   *
1843   *
1844   *
1845   *
1846   *
1847   *
1848   *
1849   *
1850   *
1851   *
1852   *
1853   *
1854   *
1855   *
1856   *
1857   *
1858   *
1859   *
1860   *
1861   *
1862   *
1863   *
1864   *
1865   *
1866   *
1867   *
1868   *
1869   *
1870   *
1871   *
1872   *
1873   *
1874   *
1875   *
18
```

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для середовища SIMATIC Step7 5.4 На рис. 5.19 наведено вихідний генерований код мовою SCL для блоку нейронної мережі.

```

22 FUNCTION_BLOCK Netno
23 VAR_INPUT
24   sMethodType: INT;
25   In1: REAL;
26 END_VAR
27 VAR_OUTPUT
28   Out1: REAL;
29 END_VAR
30 VAR
31   c_DiscreteFilter1_st: REAL;
32   UnitDelay6_ISTATE: REAL;
33   rtd_Product_a: REAL;
34   rtd_Sum13: REAL;
35 END_VAR
36 CASE sMethodType OF
37   0:
38     (* InitializeConditions for DiscreteFilter: '<SI>/Discrete Filter1' *)
39     c_DiscreteFilter1_st := 0.0;
40     (* InitializeConditions for UnitDelay: '<SI>/Unit Delay' *)
41     UnitDelay6_ISTATE := 0.0;
42   1:
43     (* DiscreteFilter: '<SI>/Discrete Filter1' incorporates:
44      * Gain: '<SI>/Gain' *)
45     rtd_Product_a := (0.4475 * In1) - (-0.7812 * c_DiscreteFilter1_st);
46     (* Sum: '<SI>/Sum13' incorporates:
47      * Constant: '<SI>/c0e1'
48      * Constant: '<SI>/c0e1'
49      * Constant: '<SI>/c0e1'
50      * Constant: '<SI>/c0e1'
51      * Constant: '<SI>/c0e1'
52      * Constant: '<SI>/c0e1'
53      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
54      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
55      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
56      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
57      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
58      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
59      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
60      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
61      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
62      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
63      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
64      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
65      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
66      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
67      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
68      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
69      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
70      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
71      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
72      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
73      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
74      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
75      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
76      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
77      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
78      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
79      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
80      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
81      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
82      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
83      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
84      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
85      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
86      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
87      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
88      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
89      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
90      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
91      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
92      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
93      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
94      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
95      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
96      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
97      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
98      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
99      * Constant: '<SI>/IW(1,1)'
100     Out1 := rtd_Product_a + rtd_Sum13;

```

Рис. 5.19 – Фрагмент вихідного генерованого коду мовою SCL блоку нейронної мережі для середовища програмування Step7

Після генерації коду в середовищі MATLAB додаємо новий код у існуючий проект у середовищі Step 7. Процес інтеграції програмних модулів у проект Step 7 наведено на рис. 5.21, а на рис 5.22 приклад імпортованого генерованого коду.

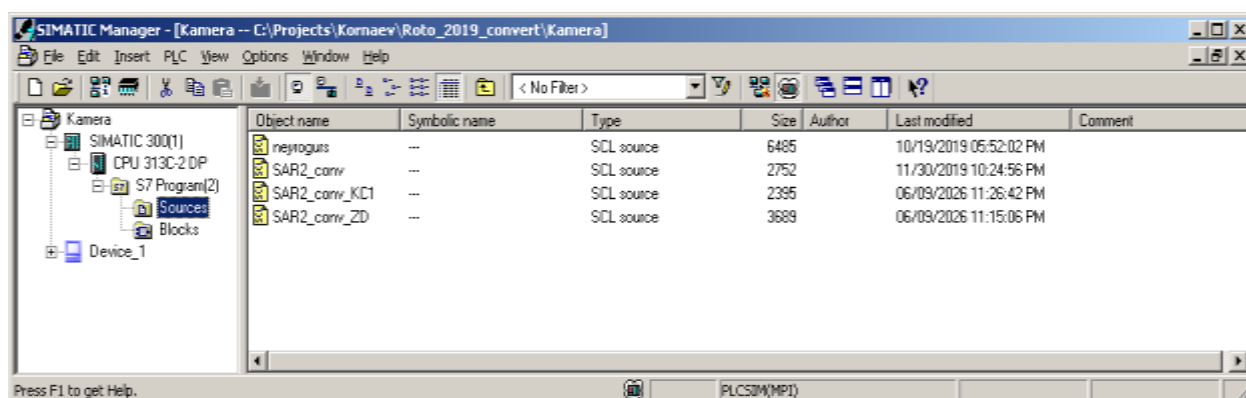


Рис. 5.21 – Процедура імпорту генерованого коду в середовище програмування Step 7 і створення відповідних функціональних блоків

Алгоритми регулювання температури бетону в камері та програмний задатчик температури реалізовані у блоці FB5. Фрагмент коду програми наведено на рис. 5.24.

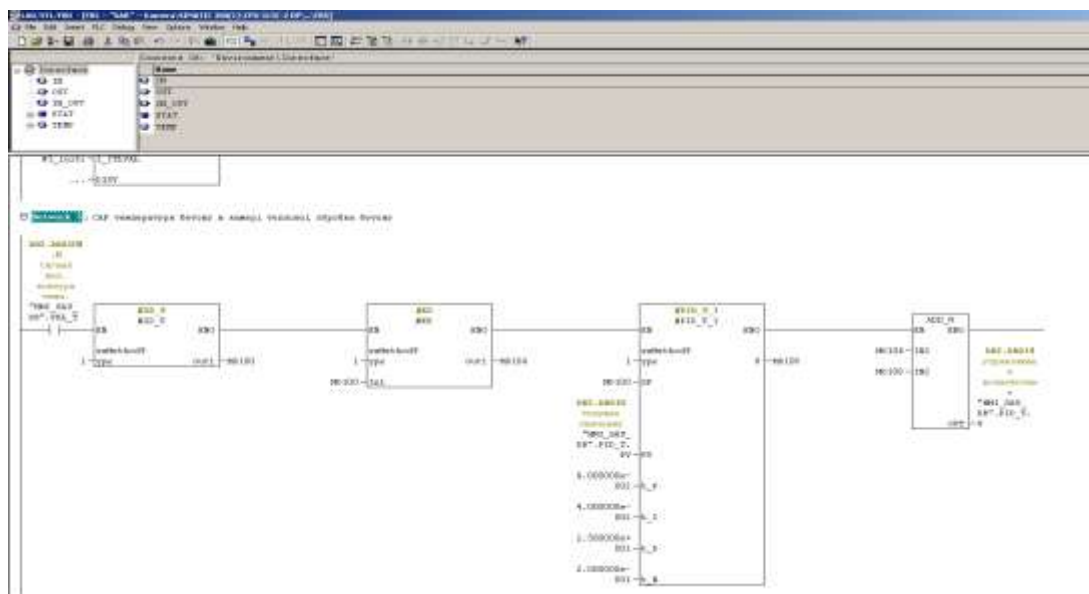


Рис. 5.24. Фрагмент програми в блоці FB5 яка реалізує розрахунок регулятора та програмного задатчика

Проведемо тестування програми в режимі емуляції контролера. Для цього доповнимо програму моделлю об'єкта керування і запустимо розрахунок моделі SAR. Фрагмент програми моделі ОК наведено на рис. 5.25. А результати тестування SAR температури бетону у камері наведені рис. 5.26 - 5.28. Графіки наведено у вікнах SCADA – системи WinCCflexible.

