

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
швидкого охолодження виноматеріалу»

Здобувача О.Р. Мельника
(прізвище, ініціали)

ІІ курсу АМ-20 групи

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

Консультанти:
доц. О.О. Гурський
(посада, прізвище та ініціали)

(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 04 червня 2026 р., протокол № 7

Завідувач(ка) кафедри АТЕіРС _____
(назва кафедри) (підпис) Підпис

О.М. Жигайло
(ПІБ)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	<u>Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування</u>
Кафедра	<u>ім. П.М. Платонова</u> <u>Автоматизації технологічних електромеханічних 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. Світій

« 05 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач Мельник Олександр Романович

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу»

2. Керівник кваліфікаційної роботи Левінський Валерій Михайлович, доцент.

Пункти 1 і 2 затверджені наказом ОНТУ № 39-09 від 24.01. 2025 р.

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

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

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

Вступ

Розділ 1. Технологічний процес швидкого охолодження виноматеріалу, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Розділ 2. Удосконалення САР на основі цілеспрямованого удосконалення її структури висновки за розділом.

Розділ 3. Удосконалення САР на основі застосування штучних нейронних мереж (обґрунтування доцільності САР і ШНМ, розробка структури її нейрорегуляторів (НР); навчання ШНМ НР; висновки за розділом)

Розділ 4. Удосконалення САР на основі розширення складу функцій управління (актуальність включення до САР нових функцій: оптимізації, гарантування, активного або пасивного самоналаштування, розробка і моделювання САК, підтвердження ефективності її застосування, висновки за розділом).

Розділ 5. Реалізація алгоритмів керування розробленої САК на контролері, їх тестування та підготовка до впровадження (на підприємстві, де проходила практика, вказати)

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

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Назва розділу	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Удосконалення САР на основі застосування штучних нейронних мереж	Гурський О.О. к.т.н. доцент каф. АТПіРС		
Удосконалення САР на основі розширення складу функцій управління	Жигайло О.М. к.т.н., доцент каф. АТПіРС		
Реалізація алгоритмів керування розробленої САК на контролері, їх тестування та підготовка до впровадження	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.	
Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування	«27» березня 2026 р.	
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП	«06» квітня 2026 р.	
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	«17» квітня 2026 р.	
Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	«20» травня 2026 р.	
Реалізація та підготовка до впровадження результатів роботи	«29» травня 2026 р.	
Оформлення додатків та роботи в цілому	«01» червня 2026 р.	
Задача роботи на перевірку керівникові, виправлення зауважень, підпис керівника	«05» червня 2026 р.	
Брошування роботи, представлення її завідувачу кафедри, підпис, направлення роботи на зовнішнє рецензування та захист у ЕК	«12» червня 2026 р.	

Здобувач _____ Мельник О.Р.
ПІБ Підпис, датаКерівник роботи _____ Левінський В.М.
ПІБ Підпис, дата

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

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

Здобувач _____ Мельник О.Р.
Прізвище, ініціали Підпис

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра Мельника Олександра Романовича «Підвищення ефективності автоматичного керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу» викладена на 169 сторінках, кількість таблиць 9, рисунків – 128, додатків - 5, джерел з переліку посилань - 31.

Основна мета цієї роботи є підвищення ефективності процесу керування швидким охолодженням виноматеріалу, які досягаються за рахунок підвищення динамічної точності контурів САР та зниження числа аварійних ситуацій. Логіку керування вдосконалено шляхом підвищення динамічної точності алгоритмів регулювання, на основі пропорційно-інтегрально-диференційного алгоритму, що забезпечуватиме якість готової продукції та ефективність роботи установки. Підвищення динамічної точності системи здійснювалося через впровадження САР інваріантної до контрольованих збурень, подальше вдосконалення системи та підвищення її ефективності проводилося шляхом дослідження доцільності використання системи гарантуючого управління. Дослідження доцільності показали, що саме використання алгоритмів гарантуючого управління має дати підвищення ефективності процесу швидкого охолодження виноматеріалу за рахунок гарантування зниження браку готової продукції та підвищення енергоощадності процесу. Перевірка працездатності САР проводилася шляхом аналізу дотримання гранично припустимих вимог та перевірки САР на грубість. Ключові слова: автоматизація, об'єкт керування, система автоматичного керування, імітаційне моделювання, оптимальний параметричний синтез, система гарантуючого керування, контрольовані збурення.

ЗМІСТ

Назви розділів, підрозділів	Стор.
Вступ	9
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ШВИДКОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ВИНМАТЕРІАЛУ, ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.	15
1.1. Короткий опис ТП швидкого охолодження виноматеріалу на основі розвитку її алгоритмічної і функціональної структури та основного обладнання.	15
1.2. Аналіз впливу режимів ведення ТП та роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів та наслідків їх порушень.	16
1.3. Аналіз існуючих САК ТП швидкого охолодження виноматеріалу на основі розвитку її алгоритмічної і функціональної структури математичні моделі процесу як об'єкта управління, функції, структури та алгоритми САК.	20
1.4. Комплекс математичних моделей ТП швидкого охолодження виноматеріалу на основі розвитку її алгоритмічної і функціональної структури як об'єкта регулювання, їх реалізація у формі імітаційних моделей та результати тестування моделей.	22
1.5. Типові структура та алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, результати їхньої параметричної оптимізації та перевірки на робастність (грубість).	30
1.6. Висновки за розділом	35
РОЗДІЛ 2. Удосконалення САР на основі цілеспрямованого удосконалення її структури.	36
2.1. Специфічні особливості ОР та обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення їх динамічної точності.	36
2.2. Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.	36
2.3. Оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності та аналіз результатів синтезу.	39
2.4. Висновки за розділом.	43

РОЗДІЛ 3. Удосконалення САР на основі застосування штучних нейронних мереж.	44
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління, побудованих на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого об'єкта керування.	44
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання розглянутого об'єкта керування який характеризується нелінійною статичною характеристикою.	45
3.3 Параметричний синтез САР з традиційним ПІД регулятором для об'єкта який характеризується нелінійною характеристикою каналу регулювання.	47
3.4 Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.	52
3.5 Порівняльний аналіз функціонування САР з традиційним ПІД регулятором і САР з нечітким регулятором.	64
3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління.	71
3.7 Розробка моделі САР з нелінійними перетворюючими на основі штучних нейронних мереж.	74
3.8 Синтез моделі САР з нейрорегулятором як з альтернативним варіантом алгоритма управління.	87
3.9 Параметрична оптимізація САР з нейрорегулятором .	105
3.10 Аналіз функціонування різних САР за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють.	110
3. 11 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.	113
3.12 Висновки за розділом.	121
Розділ 4. Удосконалення САР на основі розширення складу функцій управління.	122
4.1. Обґрунтування актуальності додаткової функції САК для підвищення якості готового продукту.	122

4.2. Вибір та опис принципу реалізації функції гарантування якості готового продукту при дотриманні обмежень.	123
4.3. Розробка структурної схеми САК підвищення якості готового продукту, формалізація алгоритму керування, обґрунтування значень їх настроювальних параметрів.	126
4.4. Розробка схеми імітаційного моделювання САК та плану комп'ютерних експериментів з дослідження її ефективності, представлення та аналіз результатів моделювання.	128
4.5 висновки за розділом.	140
Розділ 5 Реалізація алгоритмів керування розробленої САК на контролері, їх тестування та підготовка до впровадження.	141
5.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми керування процесом охолодження виноматеріалу і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.	141
5.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування.	149
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.	163
5.4 Висновки за розділом.	164
Висновки	165
Література	167
Додаток А	171
Додаток Б	171
Додаток В	172
Додаток Г	172
Додаток Д	173

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ

ОК – об'єкт керування;

АК – алгоритм керування;

САК – система автоматичного керування;

ОПС – оптимальний параметричний синтез;

ЗНВ – зона незначних відхилень;

СКЗ – спрощений коригуючий зв'язок;

ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом;

ТП – технологічний процес;

СГК – система гарантуючого керування;

ВСТУП

Сучасний розвиток харчової промисловості спрямований на задоволення потреб суспільства та підвищення рівня продовольчої безпеки. Цей підхід виявляється у висуванні високих вимог до якості та безпеки продукції, а також до стабільності технологічного процесу. Досягнення цих вимог забезпечується за рахунок комплексного впровадження методів технологічного контролю та автоматизації.

Одним із ключових етапів у виробництві вина є стабілізація виноматеріалу, що здійснюється шляхом його швидкого охолодження. Цей процес сприяє оздоровленню вина, подовженню терміну його зберігання та гарантує безпечність для споживача. Стабілізація виноматеріалу проводиться на відповідних підприємствах, однак її можливо реалізувати і на малих виробництвах, зокрема із застосуванням відповідних технологій у домашніх умовах.

Незалежно від масштабу підприємства, актуальними залишаються завдання щодо зниження енергоємності виробництва, мінімізації втрат і підвищення якості готової продукції.

Актуальність теми. Підвищення енергоефективності та зменшення енергоспоживання відповідних технологічних процесів є важливим завданням, реалізація якого сприяє зміцненню енергетичної та фінансової безпеки підприємства. Це, своєю чергою, створює умови для комплексного скорочення фінансових, енергетичних, трудових ресурсів і часових витрат, що набуває особливого значення в умовах триваючих воєнних дій на території України та актуальної потреби промисловості та підприємств у максимальному зниженні витрат без погіршення якості та обсягів виробництва (зокрема вина).

На сьогодні в харчовій промисловості зростає значення розробки та впровадження новітніх технологій, які дозволяють не лише отримувати продукцію високої якості, а й зменшувати енерговитрати на її виробництво. Одним із напрямів такої діяльності є посилення технічного, технологічного, промислового та інноваційного потенціалу українських підприємств, що в підсумку підвищує їхню конкурентоспроможність в умовах сучасних викликів.

На основі аналізу літературних джерел, присвячених процесу стабілізації вина, можна зробити висновок, що в наявних системах керування відсутні функції, які б забезпечували підвищення технічних та економічних показників цього процесу в умовах дії нестационарних координатних і параметричних збурень. Існуючі системи можуть виявитися неефективними у контексті зменшення питомих енерговитрат на стабілізацію, зокрема шляхом підтримання температурного режиму охолодження в межах допустимих норм без їх порушення.

Таким чином, традиційні системи керування процесом стабілізації мають низку недоліків, серед яких — обмежена точність і повільна реакція на зовнішні збурення. Вдосконалення систем автоматичного управління стабілізації вина має бути в першу чергу спрямоване на зниження питомих витрат теплової енергії шляхом реалізації функції гарантуючого керування температурними параметрами. Впровадження таких систем, що утримують температурні характеристики процесу на межі нижніх допустимих значень, є актуальним завданням для підвищення загальної ефективності виноробного виробництва.

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», а також напрямку наукової школи ОНТУ: «Моделювання та оптимальне керування

технологічними процесами зберігання та переробки сільськогосподарської сировини».

Мета і задачі дослідження. Розробка САК технологічного процесу швидкого охолодження виноматеріалу, що забезпечує зниження питомих енерговитрат при реалізації процесу, за рахунок застосування передових, інтелектуальних алгоритмів керування.

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

- провести аналіз існуючих систем керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу;
- розробити САК підвищеної динамічної точності з реалізацією функції гарантуючого керування процесами;
- розробити САК з використанням нейронного регулятора та САК з регулятором нечіткої логіки;
- провести порівняльний аналіз ефективності розроблених САК шляхом їх імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження: Системи керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу.

Предмет дослідження: Моделі та алгоритми системи автоматичного керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу.

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

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше обґрунтовано:

- застосування нейронного керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу;
- застосування методу перетворення нечіткого регулятора на нейронний алгоритм керування швидким охолодженням виноматеріалу;
- загальну концепцію побудови системи гарантуючого керування швидким охолодженням виноматеріалу;

- загальну концепцію побудови САК на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж;
- загальну концепцію побудови САК підвищеної динамічної точності для процесу швидкого охолодження виноматеріалу;
- доцільність аналізу процесу швидкого охолодження виноматеріалу;
- умови безпечної експлуатації системи;
- вибір технічних засобів, які забезпечують належне керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу;
- вибір промислового контролеру та його блоків вводу\виводу для керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу.

Вперше розроблено:

- структуру та імітаційну модель системи гарантуючого керування швидким охолодженням виноматеріалу;
- алгоритми керування САК процесом швидкого охолодження виноматеріалу на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж;
- комплекс моделей процесу швидкого охолодження виноматеріалу як об'єкту регулювання;
- варіанти алгоритмів регулювання базової структури та підвищеної динамічної точності для САК процесом швидкого охолодження виноматеріалу;
- регламент функціонування та алгоритми пуску та зупинки САК процесом швидкого охолодження виноматеріалу;
- технічну структуру мікропроцесорного ядра системи керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу;
- програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання в середовищі CoDeSys для САК процесом швидкого охолодження виноматеріалу;
- системи керування за допомогою середовища WinCCFlexible, програмне забезпечення АРМ оператора и наладчика САК процесом швидкого охолодження виноматеріалу;

– комплект технічної документації САК.

Практичне значення отриманих результатів. Матеріали досліджень можуть бути використані у майбутніх дослідженнях, присвячених автоматизації процесу охолодження виноматеріалу і в цілому автоматичному керуванню процесом стабілізації винної продукції.

Отримані результати можуть знайти практичне застосування на підприємствах виноробної та інших галузей харчової промисловості з метою підвищення ефективності процесу охолодження виноматеріалу. Удосконалені алгоритми керування, побудовані на базі штучних нейронних мереж та принципів гарантуючого регулювання температури в межах нижніх допустимих значень, дозволяють значно знизити енерговитрати та забезпечити стабільність процесу охолодження.

Це, у свою чергу, створює умови для зменшення виробничих витрат, покращення якості та безпеки готової продукції, а також забезпечує більш раціональне використання ресурсів. У глобальному розумінні, така модернізація сприяє підвищенню рівня продукції, що виготовляється, зниженню енергетичних і економічних витрат, стабілізації цін, а також покращенню конкурентоспроможності українських виноробних підприємств як на внутрішньому, так і на зовнішніх ринках.

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

Апробація роботи. Наукова конференція здобувачів вищої освіти. Секція «Автоматизації технологічних та бізнес-процесів» (25 – 28 березня 2025 р.).

Публікації матеріалів дослідної роботи. Складено комплект документів для подачі заявки на одержання патенту на корисну модель «Спосіб автоматичного керування швидким охолодженням виноматеріалу» (2024р.); складено науково-технічну статтю за вимогами журналу ОНТУ «Автоматизації технологічних та бізнес-процесів» на тему «Автоматизація швидкого охолодження виноматеріалу».

Структура і обсяг роботи. Магістерська випускна робота складається з 5 глав, 31 параграфів, 5 додатків, загальним обсягом 169 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ШВИДКОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ВІНОМАТЕРІАЛУ, ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.

1.1. Короткий опис ТП швидкого охолодження виноматеріалу на основі розвитку її алгоритмічної і функціональної структури та основного обладнання

Суть технологічного процесу охолодження виноматеріалу полягає в осадженні надлишку розчинених в ньому виннокислих солей під впливом охолоджувального розсолу (холодоагенту). Технологічний процес реалізується в трубчастому теплообміннику.

Технологічна схема ділянки процесу наведена на Рис. 1.