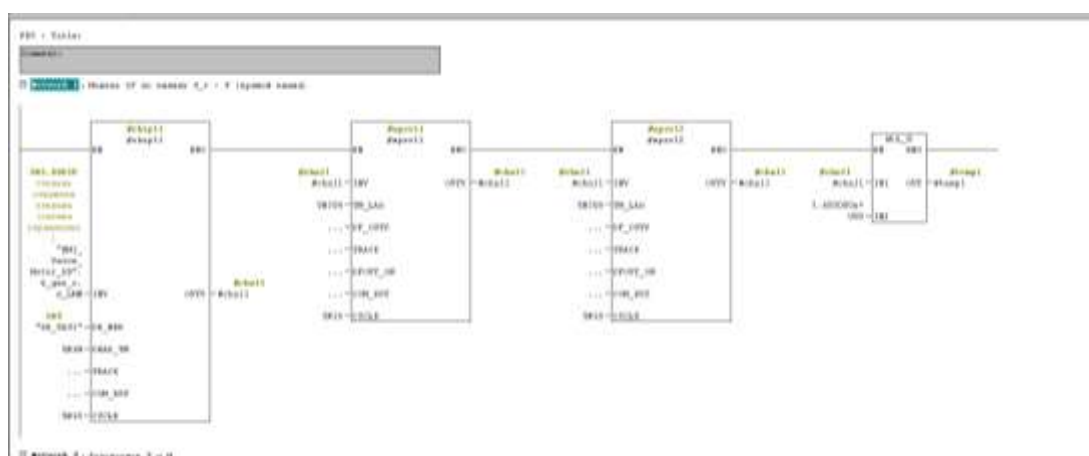


Рис. 5.25 – Фрагмент програми в блоці FB5 яка реалізує розрахунок моделі ОК

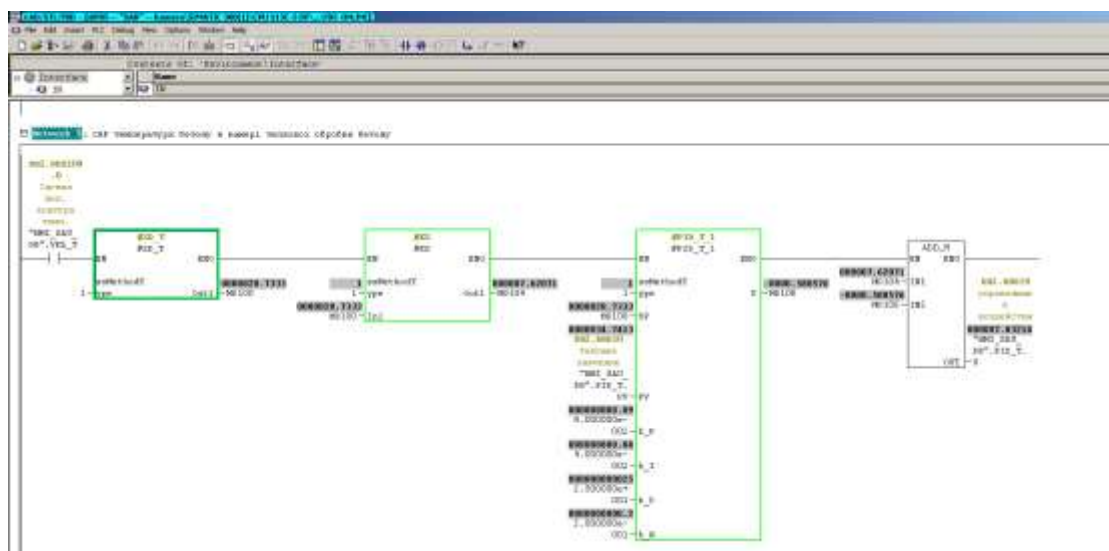


Рис. 5.26 – Фрагмент програми алгоритмів регулювання у режимі відлагодження



Рис. 5.27 – Результати тестування САР (вікно SCADA)

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

5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок

За результатами моделювання можна зробити висновки що побудова програмної САР температури бетону в камері теплової обробки залізобетонних виробів дозволяє з більшою точністю підтримувати температуру на заданому значенні та забезпечити заданий час теплової обробки бетону. Така САР дозволяє зменшення браку готової продукції (приблизно до 10%) та зменшення енерговитрат до 20-25%, зокрема за рахунок відсутності перегріву бетону у режимах його самозігрівання

5.4 Висновки за розділом

1. В цьому розділі розглянута програмно-технічна структура системи керування процесом теплової обробки залізобетонних виробів. Обґрунтовано обрані контролер, ПЗО та програмне забезпечення фірми Siemens для реалізації системи.

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

3. Вдосконалення системи керування забезпечить більш якісну теплову обробку залізобетонних виробів за заданою у часі програмою.

Висновки

Якісна реалізація технологічного процесу керування теплової обробки залізобетонних виробів залежить від точності підтримки режимних параметрів: температури, розрідження в камері та, загалом, температури залізобетонних виробів.

За всіма каналами об'єкт має статичні властивості і найбільш точно може бути описаний моделями другого порядку.

Відтворення отриманих моделей у середовищі імітаційного моделювання здійснювалося в середовищі моделювання MATLAB.

Далі ця модель була використана для синтезу САР базової структури, а потім і підвищеної динамічної точності.

В якості базової було описано двоканальну САР базової структури з контурами регулювання температури і розрідження в камері. САР з ПІД-регуляторами в перехідних режимах за температурою в камері задовольняє гранично припустимим вимогам, а САР з ПІ-регуляторами і САР з ПІД-регулятором розрідження в камері гранично припустимим вимогам не задовольняє. САР базової структури за температурою в камері в сталих режимах не виходить за рамки зони незначних відхилень, а САР розрідження в камері в сталих режимах не виходить за рамки регламентної зони.

Введення до алгоритму регулювання Д-складової призвело до зменшення інтегрального критерію на 45% у порівнянні САР з ПІ-регуляторами. Тому в якості базового було прийнято ПІД-закон регулювання.

Також було описано САР автономної структури, побудованої на основі САР базової структури. Автономна САР передбачає забезпечення взаємної автономності каналів регулювання.

САР підвищеної динамічної точності задовольняє гранично припустимим вимогам. Після підвищення динамічної точності і забезпечення грубості САР інтегральний критерій у порівнянні з САР базової структури зменшився на 67%.

САР підвищеної динамічної точності є грубою.

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

Було проаналізовано недоліки системи базової і автономної структури, сформульовано задачі підвищення ефективності системи автоматичного керування з використанням інструментарію нечіткої логіки, нейронних мереж, а також за рахунок розширення САР введенням інших контрольованих координат, зокрема, розширення САР температури в камері до температури залізобетонних блоків каскадної структури з програмним задатчиком температури залізобетонних блоків.