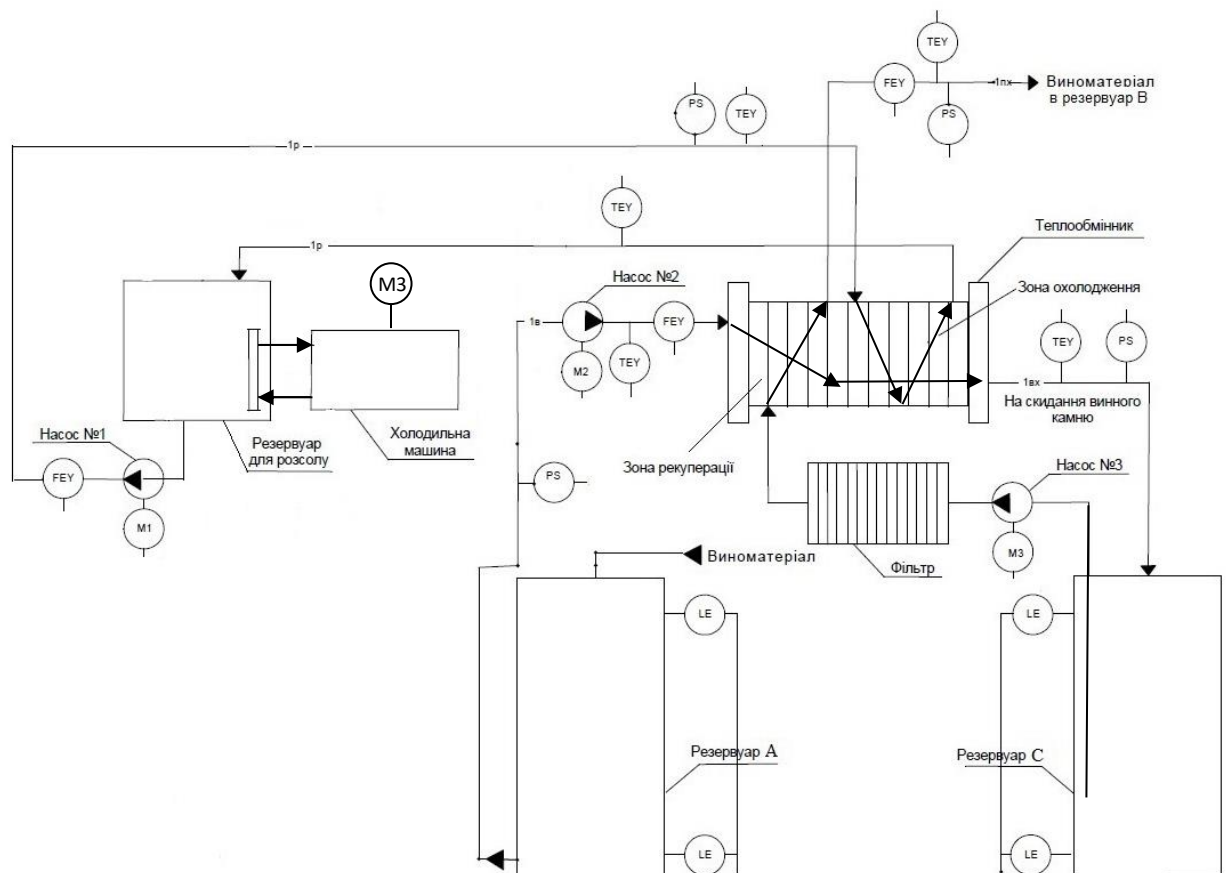


Рис. 1. – Технологічна схема ділянки процесу охолодження виноматеріалу

Виноматеріал, оброблений коагулянтном, з резервуару А насосом подається у внутрішню трубу теплообмінника, тут воно зустрічається з профільтрованим вином з холодильного резервуару С, яке проходить у зовнішній трубі. Далі вино потрапляє в охолоджувач, в якому у зовнішній трубі проходить охолоджувальний розсіл. Тут вино охолоджується до необхідної температури, після чого надходить в резервуар С, де випадає осад винного каменю. Оброблене холодом вино насосом подається на фільтр, з якого, пройшовши теплообмінник, воно надходить резервуар В. Коли температура вина підвищиться приблизно до 10-12 °С, його перекачують насосом в підвал для подальшого зберігання.

1.2. Аналіз впливу режимів ведення ТП та роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів та наслідків їх порушень.

В даному підрозділі розглядається технологічна схема яка є графічним відображенням руху і перетворення матеріальних та енергетичних потоків. Кожен потік і процес перетворення його механічних, фізичних, хімічних і біологічних властивостей характеризується набором параметрів, які відображають їх властивості а також умови перетворення потоків, тому проведемо параметризацію технологічної схеми, результати параметризації наведені на Рис. 1.1.

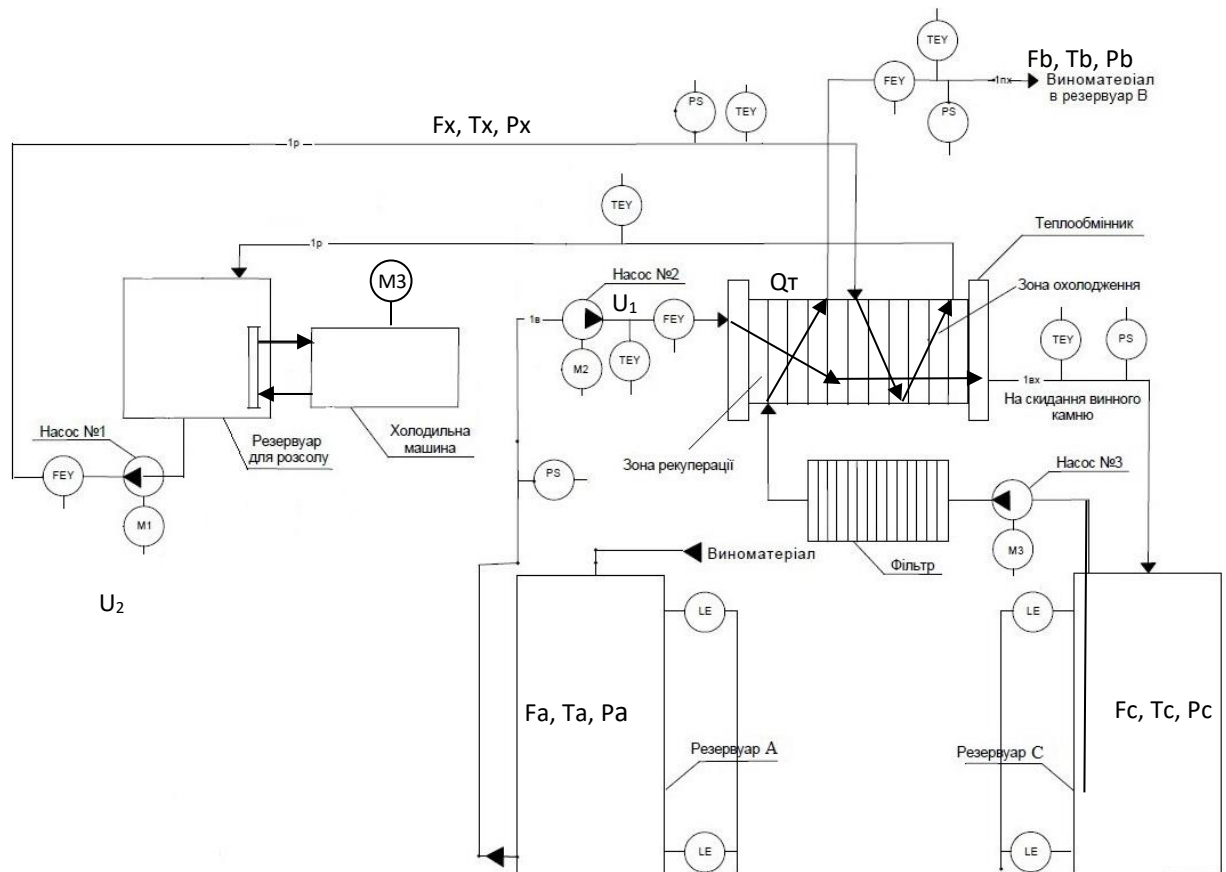


Рис. 1.1 – Параметризована технологічна схема ділянки процесу охолодження виноматеріалу

Позначення на параметризованій технологічній схемі:

F_a, T_a, P_a – витрати, температура і тиск виноматеріалу з резервуару А;

F_b, T_b, P_b – витрати, температура і тиск виноматеріалу в резервуар В;

F_c, T_c, P_c – витрати, температура і тиск виноматеріалу з резервуару С;

F_x, T_x, P_x – витрати, температура і тиск холодоагенту;

Q_T – теплопередача теплообмінника;

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

Основу нормативів складають три основні регламенти:

Технологічний регламент - для процесу охолодження вина таким параметром є: T_c – температура вина в охолоджувальному резервуарі С.

Експлуатаційний регламент - для процесу охолодження вина таким параметром є: T_x – температура холодоагенту на вході в теплообмінник.

Техніко-економічний та екологічний регламент, до цих груп параметрів можна віднести: F_x / F_v – відносні витрати холодоагенту і виноматеріалу; I / F_v – відносний струм навантаження ПЕД.

Допуски на відхилення поточних (режимних) значень регламентованих параметрів від номінальних поділяють і задають у вигляді тривалих і короткочасних допусків на відхилення.

Аналіз нормативів ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання оформимо у вигляді таблиці регламентів 1.

Таблиця 1. – Таблиця регламентів

№	Найменування параметрів	Познач.	Одиниц виміру	Номінальне значення	Допустимі відхилення від номіналу		
					Тривалі	Короткочасні	Час, с
1	Температура вина в охолоджувальному резервуарі	T_c	°C	-5	$\pm 0,5$	$\pm 1,5$	150
2	Температура холодоагенту на вході в теплообмінник	T_x	°C	-15	$\pm 0,5$	$\pm 1,5$	60

Формалізація опису взаємозв'язків між параметрами ТП досягається за рахунок переходу від параметризованої до параметричної схеми ТП.

Сировинні параметри до цієї групи параметрів віднесемо: F_a – витрати виноматеріалу; T_a – температура виноматеріалу; P_a - тиск виноматеріалу після насоса №2 .

Енергетичні параметри до цієї групи параметрів віднесемо: F_x , T_x , P_x – витрати, температура і тиск холодоагенту; U, I – напруга і струм живлення двигунів електроприводу.

Механічні параметри до цієї групи параметрів віднесемо: Q_T – теплопередача теплообмінника.

Параметрична схема процесу охолодження виноматеріалу наведена на рис. 1.2.

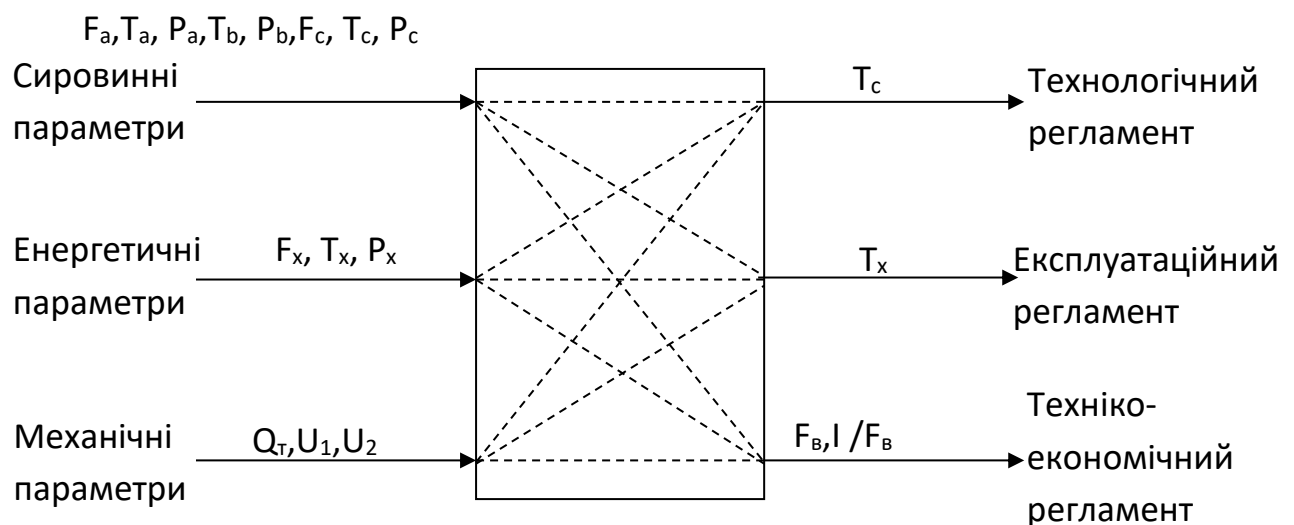


Рис. 1.2 – Параметрична схема процесу охолодження виноматеріалу

До регульованих координат процесу охолодження вина можна віднести температуру вина в охолоджувальному резервуарі T_c та температуру холодоагенту на виході із холодильної машини T_x .

До управляючих впливів доцільно віднести частоту обертання насосу U_1 , що змінює витрати F_a виноматеріалу з резервуару А, та частоту обертання насосу U_2 , що змінює витрати холодоагенту F_x .

Для підвищення динамічної точності регулювання температури вина в охолоджувальному резервуарі T_c , доцільно розглянути перехресний канал впливу частоту обертання насосу U_2 на температуру вина.

Всі інші вхідні змінні потрапляють у розряд неконтрольованих збурень, детерміновану складову збурення адитивно прикладемо до керуючої дії, а стохастичну - до керованої змінної.

Структурна схема процесу охолодження виноматеріалу наведена на рис. 1.3.

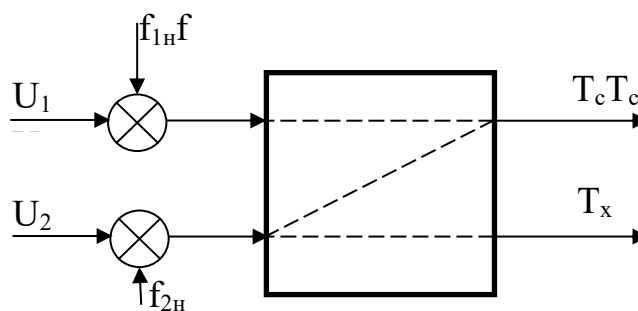


Рис. 1.3 – Структурна схема процесу охолодження виноматеріалу як об'єкту регулювання.

1.3. Аналіз існуючих САК ТП швидкого охолодження виноматеріалу на основі розвитку її алгоритмічної і функціональної структури математичні моделі процесу як об'єкта управління, функції, структури та алгоритми САК .

Оскільки питання автоматизації швидкого охолодження виноматеріалу є актуальним завданням, багато дослідників приділяли йому свою увагу. Так компанія Milesta запропонувала спосіб охолодження виноматеріалу, який містить регулювання температури продукту в ході технологічного процесу [1]. Інші дослідники розробили спосіб охолодження виноматеріалу, який містить автоматизацію контролю, регулювання й запису температури виноматеріалу та положення перемикачів [2]. Компанія MagnumBeer запропонувала спосіб

охолодження виноматеріалу, який містить повільне регулювання температури виноматеріалу [3]. Компанія «Холодкомплект» розробила спосіб охолодження молока, який містить підтримку заданої температури продукту в танку [4]. Компанія Vinograd.info розробила спосіб охолодження виноматеріалу, який містить регулювання температури виноматеріалу шляхом зміни частоти обертання насосу, що змінює його витрати, а також регулювання температури холодоагенту шляхом зміни частоти обертання насосу, що змінює його витрати [5]. Недоліком розглянутих рішень є недостатня якість готового продукту через відсутність регулювання температури холодоагенту. Інтернет-магазин «Домашній виноградник» пропонує стабілізацію температури охолодження виноматеріалу [6]. Компанія Enogrup пропонує використання економічних автоматичних установок обробки холодом у потоці під час виробництва великих обсягів виноматеріалів [7]. Компанія Техно-Т пропонує керування охолодженням виноматеріалу в теплообміннику [8]. Компанія Inprom пропонує систему керування охолодженням виноматеріалу при термовініфікації [9]. Компанія Агровектор пропонує керування ультраохолодженням виноматеріалу при прискореній обробці вин [10].

Недоліком розглянутих рішень є низька енергоефективність та недостатня якість готового продукту в результаті недостатньої динамічної точності, а також швидкості руху холодоагенту по циркуляційному контуру і як наслідок відкладання винного каменю.

В Одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем запропоновано ефективну систему автоматичного керування швидким охолодженням виноматеріалу, яка забезпечує високу динамічну точність регулювання шляхом реалізації принципу автономного керування [11].