Була розроблена модель САУ з нечітким регулятором та САУ з нейрорегулятором. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Були визначені функції приналежності до нечітких множин, сформована база правил функціонування регулятора у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначений алгоритм нечіткого виводу – Сугено 0-порядку. Було встановлено, що за якістю регулювання така САУ функціонує незначно гірше, ніж САУ з традиційним ПД-регулятором при об'єкті управління з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САУ, за характеристиками нечіткого регулятора було виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Тренування штучної нейронної мережі було виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink за відповідним виконавчим кодом. Була розроблена модель САУ з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором були проведена при тих же умовах, що і САУ з традиційним ПД-регулятором.

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

за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 4,68 при САУ з нейрорегулятором і 6,13 при САУ з традиційним ПД-регулятором.

В заключній частині для практичної реалізації нейрорегулятора була сформована програма для промислового контролера.

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

Розроблено та досліджено модернізовану каскадну САР процесом теплової обробки залізобетонних виробів. САР реалізує додаткову функцію: функцію регулювання температури бетону з алгоритмом каскадної структури та програмним задатчиком. Реалізація цієї функції забезпечує підвищення динамічної точності підтримання температури бетону у камері на заданому значенні в умовах дії параметричних і координатних збурень та дає можливість забезпечити високу якість отриманого бетону та зниження витрат теплової енергії на його виготовлення.

Проведено низку порівняльних аналізів САР базової структури та САР, що реалізує функцію каскадного регулювання. Дослідження показали серйозні переваги використання каскадної САР температури бетону і актуальність її подальшого використання.

В цілому проаналізовано переваги використання такої каскадної САР, можна зробити висновок що така система знижує витрати на газ, прискорює випуск готової продукції з тієї ж кількості камер, захищає від штрафів за неякісний або тріснутий залізобетон.

Розглянута програмно-технічна структура системи керування процесом теплової обробки залізобетонних виробів. Обґрунтовано обрані контролер, ПЗО та програмне забезпечення фірми Siemens для реалізації системи.

Розроблено в системі Matlab моделі нових алгоритмів керування за допомогою пакету Simulink PLC Coder були конвертовані для інтеграції у

середовище програмування контролерів фірми Siemens Simatic Step 7. Проведене тестування конвертованого програмного забезпечення підтвердило його працездатність та ефективність застосування конвертору пакета Simulink PLC Coder.

Вдосконалення системи керування забезпечить більш якісну теплову обробку залізобетонних виробів за заданою у часі програмою.

Перелік джерел

1. ДСТУ Б В.2.7-43-96. Будівельні матеріали. Бетони. Класифікація і загальні технічні вимоги. — Київ : Держкоммістобудування України, 1997.
2. Плугін А. А., Бондаренко О. П., Демченко С. В. Технологія бетонних і залізобетонних виробів та конструкцій : підручник. — Харків: УкрДУЗТ, 2019. — 410 с.
3. Ткаченко А. М., Савицький М. В. Автоматизовані системи керування технологічними процесами у виробництві будівельних матеріалів. — Дніпро : ПДАБА, 2020. — 184 с.
4. Шевченко М. І., Петренко В. А. Оптимізація режимів теплової обробки залізобетонних виробів в автоматизованих камерах пропарювання // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. — 2021. — № 62. — С. 12–19.
5. Корнаєв Д.І. «Автоматизація процесу управління сушінням цементних блоків на підприємстві «Чорноморгідрозалізобетон»» (рукопис) / Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНАХТ 2019. – 202 с.
6. Квасніков В. П., Ларін В. Ю. Автоматизація технологічних процесів і виробництв : підручник. — Київ : КНУБА, 2018. — 256 с.
7. Конспект лекцій "Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації" для студентів спеціальності 151 / Укладач В.А. Хобін. – Одеса: ОНАХТ, 2019. – 97 с.
8. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування» частина 1, для студентів спеціальності 151 денної та заочної форм навчання. – Одеса: ОНАХТ, 2019. – 112 с.
9. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування» частина 2, для студентів спеціальності 151 денної та заочної форм навчання. - Одеса: ОНАХТ, 2019. - 87 с.

10. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Спеціальні розділи теорії управління» для студентів спеціальностей 8.05020201 денної та заочної форми навчання – Одеса: ОНАХТ, 2016 р.
11. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту [Текст] / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
12. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
13. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
14. Архангельський В.І. і др. Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] – К. : Техніка, 1999. – 364с.
15. Василюк Т. Ю. и др. Синтез нейромережевого регулятора для електромеханічної системи з пружними зв'язками в кінематичних передачах //Системи обробки інформації. – 2018. – №. 2. – С. 7-17.
16. Штучні нейронні мережі [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Штучна_нейронна_мережа
17. Генетичний алгоритм [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Генетичний_алгоритм
18. Нечітка логіка [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Нечітка_логіка
19. Фазифікація [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Фазифікація>
20. Дефазифікація [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Дефазифікація>
21. Система нечіткого виведення [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Система_нечіткого_виведення
22. Пупена О. М., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Програмування промислових контролерів та розробка систем SCADA : навч. посібник. — Київ: ЛІРА-К, 2023. — 380 с.

Додатки

Додаток А. Патент на корисну модель



УКРАЇНА (19) **UA** (11) **159845** (13) **U**
(51) МПК (2025.01)
B28B 11/00
B28B 11/24 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2025 00256	(72) Винахідник(и): Корнаєв Дмитро Ігорович (UA), Світій Іван Миколайович (UA), Войнова Світлана Олександрівна (UA)
(22) Дата подання заявки: 21.01.2025	(73) Власник(и) (якоділячі): Корнаєв Дмитро Ігорович, вул. Небесної Сотні, 75, кв. 42, м. Одеса, 65121 (UA), Світій Іван Миколайович, вул. Центральний Аеропорт, 15, кв. 88, м. Одеса, 65036 (UA), Войнова Світлана Олександрівна, вул. Транспортна, 8, кв. 17, м. Одеса, 65039 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 10.07.2025	
(45) Публікація відомостей 09.07.2025, Бюл. № 28 про державну реєстрацію:	

(11) 159845

UA 159845 U

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
Державна організація
«Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»
(УКРНОІВІ)

Цей паперовий документ ідентичний за документарною інформацією та реквізитами електронному документу з електронним підписом уповноваженої особи Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

Паперовий документ містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Для доступу до електронного примірника цього документа з ідентифікатором 2194090725 необхідно:

1. Перейти за посиланням <https://sis.nipo.gov.ua>.
2. Обрати пункт меню Сервіси – Отримати оригінал документу.
3. Вказати ідентифікатор електронного примірника цього документа та натиснути «Завантажити».