1.4. Комплекс математичних моделей ТП швидкого охолодження виноматеріалу на основі розвитку її алгоритмічної і функціональної структури як об'єкта регулювання, їх реалізація у формі імітаційних моделей та результати тестування моделей

У цьому підрозділі роботи, в пакеті Simulink середовища Матлаб для каналів « $u_2 - T_x$ », « $u_1 - T_c$ » і « $u_2 - T_c$ » ОК розробляється схема моделювання як для моделей 1-го, так і для моделей 2-го порядку.

Передаточні функції моделей 1-го та 2-го порядків ОК приведені на таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Передаточні функції моделей моделей каналів

Канал ОК	Модель 1-го порядку	Модель 2-го порядку
« $U_1 - T_c$ »	$W_{U_1-T_c}^o(p) = \frac{0.15 \cdot e^{-44,6p}}{37,8p + 1}$	$W_{U_1-T_c}^o(p) = \frac{0,15 \cdot e^{-25p}}{(27p + 1)^2}$
« $U_2 - T_x$ »	$W_{U_2-T_x}^o(p) = \frac{0,2 \cdot e^{-20p}}{13,2p + 1}$	$W_{U_2-T_x}^o(p) = \frac{0,2 \cdot e^{-12,8p}}{(9,6p + 1)^2}$
« $U_2 - T_c$ »	$W_{U_2-T_c}^o(p) = \frac{0.1 \cdot e^{-70,1p}}{56,6p + 1}$	$W_{U_2-T_c}^o(p) = \frac{0,1 \cdot e^{-41,5p}}{(40,2p + 1)^2}$
$T_x = 0,2 \cdot u_1 - 27$		$T_c = 0,15 \cdot u_1 + 0,1 \cdot u_2 + 10$

Використовуючи передаточні функції моделей 1-го та 2-го порядку каналів, отримуємо результати моделювання динаміки та статички для кожного каналу моделювання для подальшого їх порівняння з експериментальними даними.

Для каналу « $U_1 - T_c$ »

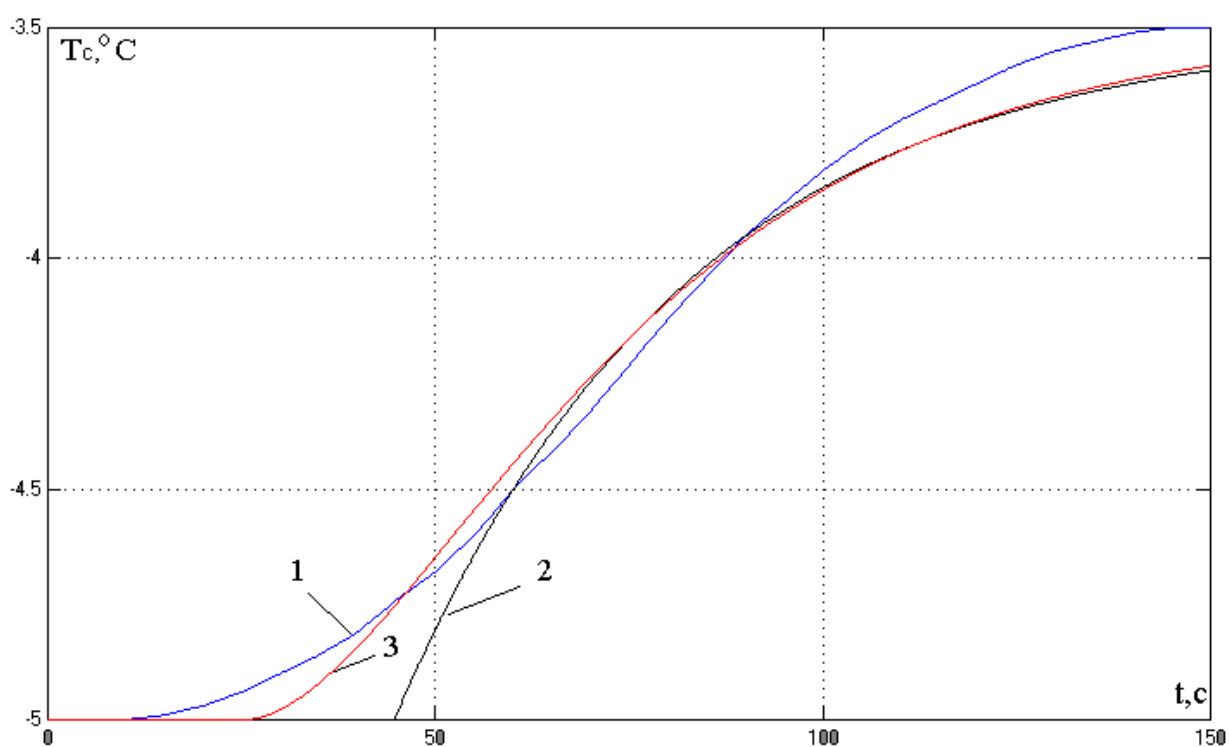


Рис. 1.4 – Результати моделювання ОК по каналу « $U_1 - T_c$ »

1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних;

2 – модель 1-го порядку;

3 – модель 2-го порядку.

Для каналу « $U_2 - T_x$ »

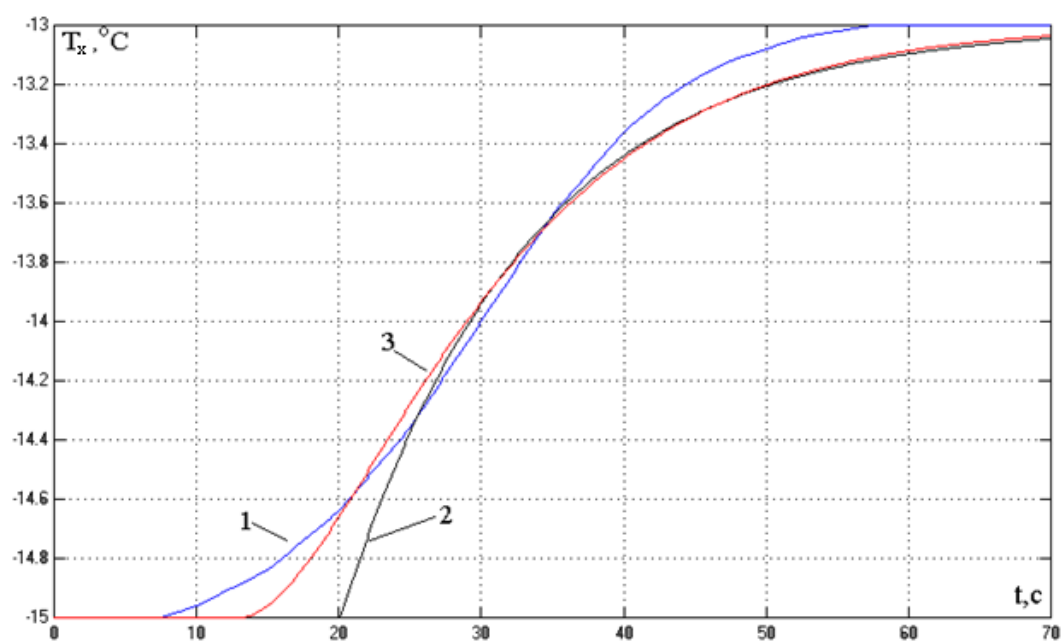


Рис. 1.5 – Результати моделювання ОК по каналу « $U_2 - T_x$ »

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

Для каналу « $U_2 - T_c$ »

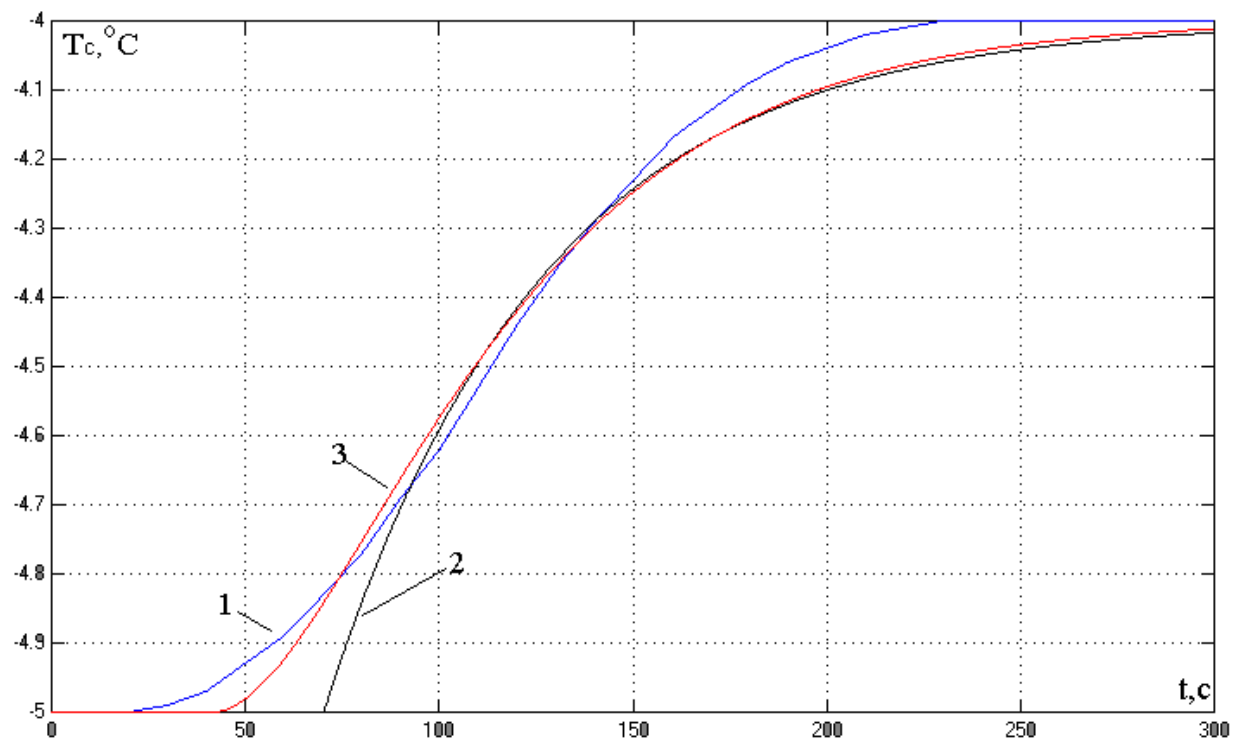


Рис. 1.6 – Результати моделювання ОК по каналу « $U_2 - T_c$ »

1 – кусочно-лінійна апроксимація експериментальних даних;

2 – модель 1-го порядку;

3 – модель 2-го порядку.

Як видно з Рис. 1.4, 1.5, 1.6, моделі ОК як 1-го, так і 2-го порядків досить точно описують експериментальні дані, але модель 2-го порядку точніша.

Моделі статичної характеристики:

$$T_c = 0,15 \cdot u_1 + 0,1 \cdot u_2 + 10$$

$$T_x = 0,2 \cdot u_2 - 27$$

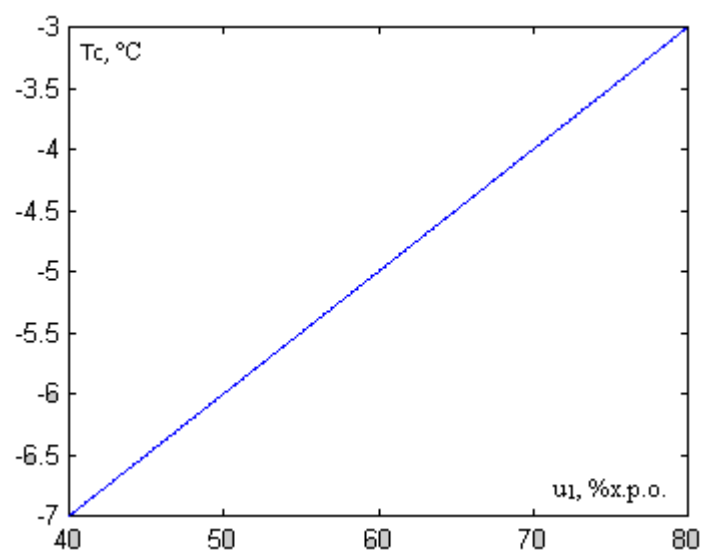
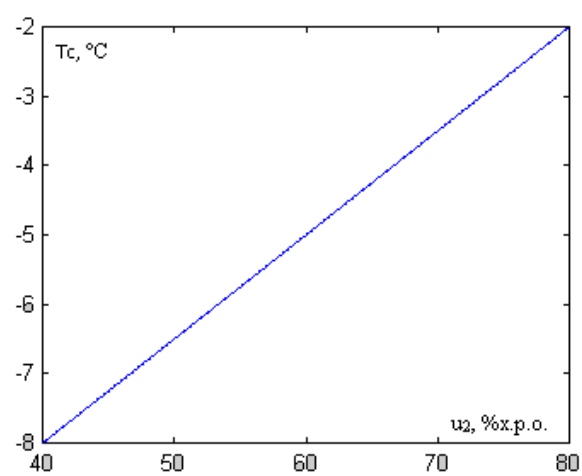
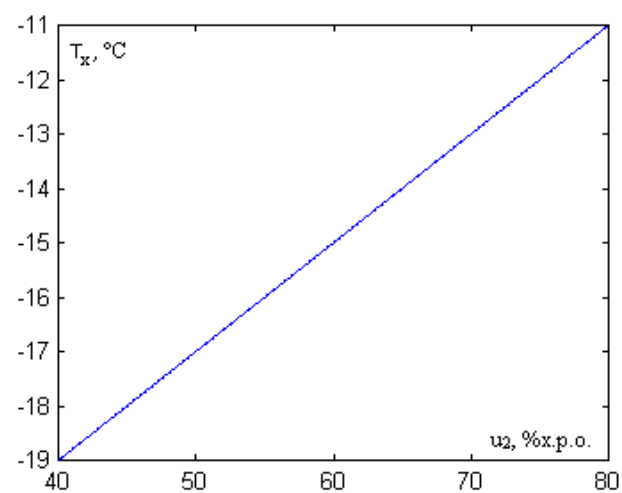


Рис. 1.7 – Результати моделювання статичної характеристики ОК

Для відтворення моделі збурень як стохастичних процесів (СП) із заданими властивостями будемо використовувати метод формуючому фільтру. Його можна представити у вигляді такої структурної схеми моделювання

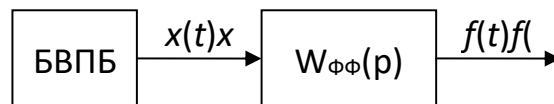


Рис. 1.8 – Структурна схема моделі СП

Для відтворення моделі стохастичного процесу із заданими властивостями спочатку треба визначити передаточну функцію формуючого фільтра $W_{ff}(p)$.

Вихідна передатна функція формуючого фільтра

$$W_{ff}(p) = \frac{1,5}{192,3^2 p^2 + 2 \cdot 192,3 \cdot 0,43p + 1} = \frac{1,5}{36979,3p^2 + 165,4p + 1}$$

Сигнал неконтрольованих збурень

Повинен відповідати таким статистичним параметрам:

$$\hat{M}_f = -4,976$$

$$\hat{\sigma}_f = 0,2374$$

$$\hat{a}_f = 0,002225$$

$$\hat{\beta}_f = 0,0047$$

Схема моделювання буде мати вигляд, наведений на рис. 1.9.