Уповноважена особа УКРНОІВІ

09.07.2025

І.Є. Матусевич

Додаток Б. Наукова стаття

УДК 681.5:66.047:691.54

АВТОМАТИЗАЦІЯ СУШІННЯ БЕТОННИХ БЛОКІВ

CONCRETE BLOCKS DRYING AUTOMATION

Корнаєв Д.І.¹, Світій І.М.², Воїнова С.О.³Kornaiev D.I.¹, Svityi I.M.², Voinova S.O.³

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID: ¹0009-0003-0965-3382; ²0000-0001-8524-5565; ³0000-0003-0203-0599E-mail: ¹kornaiev1996@gmail.com; ²swityi@yahoo.com; ³voinova_s@yahoo.com

Анотація. Теплова обробка бетонних виробів є невід'ємною складовою сучасного будівельного виробництва, що забезпечує необхідні міцнісні характеристики, довговічність та надійність конструкцій, які широко використовуються у житловому, промисловому та інфраструктурному будівництві. Ефективність реалізації цього технологічного процесу безпосередньо впливає на енерговитрати підприємств, екологічну безпеку та собівартість будівельної продукції, що обумовлює актуальність автоматизації цього процесу. У статті розглянуто систему автоматичного керування технологічним процесом теплової обробки бетонних виробів. Об'єктом дослідження є теплогенератор як складова системи теплопостачання камери теплової обробки. Метою роботи є підвищення енергоефективності процесу, зниження споживання енергоносіїв та зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу. На основі обробки експериментальних даних отримано математичні моделі статичних і динамічних характеристик теплогенератора та підтверджено їх адекватність. З використанням отриманих моделей виконано синтез і аналіз систем автоматичного регулювання температури та розрідження в камері теплової обробки, у тому числі системи підвищеної динамічної точності з коригуючими зв'язками. Показано, що застосування таких рішень забезпечує покращення динамічних і якісних показників роботи системи. Розроблено контролерно-комп'ютерну мережу для реалізації системи автоматичного керування, виконано програмування алгоритмів регулювання та логічного керування, а також створено SCADA-систему автоматизованого робочого місця оператора і наладики. Проведено попереднє обґрунтування економічної доцільності впровадження запропонованих технічних рішень, розглянуто питання хорони праці.

Abstract. Heat treatment of concrete products is an integral part of modern construction production, which provides the necessary strength characteristics, durability and reliability of structures that are widely used in residential, industrial and infrastructure construction. The effectiveness of the implementation of this technological process directly affects the energy consumption of enterprises, environmental safety and the cost of construction products, which determines the relevance of automating this process. The article considers the automatic control system of the technological process of heat treatment of concrete products. The object of the study is a heat generator as a component of the heat supply system of the heat treatment chamber. The purpose of the study is to increase the energy efficiency of the process, reduce energy consumption and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere. Based on the processing of experimental data, mathematical models of static and dynamic characteristics of the heat generator were obtained and their adequacy was confirmed. Using the obtained models, the synthesis and analysis of automatic temperature and rarefaction control systems in the heat treatment chamber were performed, including systems of increased dynamic accuracy with corrective connections. It is shown that the use of such solutions provides an improvement in the dynamic and qualitative indicators of the system. A controller-computer network has been developed to implement the automatic control system, programming of regulation and logical control algorithms has been performed, and a SCADA system for an automated workplace of the operator and adjuster has been created. A preliminary justification of the economic feasibility of implementing the proposed technical solutions has been carried out, and the issue of labor protection has been considered.

Ключові слова: бетонні блоки, сушіння, будівництво, камера теплової обробки, теплогенератор, система автоматичного керування, енергоефективність.

Keywords: concrete blocks, drying, construction, heat treatment chamber, heat generator, automatic control system, energy efficiency.

Вступ. Залізобетонні вироби є однією з базових складових сучасного будівництва та інфраструктурного розвитку, оскільки широко застосовуються у житловому, промисловому, транспортному та соціальному будівництві. Від їх якості, міцності та довговічності безпосередньо залежить надійність будівель і споруд, безпека експлуатації та рівень комфорту життя населення. У зв'язку з цим виробництво бетонних і

залізобетонних виробів відіграє важливу роль як у забезпеченні потреб суспільства, так і в розвитку промислового сектору економіки.

В умовах ринкової економіки ефективне функціонування підприємств з виробництва бетонних виробів можливе лише за умови випуску конкурентоспроможної продукції, що поєднує високу якість із мінімальними витратами енергоносіїв і ресурсів. Одним із ключових етапів технологічного процесу виготовлення бетонних блоків є їх теплова обробка (сушіння), яка визначає формування фізико-механічних властивостей готового виробу. Порушення регламенту за температурою та розрідженням в камері теплової обробки призводить до зниження якості продукції, перевитрат енергії та зростання собівартості.

Практика експлуатації показує, що використання сучасного технологічного обладнання без відповідного рівня автоматизації систем керування не дозволяє повною мірою реалізувати його потенціал. Досягнення високої енергоефективності, стабільності технологічних режимів і гарантованої якості готової продукції можливе лише за рахунок впровадження ефективних систем автоматичного керування (САК) технологічним процесом. Зокрема, при тепловій обробці бетонних виробів важливим є точне та узгоджене регулювання температури й розрідження, що реалізується із застосуванням САК теплогенератором.

Підвищення вимог до якості регулювання зумовлює необхідність використання математичного моделювання, сучасних алгоритмів автоматичного регулювання та інтеграції апаратних і програмних засобів автоматизації в єдину систему. У цьому контексті актуальним є розробка та впровадження сучасної САК теплогенератором, що забезпечує підвищення якості керування технологічним процесом, зниження енерговитрат і покращення техніко-економічних показників виробництва. Таким чином, дослідження, спрямоване на автоматизацію процесу сушіння бетонних блоків із використанням сучасних засобів і методів автоматичного керування, є актуальним та має практичну значущість для підприємств будівельної індустрії.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Оскільки питання автоматизації теплової обробки будівельних виробів є актуальним, чимало дослідників приділяли йому увагу. Так Бордюженко О.М. розглянув спосіб автоматичного керування сушінням глиняної цегли, який містить регулювання температури в камерній сушарці зміною положення регулюючого органу подачі сушильного агенту в камеру сушіння та контроль розрідження в камері [1]. Недоліком даного способу є низька якість готової глиняної цегли внаслідок низької ефективності сушіння цегли через нестабільне розрідження в камері в результаті відсутності його стабілізації. Компанія «Будпостач газобетон» запропонувала спосіб автоматичного керування сушінням блоків неавтоклавного газобетону, який забезпечує контроль температури та розрідження в камері сушіння [2]. Недоліком даного способу є низька якість блоків неавтоклавного газобетону внаслідок низької ефективності їх сушіння через нестабільні температуру та розрідження в камері сушіння в результаті відсутності їх стабілізації. Савенко С. В., Гордійчук С. О., Крижанівська І. В. розробили автоматизовану систему керування процесом сушіння будівельних матеріалів, за допомогою якої стан технологічного процесу контролюють за значенням вологості теплоносія на виході з сушильного барабану, а керування вологістю здійснюють відкриванням і закриванням клапану подачі паливного газу в топку сушильного барабану [3]. Недоліком даного способу є недостатня ефективність процесу сушіння в результаті відсутності регулювання температури та розрідження в камері сушіння. Євсеєнко О. М., Ольшевський А. В., Лещенко В. М. розглянули автоматизовану систему керування сушильною камерою періодичної дії, яка містить контроль основних параметрів сушіння, використання регуляторів з прогнозуванням, апаратні підходи. Для оцінки ефективності алгоритмів керування орієнтуються на швидкість сушіння, відсутність дефектів, низьке споживання енергії [4]. Недоліком даного способу є недостатня ефективність процесу сушіння в результаті відсутності регулювання температури в сушильній камері. Компанія AQteck пропонує автоматизовану систему керування сушінням цегли в сушильних камерах на основі сенсорного панельного контролеру, який забезпечує регулювання вологості та температури в камері, вимірювання напору та витрати теплоносія [5]. Недоліком даного способу є низька якість готової цегли внаслідок низької ефективності її сушіння через нестабільне розрідження в камері в результаті відсутності його стабілізації. Компанія Бетон-ІнЮа використовує спосіб автоматичного керування сушінням будівельних блоків, який містить регулювання температури в камері сушіння шляхом зміни положення регулюючого органу подачі газу в паливник сушарки, а також регулювання розрідження в камері сушіння шляхом зміни положення регулюючого органу відводу димових газів з камери [6]. Недоліком даного способу є низька якість будівельних блоків внаслідок низької ефективності їх сушіння через низьку динамічну точність керування цим процесом в результаті неврахованої шкідливої дії контурів регулювання температури та розрідження в камері сушіння один на одного.

В Одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем запропоновано ефективну САК сушінням будівельних блоків, яка забезпечує високу динамічну точність керування цим процесом шляхом компенсації шкідливої дії контурів регулювання температури та розрідження в камері сушіння один на одного побудованою автономною системою автоматичного регулювання (САР) [7].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу сушіння будівельних блоків та зменшення енергетичних витрат за рахунок підвищення динамічної точності САК цим процесом.

Для реалізації поставленої мети було виконано такі завдання:

- опис ділянки технологічного процесу теплової обробки залізобетонних виробів, її агрегатів та існуючого

рівня автоматизації керування ними;

- виявлення потенційних джерел економічної ефективності і конкретизація задачі модернізації САК;
- конкретизація задачі дотримання регламентів технологічного процесу теплової обробки залізобетонних виробів;
- розробка і реалізація комплексу його моделей як об'єкта керування (ОК);
- розробка і параметрична оптимізація алгоритмів регулювання, порівняльний аналіз САК; отримання цифрових аналогів обраних алгоритмів;
- конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування технологічним процесом теплової обробки залізобетонних виробів;
- вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів;
- розробка контролерно-комп'ютерної мережі; програмування алгоритмів регулювання та логічного керування;
- розробка SCADA системи для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика САК.
- розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК
- попереднє обґрунтування економічної доцільності реалізації проекту та розробка 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 розглянуто технологічний процес виробництва залізобетонних виробів (ЗБВ), який складається з приготування бетонної суміші; армування ЗБВ; формування; затвердіння; обробки поверхні готових виробів, контролю якості. Для затвердіння ЗБВ застосовують нормальний режим при температурі від 15 до 20°C; теплову обробку при температурі до 100°C; автоклавну обробку при температурі понад 100°C і підвищеному тиску.

Технологічний процес теплової обробки ЗБВ з використанням теплогенератора ТОК-1А є тепловим процесом, пов'язаним з передачею теплоти від теплоносія до ЗБВ у тепловій камері. Важливою умовою нормального функціонування технологічного процесу є заповнення магістралі газом.

Проведено параметризацію схеми технологічного процесу виробництва ЗБВ (рис. 1).

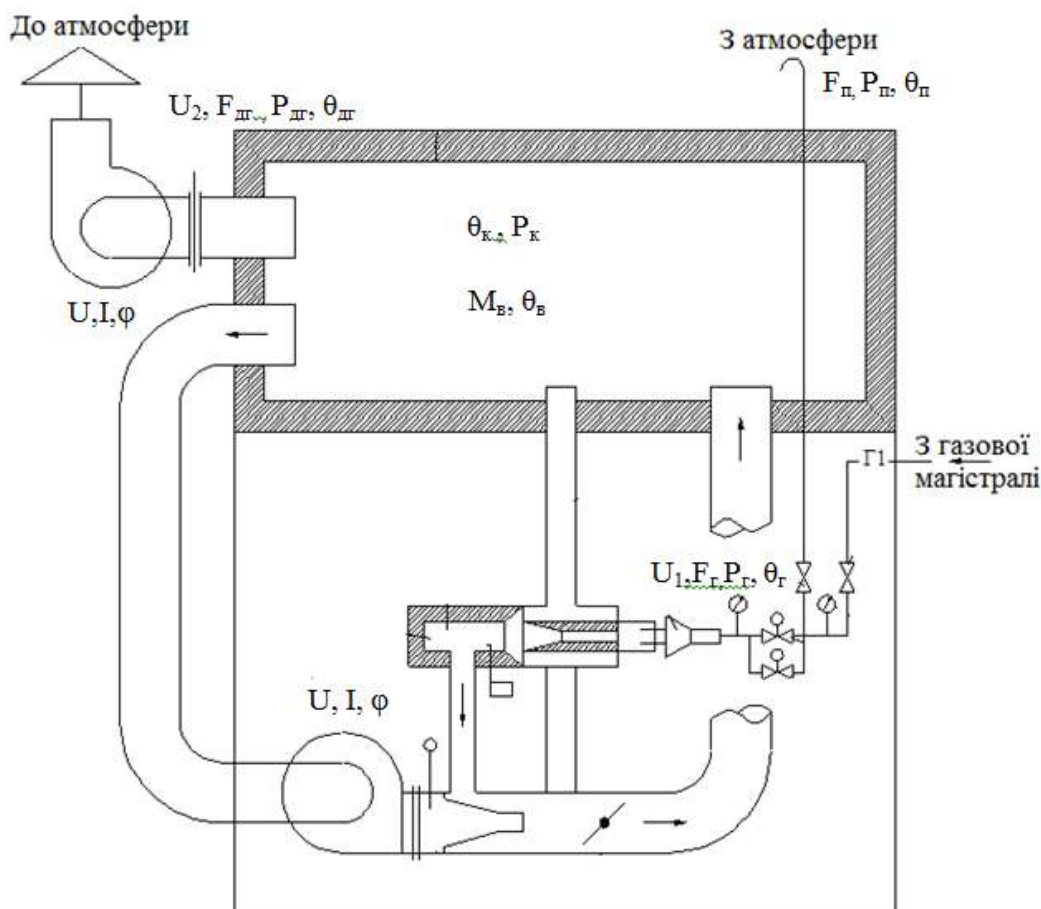


Рисунок 1. – Параметризована схема технологічного процесу теплової обробки ЗБВ

θ_v – температура ЗБВ;
 M_v – вологість ЗБВ;
 θ_k – температура в камері теплової обробки;
 P_k – розрідження в камері теплової обробки;
 F_r – витрати газу;
 P_r – тиск газу в магістралі;
 θ_r – температура газу;
 F_n – витрати повітря;

P_n – тиск повітря;
 θ_n – температура повітря;
 θ_{dg} – температура димових газів;
 P_{dg} – тиск димових газів;
 F_{dg} – витрати димових газів;
 U_1 – положення регулюючого органу (РО) подачі газу;
 U_2 – положення РО відводу димових газів;
 U, I, φ – напруга, струм, коефіцієнт потужності двигунів

Побудували параметричну схему процесу теплової обробки ЗБВ (рис. 2). До технологічного регламенту для технологічного процесу теплової обробки ЗБВ віднесли θ_k та P_k ; до експлуатаційного регламенту - струм двигунів I ; до техніко-економічного - F_r , F_{dg} , F_n , θ_r , θ_{dg} . До сировинних параметрів віднесли θ_v , M_v ; до енергетичних - P_r і P_{dg} ; до механічних або інших специфічних параметрів - U_1 , U_2 .

На якість ЗБВ істотно впливає надлишкова або недостатня температура та розрідження в камері теплової обробки. Недостатня температура в камері приводить до недоготовності виробів; надмірна температура загрожує пересиханню виробів, що веде до економічних збитків. Оскільки метою керування об'єктом є не допущення виходу за допустимі значення температури θ_k та розрідження P_k в камері теплової обробки, побудували 2-канальну САР перерахованих параметрів. Склали формалізовану координатну схему ОР (рис.3).

Проведено структурну та параметричну ідентифікацію камери теплової обробки, як ОК; розроблені моделі статистики та динаміки за каналами керування та моделі входних дій, проведена перевірка на відповідність отриманих моделей до експериментальних даних. Прямі та перехресні канали регулювання мають статичні властивості.

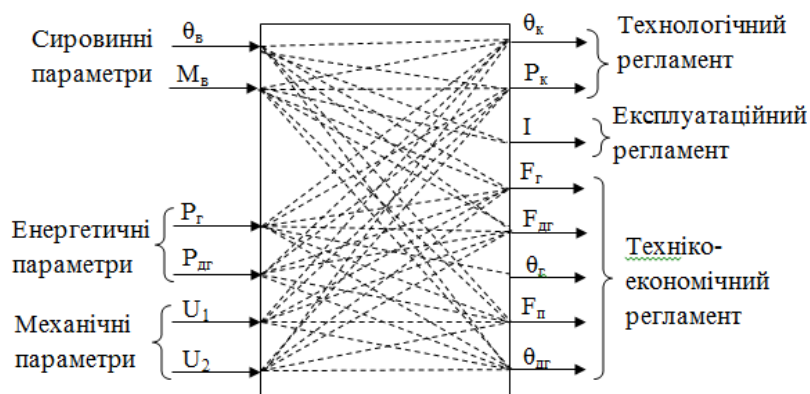


Рисунок 2. – Параметрична схема процесу теплової обробки залізобетонних виробів

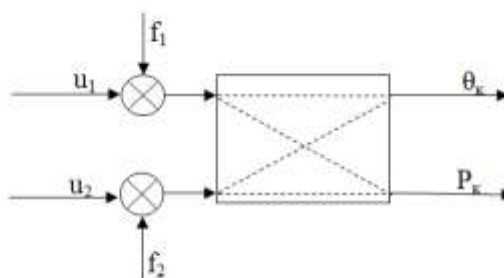


Рисунок 3. – Структурна схема процесу теплової обробки ЗБВ як ОК
 f_1, f_2 – вектори неконтрольованих збурень

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 через коригуючий зв'язок (рис. 4).

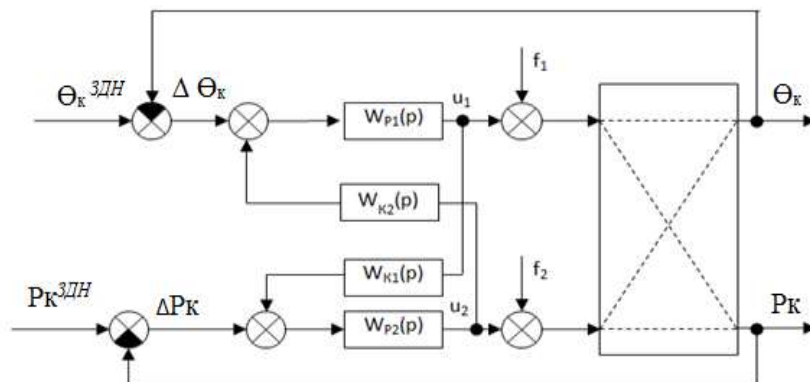


Рисунок 4. – Структурна схема двомірної САР підвищеної динамічної точності

$\Theta_k^{здн}$, $P_k^{здн}$ – задані значення температури та розрідження в камері теплової обробки відповідно;
 $\Delta\Theta_k$, ΔP_k – помилки регулювання температури та розрідження в камері теплової обробки відповідно;

$W_{p1}(p)$, $W_{p2}(p)$, $W_{k1}(p)$, $W_{k2}(p)$ – передаточні функції регуляторів та корегуючих зв'язків

Проведено порівняння перехідних процесів у САР базової структури і САР автономної (рис. 5, 6), (табл. 1).

Таблиця 1. - Порівняння показників якості роботи САР

Таблиця 1. Порівняння показників якості роботи САП					
Канали			$\Delta \Theta^{\max}$	$t_{\text{рег}}$	Критерій оптимальності
	Базова САП				141
„u1- θ_k ”			1.2	60	
„u2- P_k ”			1.2	50	
	Підвищеної динамічної точності САП				40,05
„u1- θ_k ”			0,18	45	
„u2- P_k ”			0,95	30	

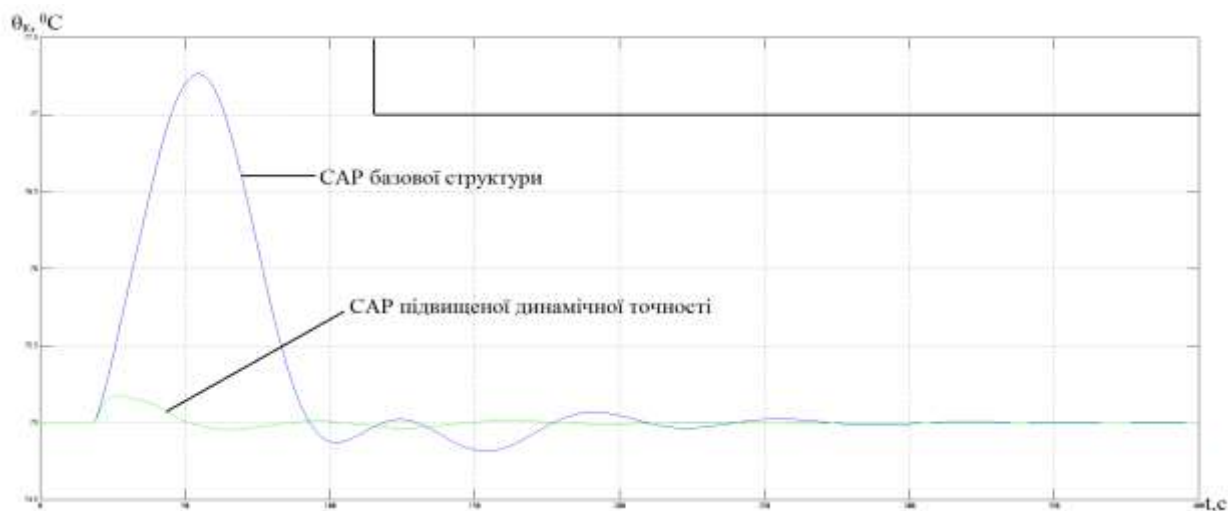


Рисунок 5. – Перехідні процеси базової САР і автономної САР за каналом „u1- Θ_k ”

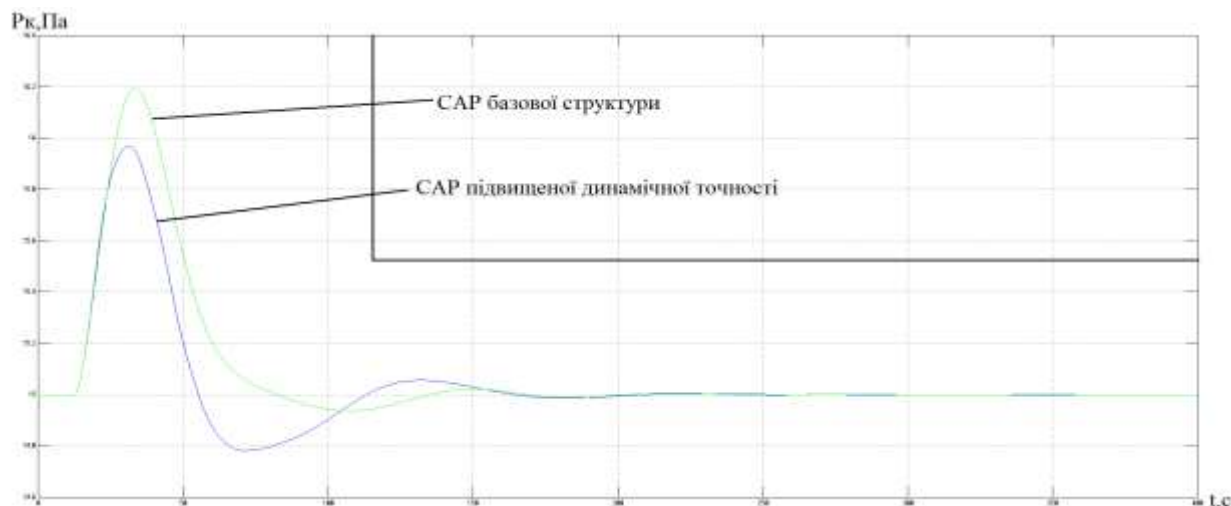


Рисунок 6. – Перехідні процеси базової САК і автономної САК за каналом „u2-Рк”

Введення коригуючих зв'язків підвищує динамічну точність і грубість САК, вона стала більш стійкою до змін параметрів ОУ. Було отримано цифрові аналоги алгоритмів регулювання.