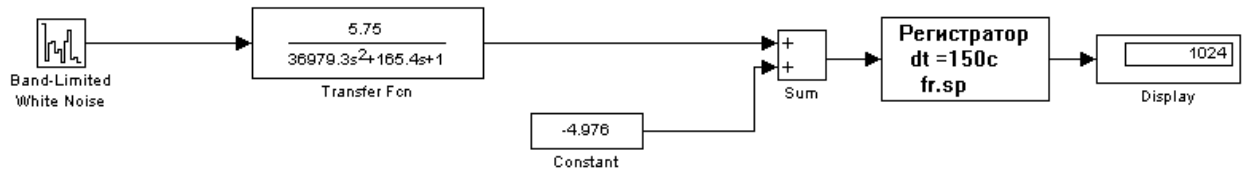


Рис. 1.9 – Схема моделювання неконтрольованих збурень із формуючим фільтром, що має розрахункові параметри

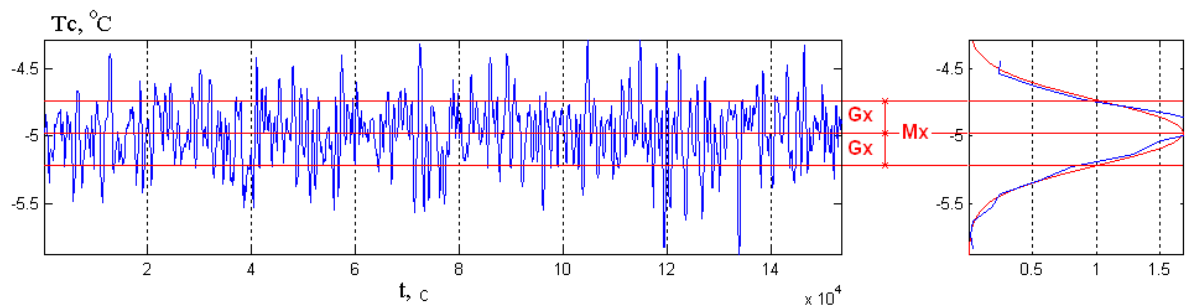
У параметрах блоку БВП необхідно встановити такі параметри:

Noise power = $S_x(\omega) = 1,4$;

Sample time = $\Delta t_T = 150$;

Seed = 1.

Результати моделювання наведені на рис. 1.10.



Види моделей щільності імовірності

Модель №1 Модель №2 Модель №3

Модель щільності імовірності НОРМАЛЬНОГО (ГАУССІВЬКОГО) випадкового процесу

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

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

☐ Обрати поточний вид моделі $p(x)$

Характеристики згенерованої реалізації випадкового процесу $x(t)$:	
ВИХІДНІ	
Інтервал часу генерації ВП	$T_p = 153600$ с
Крок квантування ВП за часом генерації	$\Delta t = 150$ с
Кількість точок згенерованої реалізації ВП	$N = 1024$
ОТРИМАНІ В РЕЗУЛЬТАТІ ОЦІНЮВАННЯ	
Оцінка математичного очікування	$M_x = -4.975$
Оцінка дисперсії	$D_x = 0.05631$
Оцінка середньоквадратичного відхилення	$G_x = 0.2373$
Оцінка середньоквадратичного періоду	$T_{\text{скл}} = 1365$ с
Кількість середньоквадратичних періодів в згенерованій реалізації ВП (мінімум 25...50)	$N_{\text{Тскп}} = 112.5$

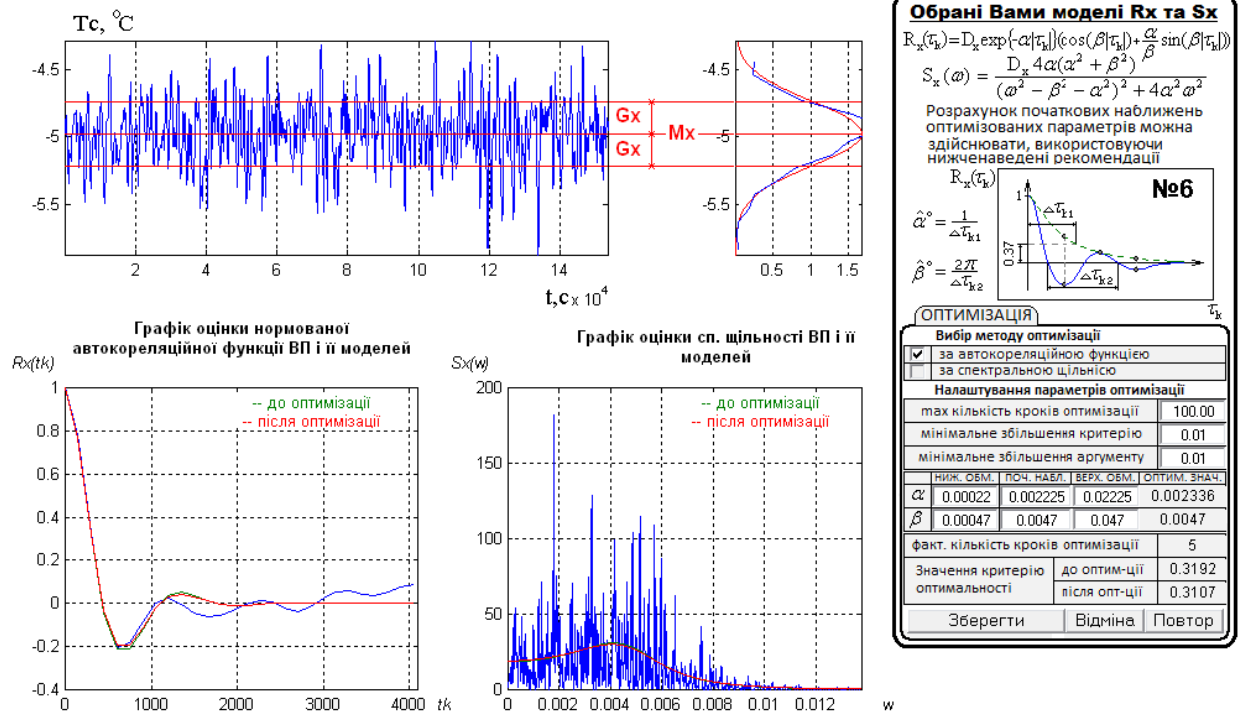


Рис. 1.10 - Результати моделювання неконтрольованих збурювань із розрахунковими параметрами формуючого фільтра

Для реалізації повної моделі ОК об'єднаємо моделі динаміки і статички каналів ОК. Схема моделювання в середовищі Матлаб, що відображує модель ОК, наведена на Рис. 1.11.

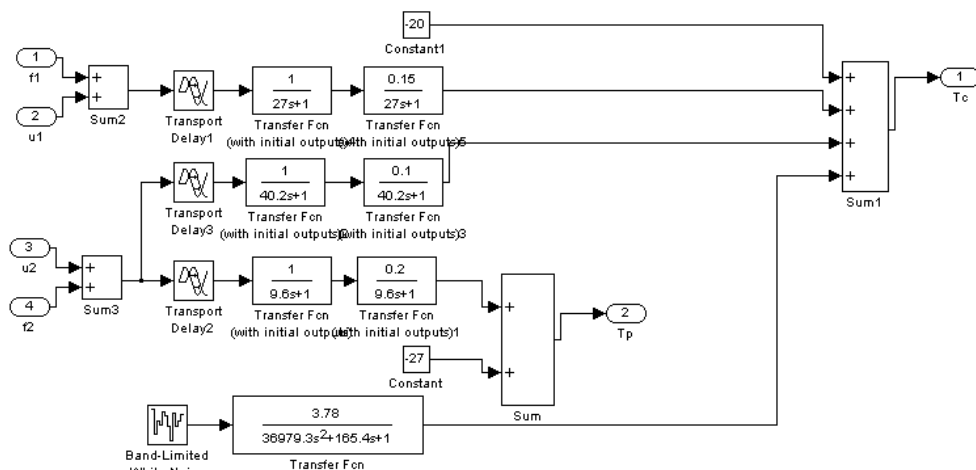


Рис. 1.11 – Схема моделювання повної моделі ОК

1.5. Типові структура та алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, результати їхньої параметричної оптимізації та перевірки на робастність (грубість).

Для системи керування процесу охолодження виноматеріалу доступною, крім інформації про бажаний стан ОК ($T_c^{3дн}$ та $T_x^{3дн}$), є інформація про поточний стан ОК (T_c та T_x). Такий обсяг інформації для формування керуючого впливу (u) достатній для реалізації замкненого принципу керування. Тому саме цей принцип і буде покладено в основу розроблюваної САР температури охолодження базової структури. Структурна схема цього принципу управління приведена на рис. 1.12.

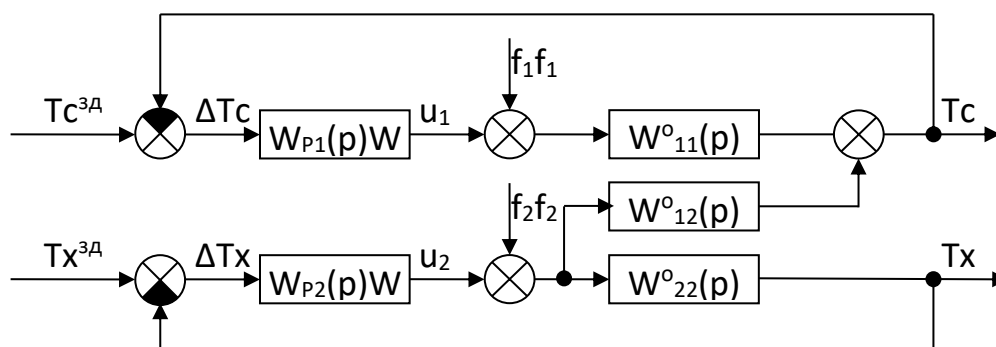


Рис. 1.12 – Структурна схема системи керування, що відповідає замкненому принципу керування

На рисунку:

U_1 – частота обертання насосу, що змінює витрати виноматеріалу;

U_2 – частота обертання насосу, що змінює витрати холодоагенту;

T_c – температура охолодження виноматеріалу;

T_x – температура холодоагенту;

f_1 та f_2 – вектори неконтрольованих збурень;

$W_{P1}(p)W_{P2}(p)$ – передаточні функції регуляторів температури виноматеріалу та холодоагенту;

$T_c^{3Д}$ та $T_x^{3Д}$ – задані значення регульованих координат;

ΔT_c та ΔT_x – помилки регулювання.

Процес охолодження виноматеріалу в трубчастому теплообміннику за всіма каналами має статичні властивості, тому обираємо пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритм регулювання.

Рівняння руху ПІД-регулятора

$$u(t) = K_p \cdot \left(\Delta y(t) + \frac{1}{T_{I3}} \int_0^T \Delta y(t) dt + T_{yП} \frac{d\Delta y(t)}{dt} \right) + u_0$$

Передаточна функція ПІД-регулятора

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

Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором - на рис. 1.13.

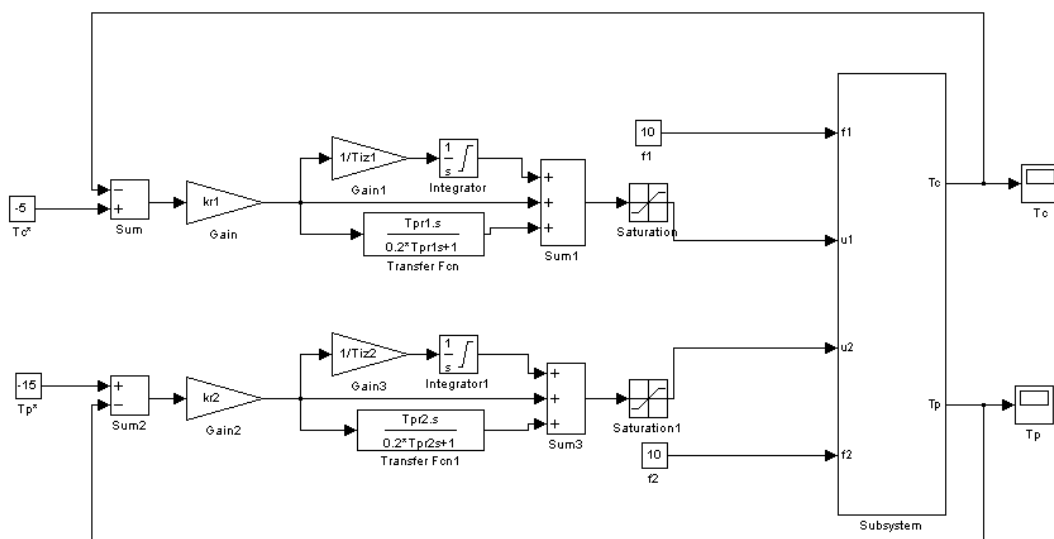


Рис. 1.13 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

В результаті оптимального параметричного синтезу отримано наступні налаштування ПІД-регуляторів:

Регулятор $W_{P1}(p)$

$$K_{P1} = 12,75\% \text{х.р.о. } / ^\circ\text{C}$$

$$T_{I1} = 44,48 \text{ с}$$

$$T_{УП1} = 22,01 \text{ с}$$

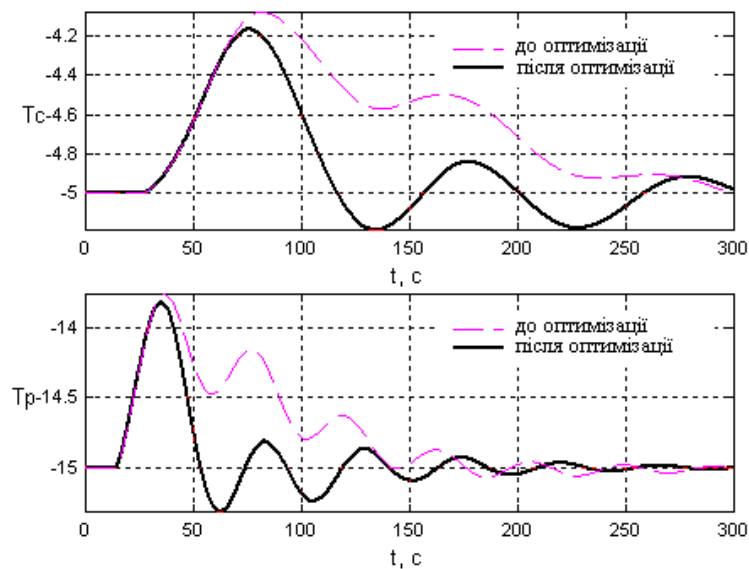
Регулятор $W_{P2}(p)$

$$K_{P2} = 7,39\% \text{х.р.о. } / ^\circ\text{C}$$

$$T_{I2} = 16,58 \text{ с}$$

$$T_{УП2} = 9 \text{ с}$$

Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рис.1.14.



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
kr1	12.7525	0	6.7	70	до - 74.106
Tiz1	44.4842	-600	62.44	900	після - 35.613
Tpr1	22.0118	0	44.6	900	оптимізації.
kr2	7.3953	0	3.96	50	Кількість кроків
Tiz2	16.5809	-600	28	900	процедури оптимізації:
Tpr2	9.0583	0	20	900	максимальна - 1000
					фактична - 456

Рис. 1.14– Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

Порівняємо перехідні процеси в САР з ПІД-регулятором до і після оптимізації за інтегральним і прямими показниками якості. Результати порівняння зведемо в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати порівняння САР з ПІД-регулятором до і після оптимізації

САР з ПІД-регулятором	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_c^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{с}$	$\Delta T_x^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп2}}, \text{с}$	
до оптимізації	0,92	169,18	1,24	89,55	74,106
після оптимізації	0,84	96,4	1,19	47,24	35,613

Слід відзначити, що внаслідок нелінійності, параметри каналів можуть варіюватися в межах до $\pm 20\%$. При цьому дослідження САР на грубість слід проводити в умовах дії детермінованих ступінчастих неконтрольованих збурень $10\%x.p.o.$

Результати оцінки САР з ПІД-регулятором на грубість наведені на рис. 1.15.

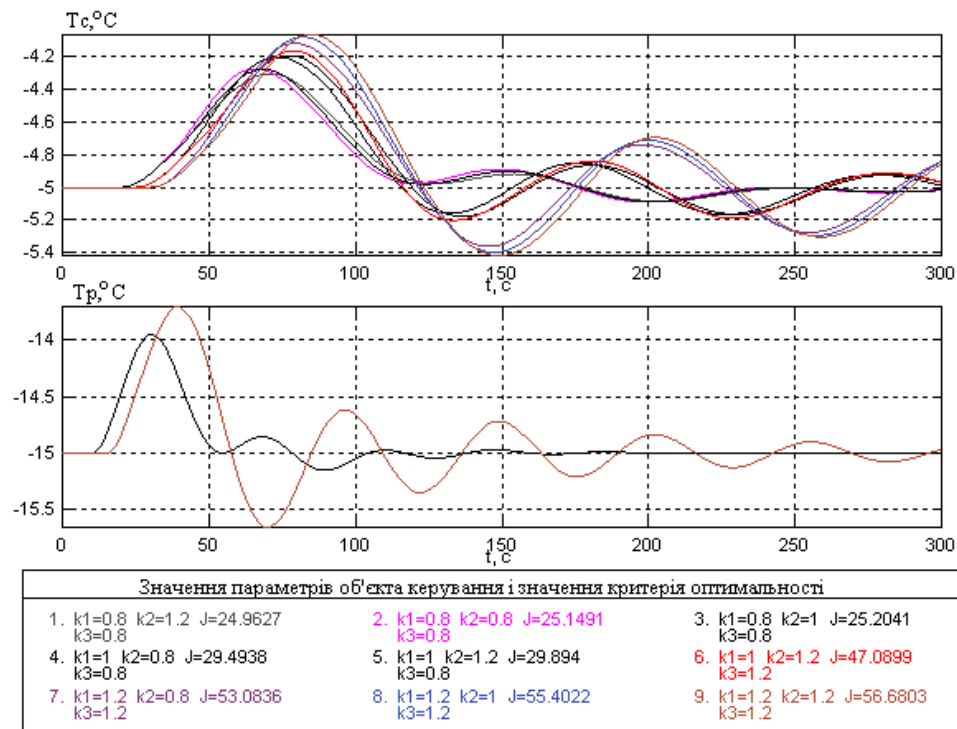


Рис. 1.15 - Аналіз на грубість САР з ПІД-регулятором в умовах дії неконтрольованих збурень

Як видно з результатів, САР з ПІД-регулятором є грубою, оскільки в умовах варіації параметрів ОК дає перехідні процеси, що сходяться.

Таблиця 1.3 – Результати порівняння варіантів САР базової структури з ПІД-регулятором

Варіант САР (параметри ОК)	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_c^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{c}$	$\Delta T_p^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп2}}, \text{c}$	
номінальні	0,84	96,4	1,19	47,24	35,61
«насприятливіші»	0,7	88,58	1,06	41,89	24,96
«найнесприятливіші»	1	107,96	1,3	52,6	56,68

Для конфігурації налаштувань параметрів «насприятливіших», «найнесприятливіших», та номінальних була проведена оцінка САР на грубість усталому режимі, результати наведені на рис. 1,16.

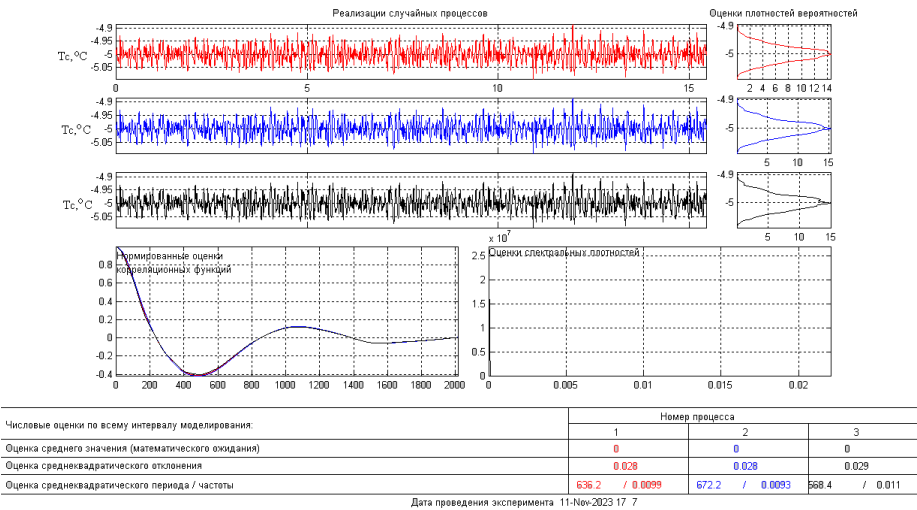


Рис. 1.16 – Результати оцінки САР на грубість усталому режимі

1.6. Висновки за розділом

У даному розділі КРМ було проведено опис суті ТП, аналіз впливу режимів ведення ТП та роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів та наслідків їх порушень, проведений аналіз існуючих САК ТП підвищення ефективності системи автоматичного керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу на основі розвитку її алгоритмічної і функціональної структури, були розроблені моделі статички та динаміки по каналам керування та моделі вхідних дій, проведена перевірка, підтвердила відповідність отриманих моделей до експериментальних даних, проведений структурний та оптимальний параметричний синтез і аналіз САК базової структури.

РОЗДІЛ 2. Удосконалення САР на основі цілеспрямованого удосконалення її структури.

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

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 багатовимірної САР).

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є шкідливий вплив перехресних зв'язків в об'єкті. Основним шляхом підвищення динамічної точності саме розглянутої САР є побудова САР, автономної до дії неконтрольованого збурення.

В основу підвищення динамічної точності САР буде покладено принцип двоканальний Петрова, суть якого у введенні додаткового каналу впливу " $u_2 - T_c$ " через коригуючий зв'язок.

2.2. Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності

Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема САР, підвищеної динамічної точності матиме вигляд, наведений на рис. 2.

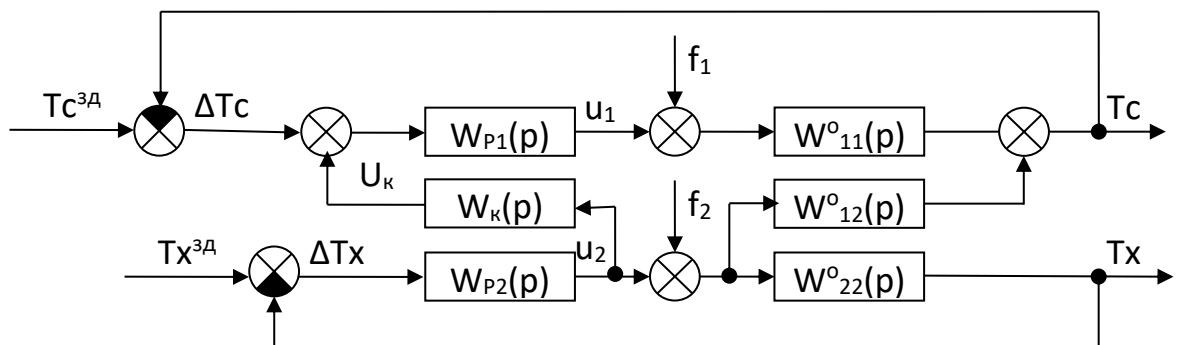


Рис. 2. – структурна схема раціональної САР підвищеної динамічної точності

На схемі:

$T_c^{зд}$ та $T_x^{зд}$ – задані значення регульованих координат, °С;

T_c та T_x – поточні значення регульованих координат, °С;

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

ΔT_c та ΔT_x – помилки регулювання, °С;

u_1 та u_2 – керуючі дії, %х.р.о.;

f_1 та f_2 – неконтрольовані збурення;

$W_{p1}(p)$ та $W_{p2}(p)$ – передаточні функції регуляторів.

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткового каналу впливу, а для розглянутої САР така можливість є. Достатньою умовою реалізації САР є фізична реалізація передаточної функції коригуючого зв'язку.

Знайдемо передаточну функцію коригуючого зв'язку $W_K(p)$, що забезпечує автономність контуру регулювання T_c відносно контуру регулювання T_x . В якості вхідного параметра системи регулювання приймемо керуючу дію u_2 .

Відповідна передаточна функція коригуючого зв'язку:

$$W_K(p) = - \frac{W_{12}^0(p)}{W_{p1}(p) \cdot W_{11}^0(p)}$$

Перейдемо від загального вигляду до передатних функцій конкретних каналів та отримаємо передаточну функцію коригуючого зв'язку $W_K(p)$:

$$W_K(p) = 0,05 \cdot e^{-25,5p} \cdot \frac{44,48p \cdot (37,8p + 1)}{(56,6p + 1) \cdot (978,56p^2 + 44,48p + 1)}$$

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

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

Для уточнення параметрів спрощеного коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання, наведеної на рис. 2. В результаті уточнення було отримано такі значення параметрів: $K_K = 0,07$; $T_{K1} = 28,17$; $T_{K2} = 32,66$, результати моделювання наведені на рис. 2.1.

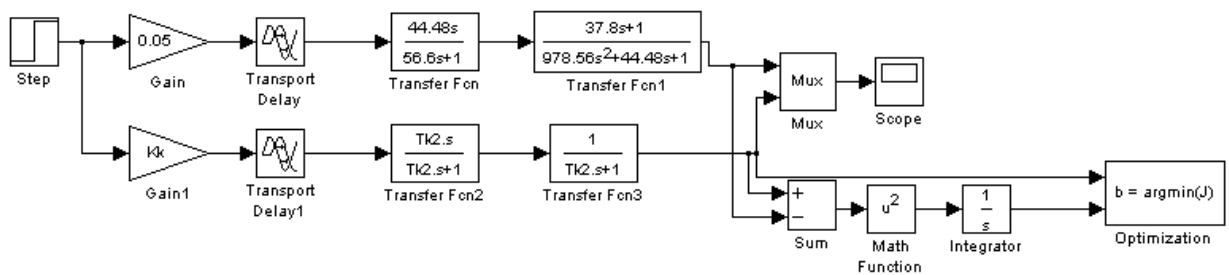


Рис. 2.1 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку

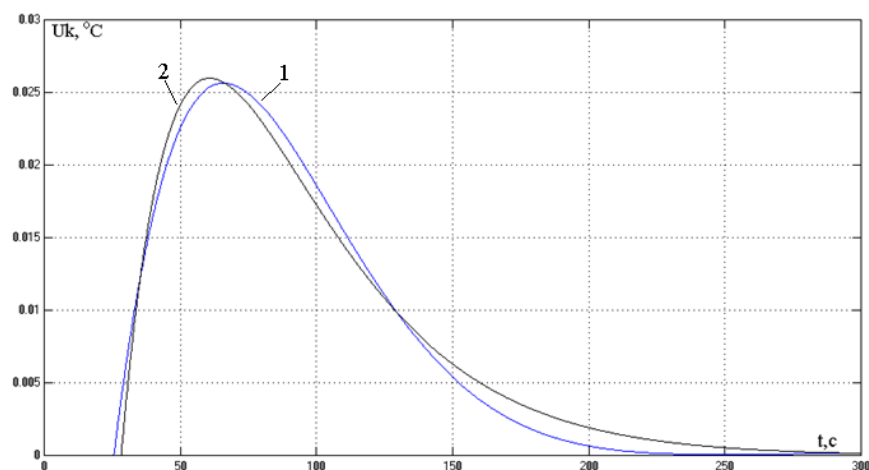


Рис. 2.2 – Перехідні характеристики розрахункового 2, та спрощеного 1 коригуючого зв'язку.

2.3. Оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності та аналіз результатів синтезу

Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку приведена на рис. 2.3, а результати оптимізації - на рис. 2.4.

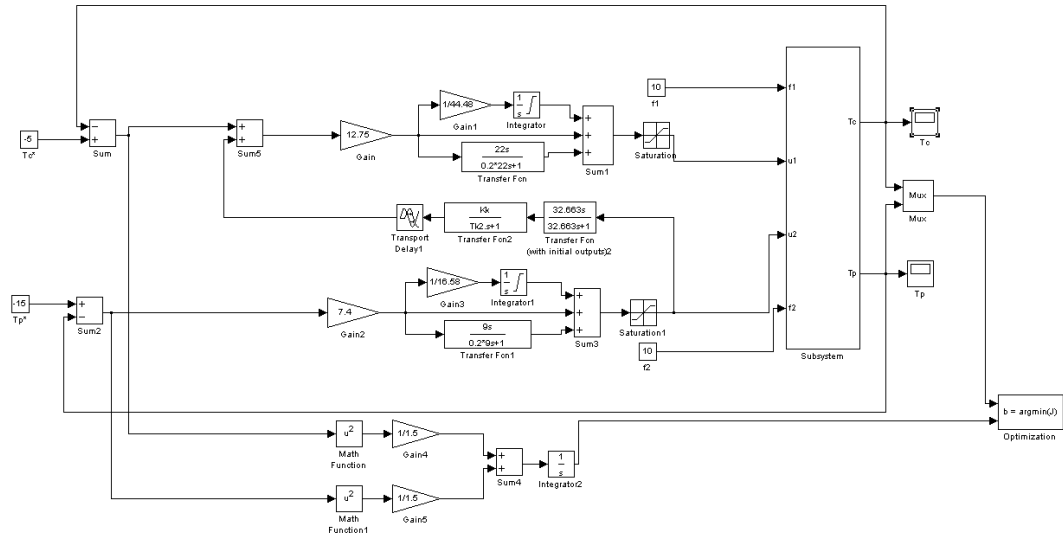


Рис. 2.3 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку

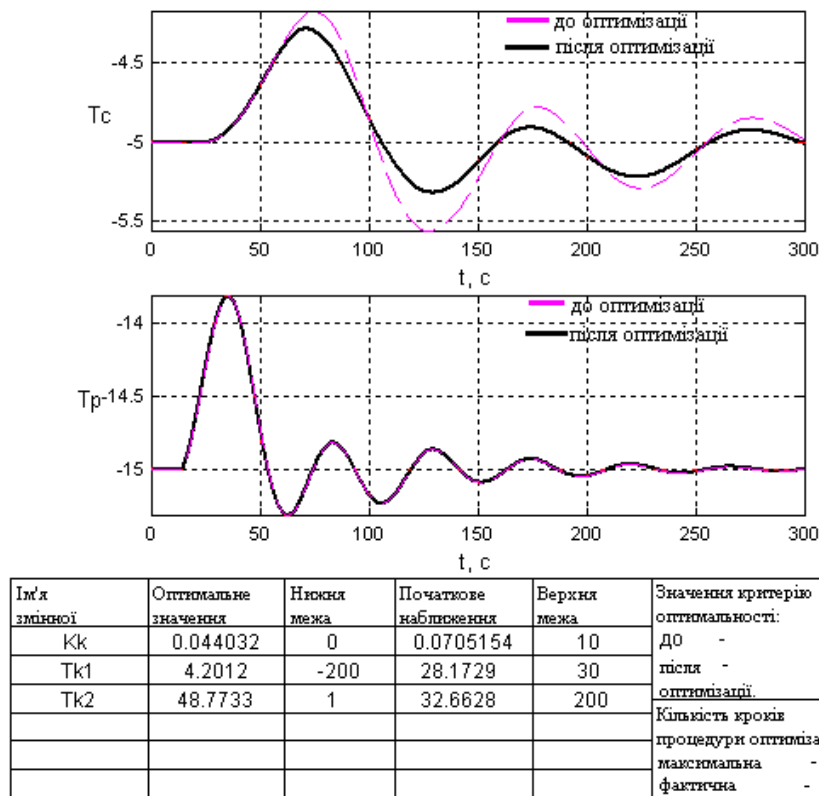


Рис. 2.4 – Результати оптимізації параметрів коригуючого зв'язку

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

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК наведено на рис. 2.5. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР дає перехідні процеси, що сходяться, а значить, САР є грубою.