Складено алгоритми функціонування та алгоритми пуску-зупинки для процесу теплової обробки ЗБВ, розроблена функціональна логічна схема.

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

Розроблено технічну структуру мікропроцесорного ядра системи керування на базі контролера фірми Siemens сімейства S7-300. У середовищі Simatic Manager Step7 створено проект і додано до його складу станцію контролера S7-300. У програмі «Hardware» виконано конфігурування обраного контролера і модулів УЗО.

Автоматизоване робоче місце оператора системи реалізується на базі панелі оператора MP377. Зв'язок панелі з контролером виконується по мережі MPI.

Розроблено програму, що реалізує алгоритми логічного керування та проведено їх тестування на моделі ОК. Конфігурування та програмування контролера Fastwel I/O фірми Fastwel здійснено у середовищі CodeSys.

В середовищі SCADA-системи WinCCFlexible розроблено програмне забезпечення АРМ оператора і наладчика САК камерою теплової обробки ЗБВ (рис. 7). Розглянуто приклад інтеграції з мережею контролерів SIMATIC S7-300.

Розроблено фрагменти документації ескізного проекту системи, а саме схема автоматизації, принципова електрична схема, принципові електричні схеми живлення, монтажна схема щита оператора, схема зовнішніх проводок.

Запропонована система автоматизації сприяє підвищенню безпеки праці при роботі. Здійснено попереднє обґрунтування економічності реалізації розробленої САК. Розглянутий варіант комплексу технічних засобів є інвестиційно привабливим, оскільки чистий грошовий потік за період реалізації проекту більше нуля і складає 38996,7 грн. В результаті автоматизації теплогенератора скорочується чисельність операторів, оскільки він оснащений багатофункціональною автоматикою, яка дозволяє присутність тільки одного оператора, проте вся камера теплової обробки знаходяться під постійним контролем диспетчерської служби. На комп'ютер чергового оператора, по кабельній лінії передаються всі необхідні параметри роботи теплогенератора, що підвищує економічність і безаварійність роботи установки. Встановлені прилади дають можливість більш точно контролювати витрату газу.

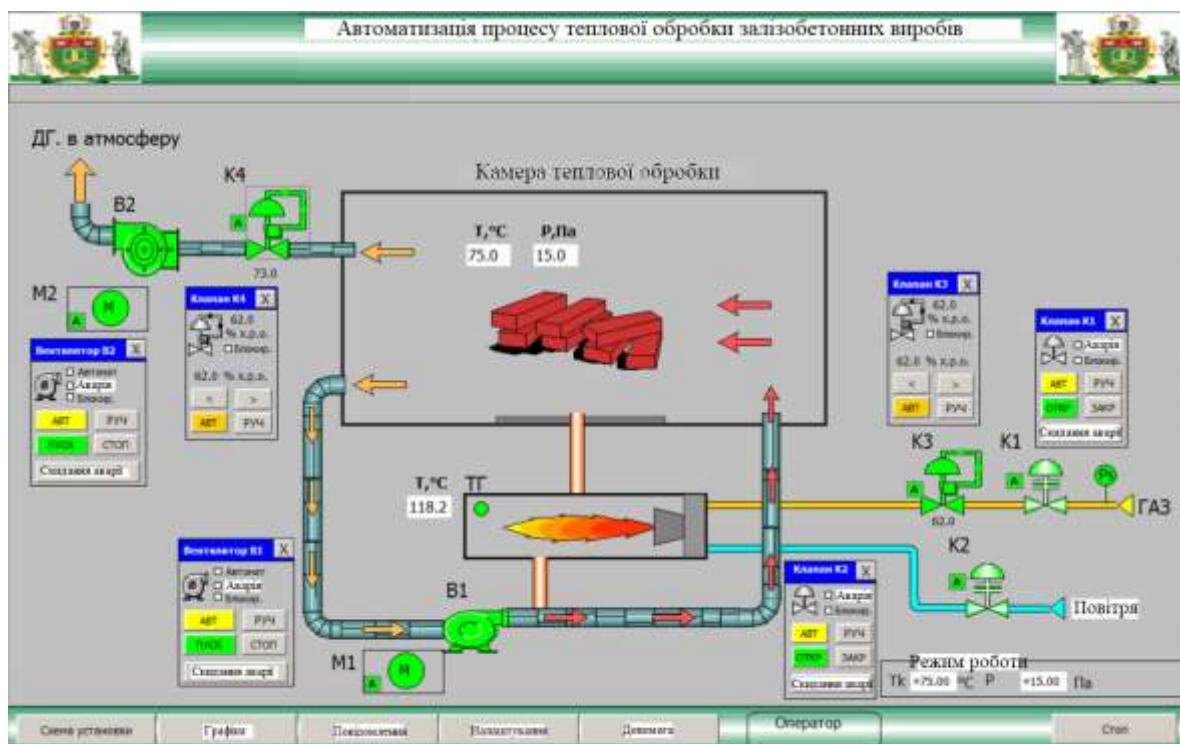


Рисунок 7. – Загальний вигляд екрану «Мнемосхема установки» при відкритих екранних формах керування двигунами і клапанами

Висновки

У ході дослідження розроблено САК процесу теплової обробки ЗБВ.