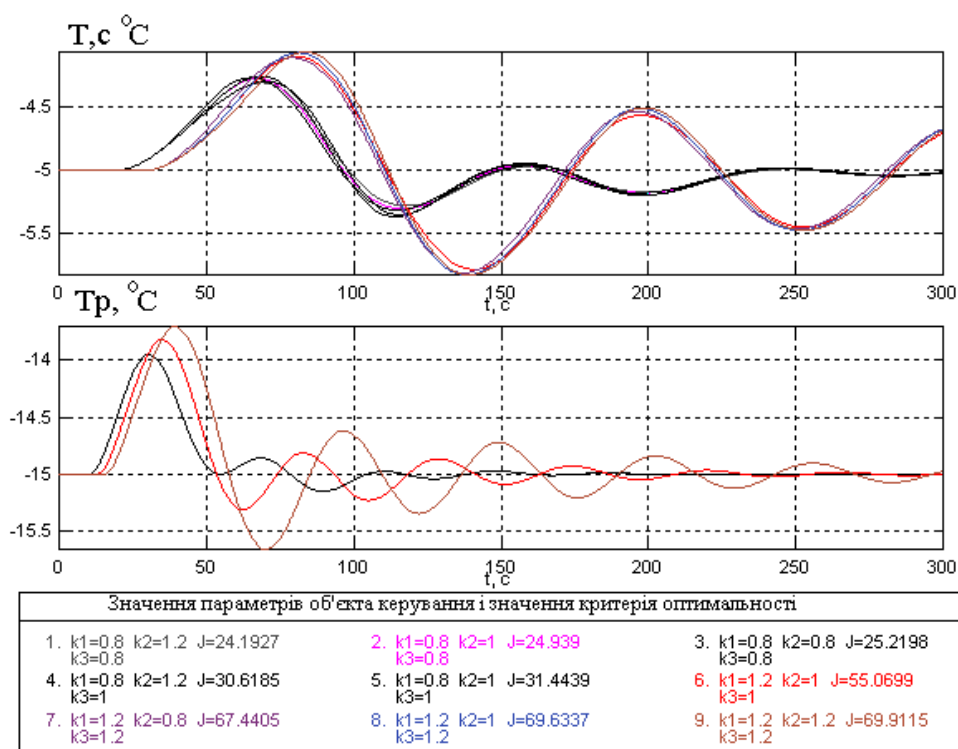


Рис. 2.5 – Аналіз САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК

Таблиця 2. – Результати порівняння варіантів САР підвищеної динамічної точності.

Варіант САР (параметри ОК)	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta T_c^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп1}}, \text{c}$	$\Delta T_x^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп2}}, \text{c}$	
номінальні	0,9	91	1,19	47,26	40,38
«найсприятливіші»	0,69	82	1,06	41,92	24,19
«найнесприятливіші»	0,93	101	1,3	52,6	69,91

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

Для конфігурації налаштувань параметрів САР підвищеної динамічної точності «насприятливіших», «найнесприятливіших», та номінальних також була проведена оцінка САР на грубість усталому режимі, результати наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати оцінки САР підвищеної динамічної точності на грубість в сталих режимах

Показники якості	Значення параметрів ОК		
	номінальні	«найсприятливіші»	«найнесприятливіші»
Математичне очікування	0	0	0
Середньоквадратичне відхилення	0,05	0,049	0,051
Середньоквадратичний період	829	847,1	820,2
Інтегральний критерій	0,0076	0,0074	0,0077

2.4. Висновки за розділом.

У даному розділі було проведено удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП Підвищення ефективності системи автоматичного керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу на основі розвитку її алгоритмічної і функціональної структури, проведено

структурний синтез САР підвищеної динамічної точності, САР підвищеної динамічної точності задовольняє гранично припустимим вимогам, САР підвищеної динамічної точності з ПД-регуляторами є грубою, для неї різниця між «найсприятливішими» та «найнесприятливішими» для керування параметрами ОК за максимальним динамічним відхиленням $\Delta T_c^{\text{МАКС}}$ складає 25,8%; за часом перехідного процесу (T_c) 18,81%, за максимальним динамічним відхиленням $\Delta T_x^{\text{МАКС}}$ складає 18,46%; за часом перехідного процесу (T_x) 20,3%, за критерієм 65,4%. Оскільки для САР підвищення динамічної точності дає суттєве покращення показників якості регулювання у порівнянні з САР базової структури, тому САР підвищеної динамічної точності використовувати доцільно.

РОЗДІЛ 3. Удосконалення САР на основі застосування штучних нейронних мереж.

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

До кінця ХХ-го століття регулятори будувалися лише за традиційним підходом. Однак такі регулятори не завжди можуть здійснювати стійке керування складними об'єктами. Через це з'явився новий науковий напрямок – інтелектуальних систем керування, в основу яких закладено базову здатність обробляти формалізовані знання людини (як у випадку з експертними системами та нечіткою логікою) або імітувати здібність людини до навчання та мислення (зокрема, за допомогою штучних нейронних мереж і генетичних алгоритмів). Керування на основі методів теорії нечітких множин можна використовувати коли немає достатньо знань про об'єкт керування, але присутній досвід керування їм, також у нелінійних системах, у яких дуже складна ідентифікація, а також коли за умовою завдання потрібно використовувати знання експерта. До прикладу можемо віднести доменну піч або ректифікаційну колону, математичні моделі яких містять багато емпіричних коефіцієнтів, які змінюються в широкому діапазоні. Але у той же час кваліфікований оператор може досить добре управляти такими об'єктами, використовуючи показання приладів і своїм накопиченим досвідом роботи.

Отже, актуальність використання методу теорії нечітких множин у рамках синтезу систем автоматичного керування розглянутим об'єктом - процес керування швидким охолодженням виноматеріалу буде доцільним якщо канал регулювання буде характеризуватись нелінійною характеристикою або параметричною невизначеністю в певному діапазоні регулювання. В сфері автоматизації це є особливою проблемою, коли необхідно управляти об'єктами, у яких функції описуються нелінійними

залежностями, бо при проектуванні систем управління для нелінійних об'єктів зазвичай використовується кусочно-лінійна апроксимація. Проте застосування таких методів у реальних технічних пристроях не завжди дозволяє досягнути бажаного ефекту. Тоді для забезпечення збільшення ефективності можна використати систему управління з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Таким чином, в умовах коли присутні істотні невизначеності у статичних і динамічних характеристиках процесу керування швидким охолодженням виноматеріалу як об'єкта керування присутні труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи керування. Через це доцільним буде застосування регуляторів, які засновані на нечіткій логіці.

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

Актуальність застосування нечіткої логіки у даній роботі об'єкта управління, необхідно підтвердити, а це головним чином можливо за рахунок переходу до його нелінійної моделі. Таким чином, модель каналу регулювання нашого розглянутого об'єкта управління повинна характеризуватися нелінійною статичною характеристикою, для представлення нелінійної моделі потрібно до моделі каналу регулювання додати відповідну нелінійну ланку, яку можна реалізувати за допомогою включення блоку Look up Table до моделі каналу регулювання. Структурна схема загальної моделі об'єкта керування з додаванням блоку Look up Table, який визначає нелінійність статичної характеристики, представлена на рисунку 3.

На рисунку 3 відображено структурну схему повної моделі об'єкту управління, яка є більш розширеною, розробка якої представлена в другому розділі роботи. У блоці Look up Table у табличній формі заданий нелінійний

зв'язок (залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

В результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_I - T_c$ », яка представлена на рисунку 3.1.

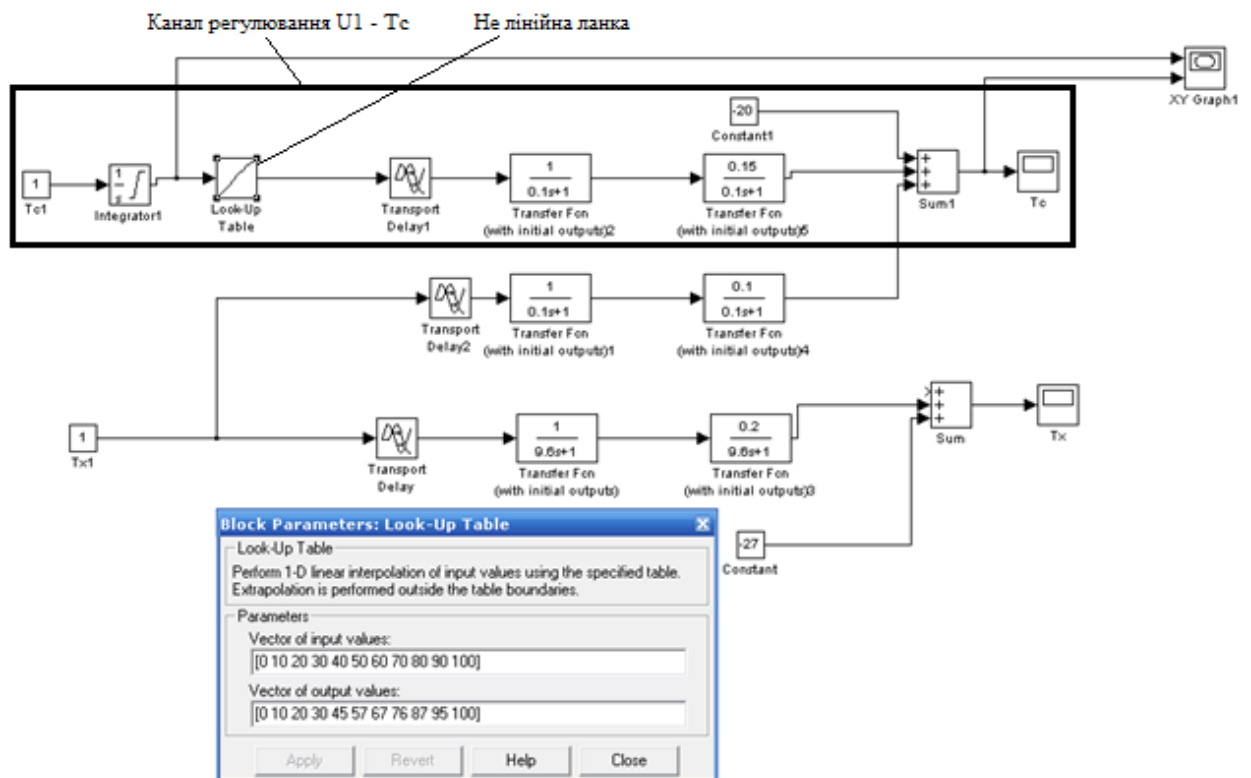


Рисунок 3. Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

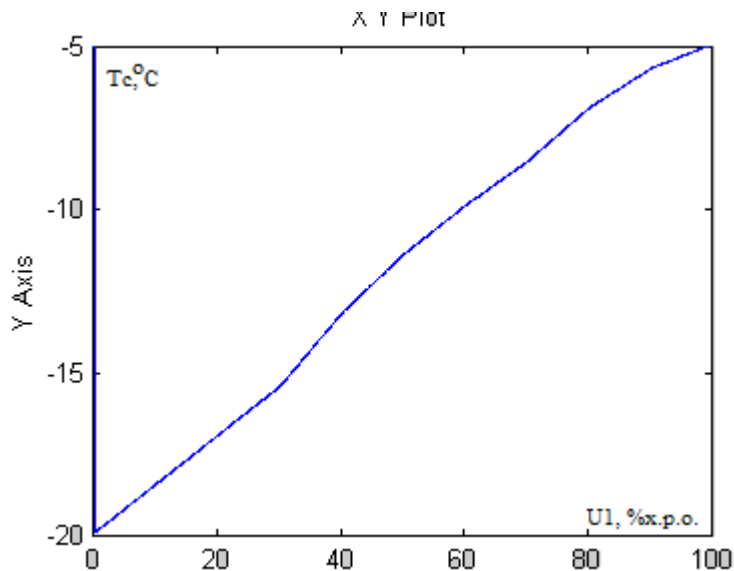


Рисунок 3.1. Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

На рисунку 3.1 бачимо, що статична характеристика несуттєво нелінійна, що дає можливість виконувати синтез САР з традиційними ПІД регуляторами і отримати необхідні показники якості регулювання.

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

На даному етапі роботи було виконано параметричний синтез САР з традиційним – лінійним ПІД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою. Треба зазначити, що нелінійність статичної характеристики реалізована в моделі, несуттєвої для одержання стійких перехідних процесів при застосуванні традиційних – лінійних «П, ПІ, ПІД» регуляторів.

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

Для параметричної оптимізації регулятора системи управління в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 розроблена схема моделювання системи керування з додаванням блоку оптимізатора, що

забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів при мінімізації за наступним інтегрально-квадратичним критерієм якості роботи системи регулювання:

$$J = \int_0^{t_M} \left[\frac{(\Delta T_c(t))^2}{1,5} + \frac{(\Delta T_x(t))^2}{1,5} \right] dt$$

Схема моделювання системи керування з оптимізатором у середовищі MATLAB\Simulink 5.2 представлена на рисунку 3.2.

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

Початкові параметри настройки регуляторів визначені за відповідними формулами з урахуванням нелінійної характеристики каналу регулювання:

Регулятор $W_{P1}(p)$

$$K_{P1} = \frac{1,2 \cdot T_O}{K_O \cdot \tau_O} = \frac{1,2 \cdot 37,8}{0,15 \cdot 44,6} = 6,7\% \text{х.р.о.} / ^\circ\text{C}$$

$$T_{I31} = 1,4 \cdot \tau_O = 1,4 \cdot 44,6 = 62,44 \text{ с}$$

$$T_{уП1} = 1,0 \cdot \tau_O = 1,0 \cdot 44,6 = 44,6 \text{ с}$$

Відповідно до нормативу ведення технологічного процесу температура виноматеріалу на виході T_c повинна підтримуватися на рівні -5°C . За цим параметром допустимі короткочасні відхилення до $\pm 1,5^\circ\text{C}$ протягом часу не більше 150 с.

Початкові параметри оптимізації були введені у відповідному вікні блоку оптимізатора. Це 300 кроків оптимізації, досить великий діапазон пошуку значень, це дозволяє більш точно підібрати оптимальні значення регулятора. Параметри каналу регулювання були визначені в результаті відповідної ідентифікації.

Треба зазначити, що остаточні значення були отримані при тих же умовах що були при оптимізації відповідної попередньої лінійної системи. На рисунку 3.4 представлена вікно результату оптимізації на 300 кроків. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання, покращилася після оптимізації САР. Однак при нелінійній характеристиці каналу регулювання ці покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи або початкових умовах системи управління. Тому, оптимальні параметри налаштування в даному випадку можуть бути протилежні в іншому випадку, це визначає про необхідність застосування нелінійних регуляторів. Оптимізація була закінчена на 128 кроці оптимізації, значення критерію якості покращилися, при визначених оптимальних параметрах настройки ПД-регулятора.

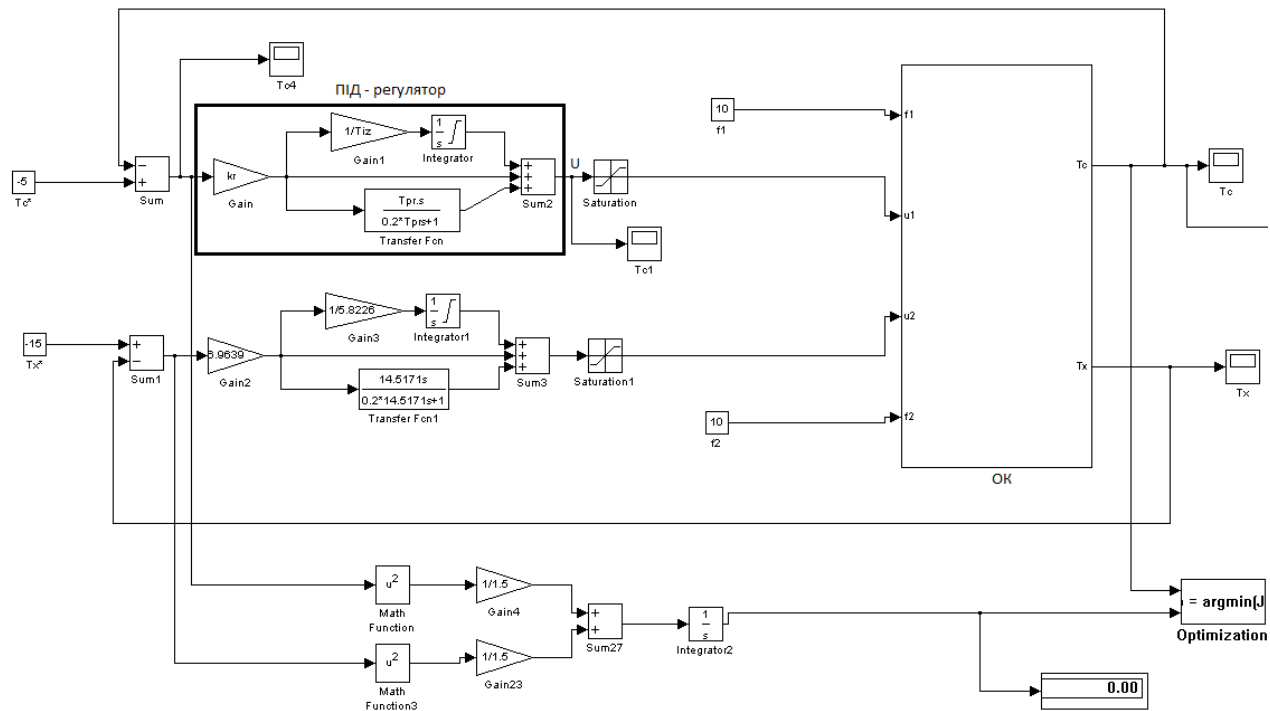


Рисунок 3.2. Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань з традиційним ПІД-регулятором

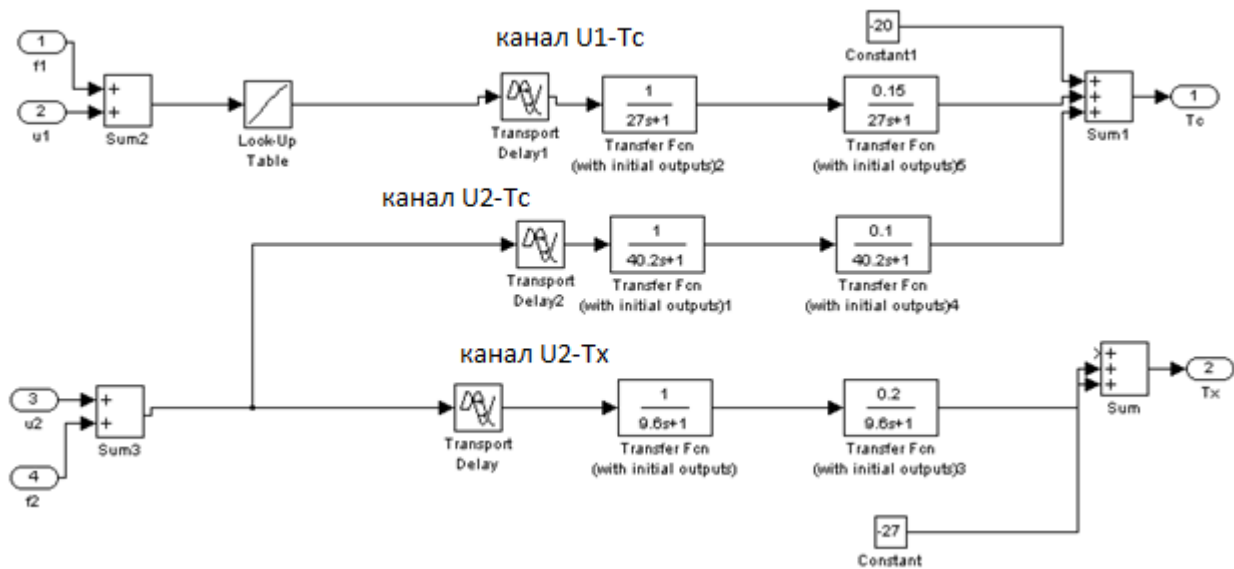
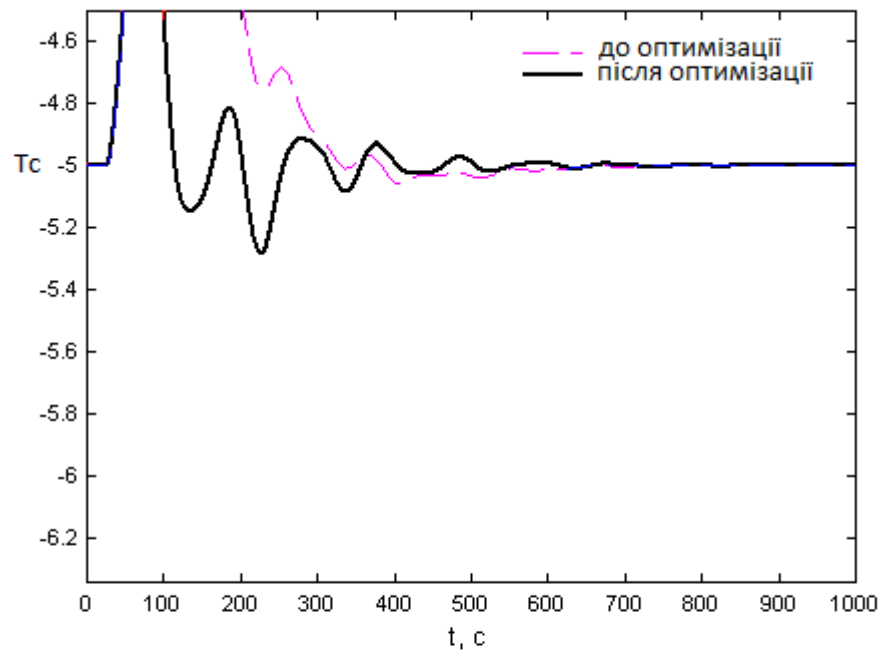


Рис. 3.3 – Структурна схема моделювання ОК

На рисунку 3.4 представлено результати оптимізації та остаточні значення параметрів ПІД-регулятора САР з об'єктом який характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
kr	12.5308	-600	6.7	600	До - 239.8379
Tiz	38.444	-600	62.44	600	Після - 191.8332
Tpr	22.1064	-600	44.6	600	Оптимізації.
					Кількість кроків процедури оптимізації:
					Максимальне - 300
					Фактичне - 128

Рисунок 3.4. Вікно результатів параметричної оптимізації значень параметрів ПД-регулятора САР за каналом регулювання, що характеризуються нелінійною статичною характеристикою.

Також проведена перевірка САР на грубість за каналом регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою з оптимізованим ПД-регулятором. Перевірка системи на грубість представлена на рисунку 3.5. Значення цих параметрів не відрізняються від системи з лінійним каналом регулювання.

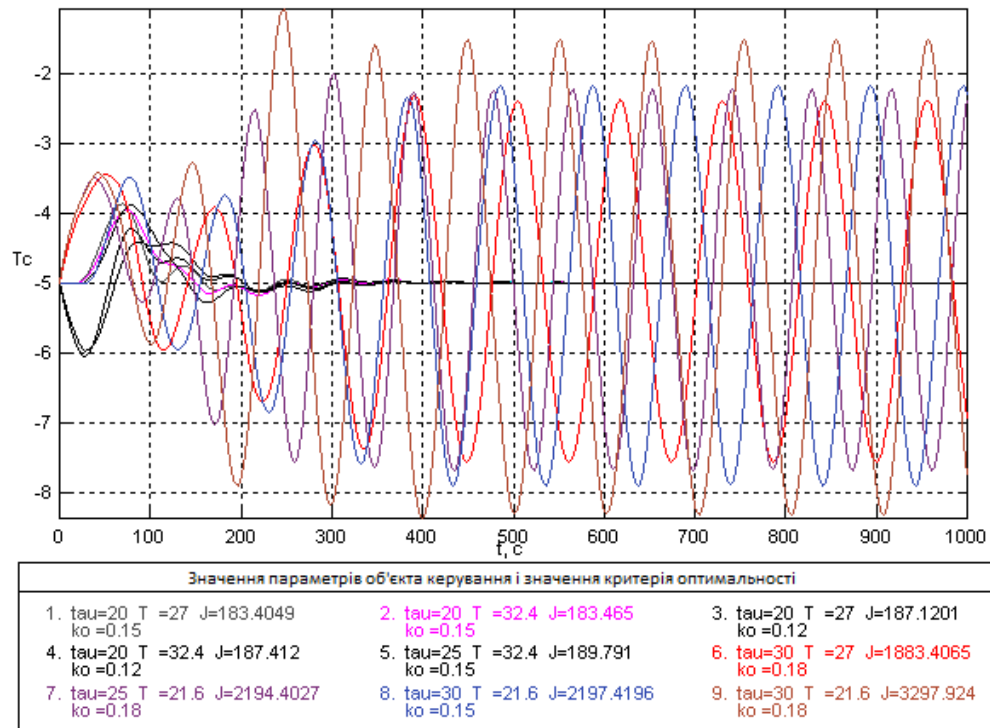


Рис. 3.5 - Аналіз на грубість САР з ПІД-регулятором

За результатами, що представлені на рисунку 3.5, можна зробити висновок що за грубістю нелінійна система така ж сама як САР з ПІД-регулятором з лінійною статичною характеристикою. Згідно з представленими результатами на рисунку 3.5 систему можна вважати не грубою через те, що де які перехідні характеристики відповідають системі що знаходиться на границі стійкості.

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

В 1974 році Мамдані [Mamdani] показав застосування нечіткої логіки для побудови системи керування динамічним об'єктом, а трохи пізніше вийшла публікація [Mamdani], у якій був описаний нечіткий ПІ-регулятор і його застосування в керуванні парогенератором. З того часу область

застосування нечітких регуляторів постійно вивчається і розширюється, збільшується різноманітність їх структур і виконавчих функцій.

Нечітка логіка в ПД-регуляторах використовується як відомо двома шляхами: 1) Для побудови самого регулятора і 2) Організації настроювання коефіцієнтів ПД-регулятора. Обидва шляхи можна використовувати в ПД-контролері одночасно. В нашому випадку нечітка логіка буде використана лише для побудови самого регулятора за відомими схемами. Опис статичних режимів роботи об'єкта має деяку складність, вона приводить до того, що режими функціонування можуть бути недостатньо точні, пов'язані з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними. Тож, у нашій роботі була реалізована модель САР із Fuzzy – нечітким регулятором.

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, представляє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фази-управління: фазифікація, логічного висновку і дефазифікація. Спрощена структурна схема цієї системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.6. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від класичних схем з нечіткими регуляторами і будується за класичними зразками.

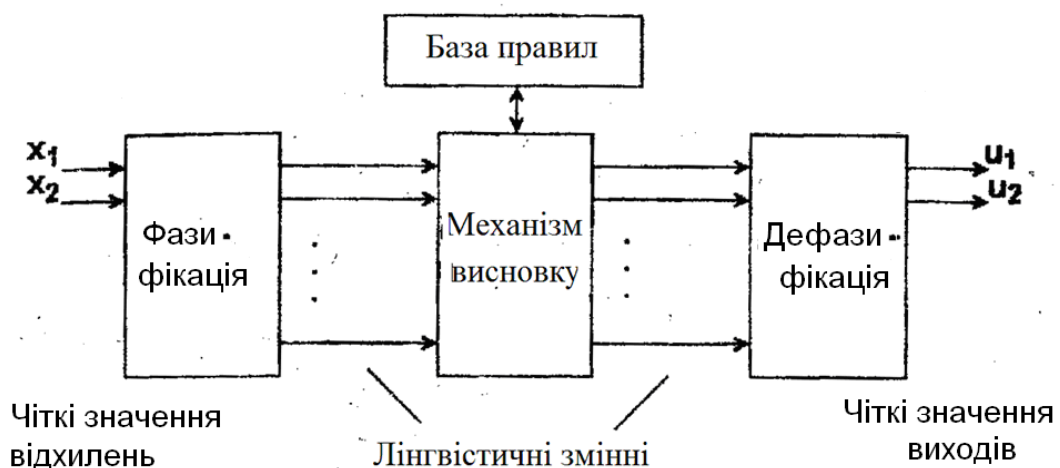


Рисунок 3.6. Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

Всі блоки (фазифікація, блок логічного розв'язку, дефазифікація), що представлені на рисунку 3.6, можна редагувати у редакторі FIS Editor програмного середовища MATLAB. Для запуску вікна fis-редактора в головному командному вікні MATLAB Window commander треба прописано команду «Fuzzy». Після чого було обирається алгоритм Sugeno та дві вхідні і вихідні змінні.

На рисунку 3.7 зображено налаштування вікна fis-файлу для нечіткого регулятора продукту на виході з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

На теперішній час запропоновано декілька алгоритмів нечіткого висновку (алгоритм Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено та ін.). У даній роботі обрано алгоритм Сугено нульового порядку, він являється найпростішим алгоритмом нечіткого виводу, і більш підходить для нашої роботи.

Формально алгоритм Сугено, запропонований Сугено та Такагі, визначається таким чином.

У базі правил використовуються лише правила нечітких продукцій в формі:

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

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

де x, y - вхідні змінні, A_i, B_i - числові 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 буде обчислюватись наступним чином:

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

Якщо опція f використовується поліном $f(x) = C$, то говорять про алгоритм Сугено 0-порядку. Тоді правила мають 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 числа.

Наступні етапи алгоритму які використовуються:

1) Фазифікація вхідних змінних. На цьому етапі всі вхідні змінні системи нечіткого виведення ставляться у відповідність нечітку множини, 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, використовується логічна операція $\min$ -кон'юнкції. Ті правила, ступінь істинності яких відмінна від нуля, вважаються активними і використовуються для наступних 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. Потім знаходяться значення ступенів істинності всіх висновків і правил нечітких продукцій з використанням методу $\min$ -активізації:

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

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

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

5. Дефазифікація вихідних змінних. Використовується 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 (1):

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

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

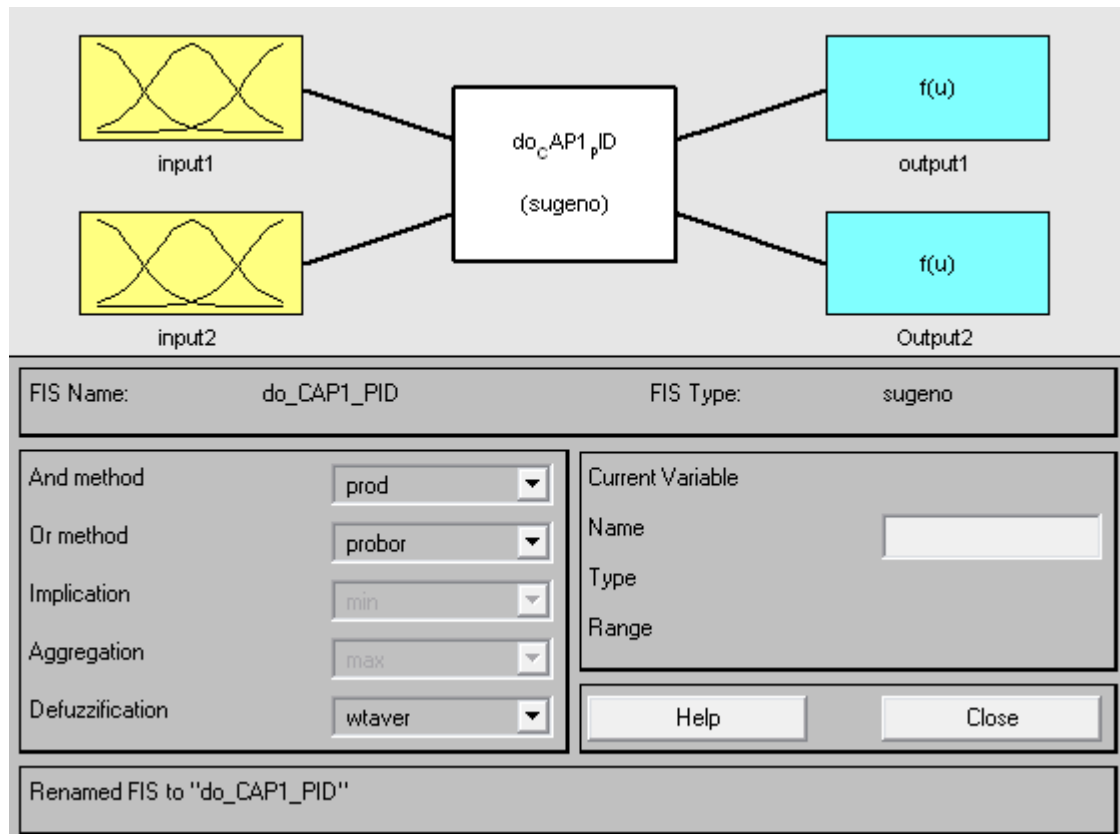


Рисунок 3.7. Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

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

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

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

Відповідно вище представленим правилам можна скласти таблицю баз знань для НЛР.