Як основний технологічний агрегат розглянуто камеру теплової обробки з теплогенератором ТОК-1А.

У результаті його вивчення визначені режими ведення технологічного процесу; проведено ідентифікацію каналів регулювання моделями першого та другого порядків, розроблено моделі координатних і параметричних збурень.

Розроблена математична модель ОУ є адекватною реальному об'єкту.

Виконаний оптимальний параметричний синтез САР базової структури і розроблені алгоритми автоматичного керування.

Розроблено САР підвищеної динамічної точності, яка показала кращі результати у порівнянні з САР базової структури.

Для реалізації алгоритмів логічного керування розроблено контролерно-комп'ютерну систему і відповідне програмне забезпечення.

Створено графічний інтерфейс для автоматизованого робочого місця оператора технолога і наладчика САК та фрагменти документації ескізного проекту системи автоматизації.

Розроблений комплекс заходів та вказівок для захисту персоналу при роботі на АРМ.

Список використаних джерел

1. Основи термодинаміки, теплотехніки та теплотехнічне обладнання: Ч.2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону [Електронний ресурс].- Рівне: НУВГП, 2010.- 230с. – URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/2268/1/104%20zah.pdf>
2. Проект заводу по виробництву блоків неавтоклавного газобетону [Електронний ресурс] / Офіційний сайт компанії ПП «Будпостач газобетон». – URL: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a177539-proekt-zavoda-proizvodstvu.html>
3. Савенко С. В., Гордійчук С. О., Крижанівська І. В. Автоматизована система управління процесом сушіння будівельних матеріалів [Електронний ресурс]. – URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/363.pdf>
4. Євсєєнко О. М., Ольшевський А. В., Лещенко В. М. Автоматизована система керування сушильною камерою періодичної дії [Електронний ресурс] / Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, 2022, № 2(90). – URL: <https://ten.ztu.edu.ua/article/view/268069>
5. Автоматизована система керування технологічним процесом сушіння цегли [Електронний ресурс] / Офіційний сайт компанії AQteck. – URL: <https://aqteck.ua/ua/projects/ask-tp-sushinnja-tsegly>
6. Пористий бетон: склад і властивості матеріалу, методика виробництва, область застосування і популярні виробники / Офіційний сайт компанії Бетон-ІнЮа. – URL: <https://1beton.in.ua/vydy-betonu/34-poristij-beton.html>

7. Корнаєв Д.І. Автоматизація процесу управління сушінням цементних блоків на підприємстві «Чорноморгідрозалізобетон (рукопис). – Одеса: ОНАХТ, 2019. – 202 с.

References

1. Osnovy termodynamiky, teplotekhniky ta teplotekhnichne obladnannia: Ch.2. Protsesy sushinnia, vypalu i plavlennia. Teplova obrobka vyrobiv z betonu i zalizobetonu [Elektronnyi resurs]. - Rivne: NUVHP, 2010.- 230s. – URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/2268/1/104%20zah.pdf>
2. Proekt zavodu po vyrobnytstvu blokiv neavtoklavnoho hazobetonu [Elektronnyi resurs] / Ofitsiinyi sait kompanii PP «Budpostach hazobeton». – URL: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a177539-proekt-zavoda-proizvodstvu.html>
3. Savenko S. V., Hordiichuk S. O., Kryzhanivska I. V. Avtomatyzovana systema upravlinnia protsesom sushinnia budivelnykh materialiv [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/363.pdf>
4. Yevseienko O. M., Olshevskiy A. V., Leshchenko V. M. Avtomatyzovana systema keruvannia sushylnoiu kameroiu periodychnoi dii [Elektronnyi resurs] / Avtomatyzatsiia, kompiuterno-intehrovani tekhnologii ta robototekhnika, 2022, № 2(90). – URL: <https://ten.ztu.edu.ua/article/view/268069>
5. Avtomatyzovana systema keruvannia tekhnolohichnym protsesom sushinnia tsehly [Elektronnyi resurs] / Ofitsiinyi sait kompanii AQteck. – URL: <https://aqteck.ua/ua/projects/ask-tp-sushinnja-tsegly>
6. Porystyi beton: sklad i vlastyvoli materialu, metodyka vyrobnytstva, oblast zastosuvannia i populiarni vyrobnyky / Ofitsiinyi sait kompanii Beton-InIua. – URL: <https://1beton.in.ua/vydy-betonu/34-poristij-beton.html>
7. Kornaiev D.I. Avtomatyzatsiia protsesu upravlinnia sushinniam tsementnykh blokiv na pidpriemstvi «Chornomorhidrozalizobeton (rukopys). – Одеса: ОНАКХТ, 2019. – 202 с.

Додаток В. Вихідний текст модулю ПІД регулятора

```

FUNCTION BLOCK FB1
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    SP: REAL;
    PV: REAL;
    K_P: REAL;
    K_I: REAL;
    K_D: REAL;
    K_N: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    U: REAL;
    dPV: REAL;
END_VAR
VAR
    Integrator_DSTATE: REAL;
    Filter_DSTATE: REAL;
    rth_Add: REAL;
    rth_Add2: REAL;
    rth_Product: REAL;
    rth_Product3: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:
        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<SI>/Integrator' *)
        Integrator_DSTATE := 0.0;

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

        (* Sum: '<SI>/Add1' incorporates:
        *   Input: '<Root>/PV'
        *   Input: '<Root>/SP' *)
        rth_Add2 := SP - PV;

        (* Product: '<SI>/Product1' incorporates:
        *   Input: '<Root>/K_P' *)
        rth_Product := rth_Add2 * K_P;

        (* Product: '<SI>/Product2' incorporates:
        *   DiscreteIntegrator: '<SI>/Filter'
        *   Input: '<Root>/K_D'
        *   Input: '<Root>/K_N'
        *   Product: '<SI>/Product1'
        *   Sum: '<SI>/Add1' *)
        rth_Product3 := ((rth_Product * K_D) - Filter_DSTATE) * K_N;

        (* Sum: '<SI>/Add' incorporates:
        *   DiscreteIntegrator: '<SI>/Integrator' *)
        rth_Add := (Integrator_DSTATE + rth_Product) + rth_Product3;

        (* Saturate: '<SI>/Saturation' *)
        IF rth_Add >= 100.0 THEN
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := 100.0;
        ELSIF rth_Add <= -100.0 THEN
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := rth_Add;
        ELSE
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := -100.0;
        END_IF;

        (* End of Saturate: '<SI>/Saturation' *)
        (* Output: '<Root>/dPV' *)
        dPV := rth_Add2;

        (* Update for DiscreteIntegrator: '<SI>/Integrator' incorporates:
        *   Update for Input: '<Root>/K_I'
        *   Product: '<SI>/Product2' *)
        Integrator_DSTATE := ((rth_Product * K_I) * 0.1) + Integrator_DSTATE;

        IF Integrator_DSTATE >= 100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := 100.0;
        ELSIF Integrator_DSTATE <= -100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := -100.0;
        END_IF;

        (* End of Update for DiscreteIntegrator: '<SI>/Integrator' *)
        (* Update for DiscreteIntegrator: '<SI>/Filter' *)
        Filter_DSTATE := (0.1 * rth_Product3) + Filter_DSTATE;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```