Як видно з рисунку 3.7, на вхід даного нечіткого регулятора подаються дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки регулювання (input2). Для змінної input1 задаємо три трикутні функції приналежності «trimf». Трикутна функція приналежності задається 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 $a = -1,5$, $c = 1,5$;

b - найбільш можливе значення змінної

Всі функції приналежності визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.8 зображено вікно налаштування функцій приналежності mf1, mf2, mf3 до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна», «приблизно нульова», «велика позитивна». Також визначені функції приналежності mf1, mf2, mf3 до нечітких множин приріст похибки регулювання «великий негативний», «приблизно нульовий» та «великий позитивний», які представлені на рисунку 3.9.

Згідно з таблицею 1 бази правил функціонування регулятора, прописані відповідні правила у вікні редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink. Це вікно з відповідними правилами зображено на рисунку 3.10.

	NE	Z	PE
e_1 Δe_1	(Велика негативна Δe_1)	(приблизно нульова Δe_1)	(Велика позитивна Δe_1)

NE	–	$u_I = 15;$ $\Delta u_I = 0,05;$	–
Z	$u_I = 15;$ $\Delta u_I = 0,05;$	$u_I = 0;$ $\Delta u_I = 0;$	$u_I = -15;$ $\Delta u_I = -0,05;$
PE	–	$u_I = -15;$ $\Delta u_I = -0.05;$	–

Таблиця 1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора

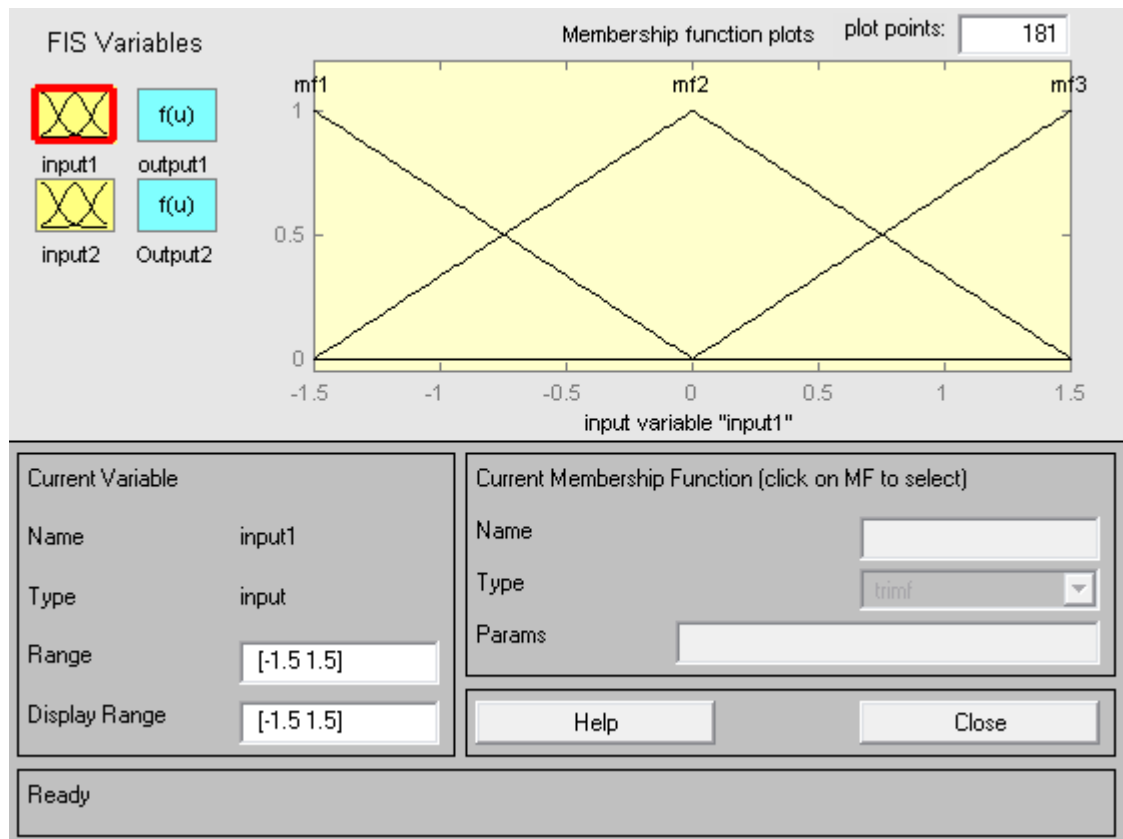


Рисунок 3.8. Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

При дефазифікації вихідних змінних використовується модифікований варіант у формі методу центру тяжіння для одноточкових множин за 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.

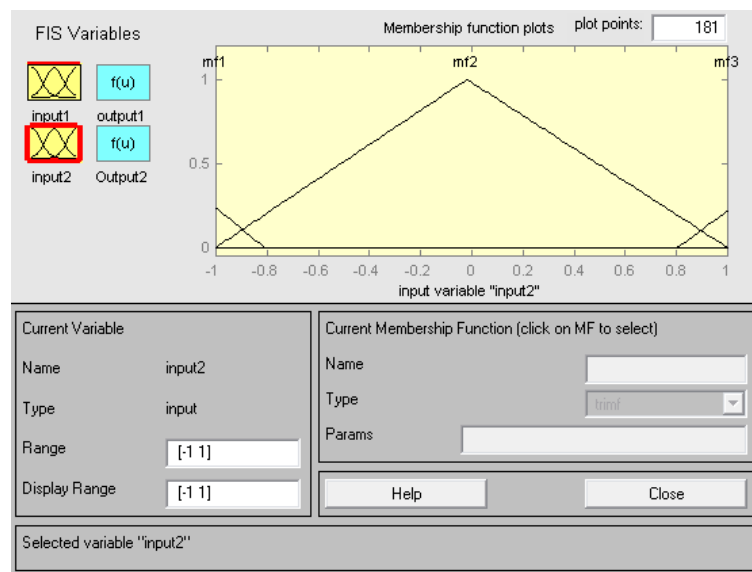


Рисунок 3.9. Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink.

У нашому випадку вихідні значення сигналів C_i згідно за алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на

рисунку 3.11. Виходами нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відповідати за інтегральну І-складову регулятора, а «output2» – відповідно за П-складову.

Для запуску синтезованого алгоритму з бібліотеки середовища MATLAB перетягнуто на робоче поле в створенній моделі SIMULINK блок «Fuzzy Logic Controller». У відкритому вікні «Fuzzy Logic Controller» потрібно записати в запропонованому полі ім'я fis-файлу, а в головному вікні налаштування fis-файлу обрати File / Save to Workspace для запуску у робочій простір середовища MATLAB нечіткого алгоритму управління.

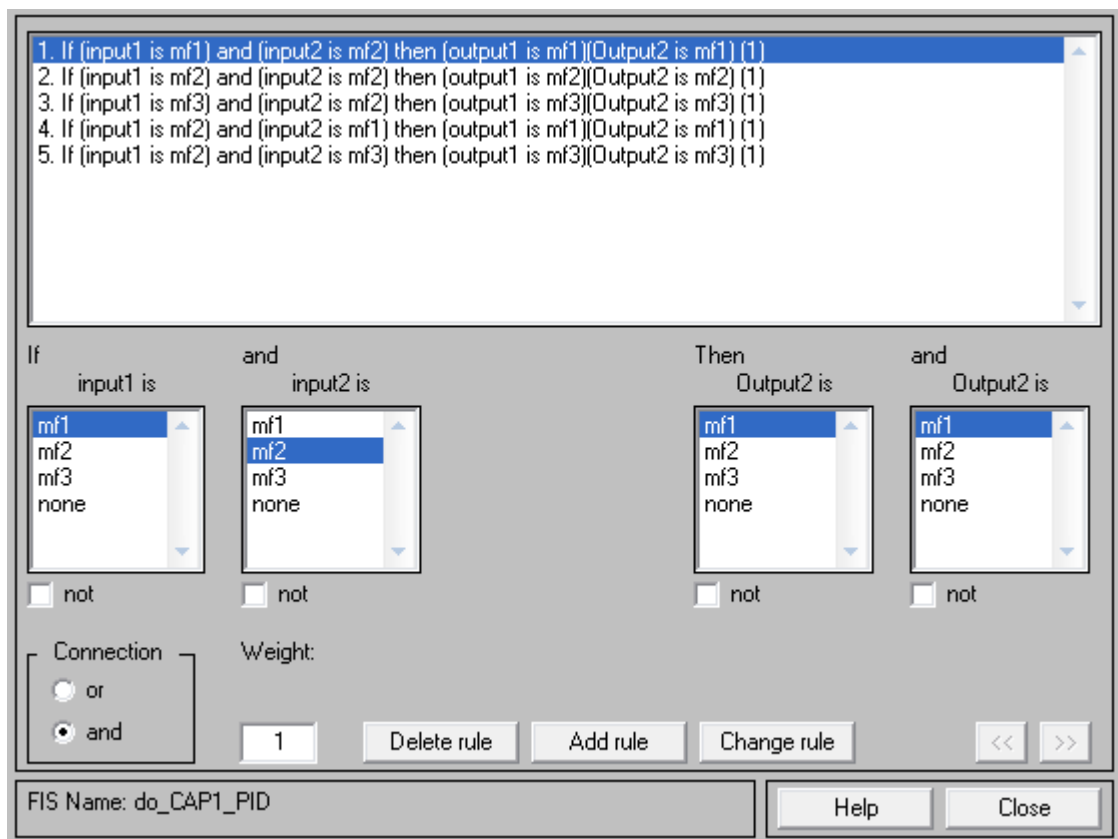


Рисунок 3.10. Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

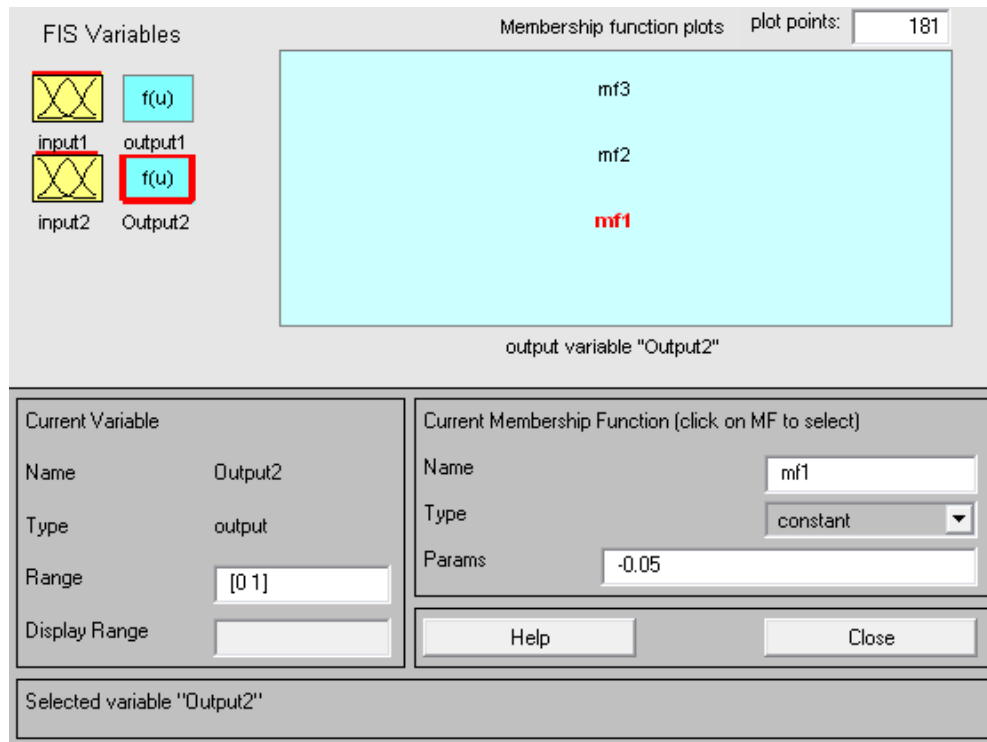


Рисунок 3.11. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку зібрана схема моделювання САР з нечітким регулятором, яка представлена на рисунку 3.12. З рисунку 3.12 бачимо, що керуюча дія нечіткого регулятора формується з декількох складових за формулою:

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

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

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

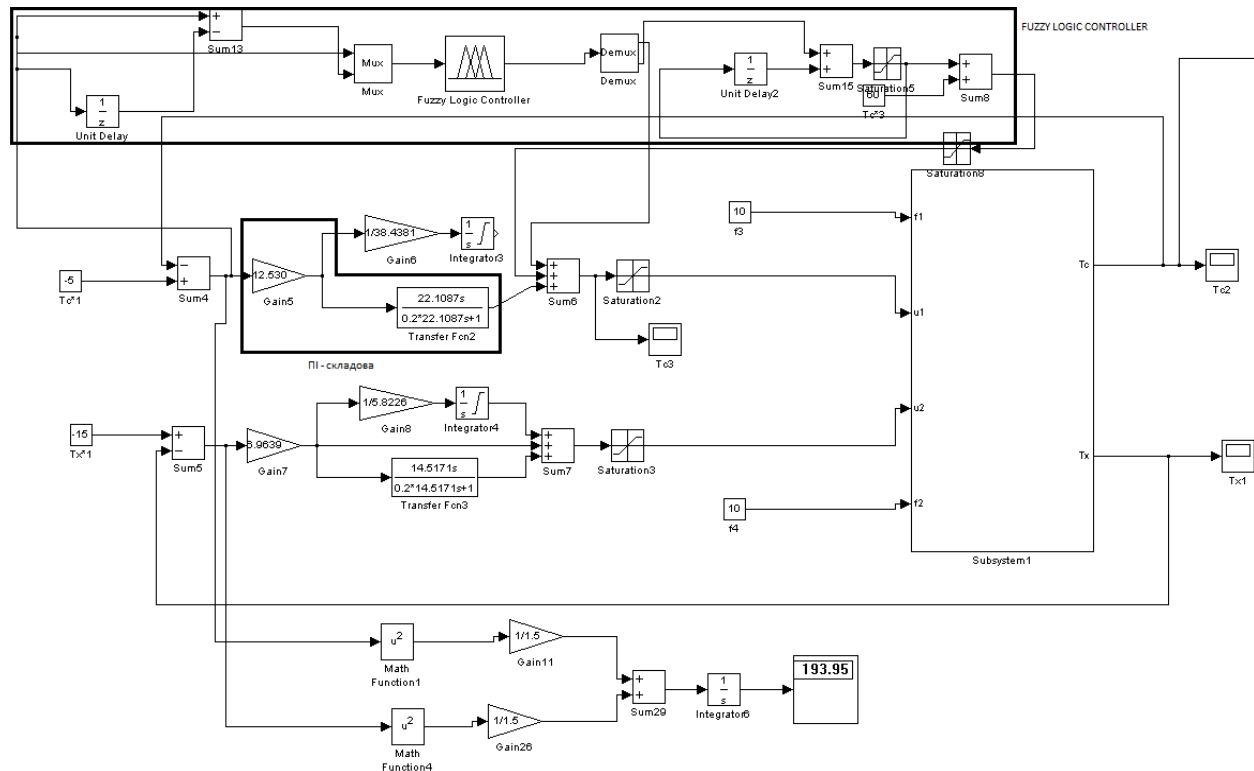


Рисунок 3.12. Схема моделювання САР з нечітким логічним регулятором

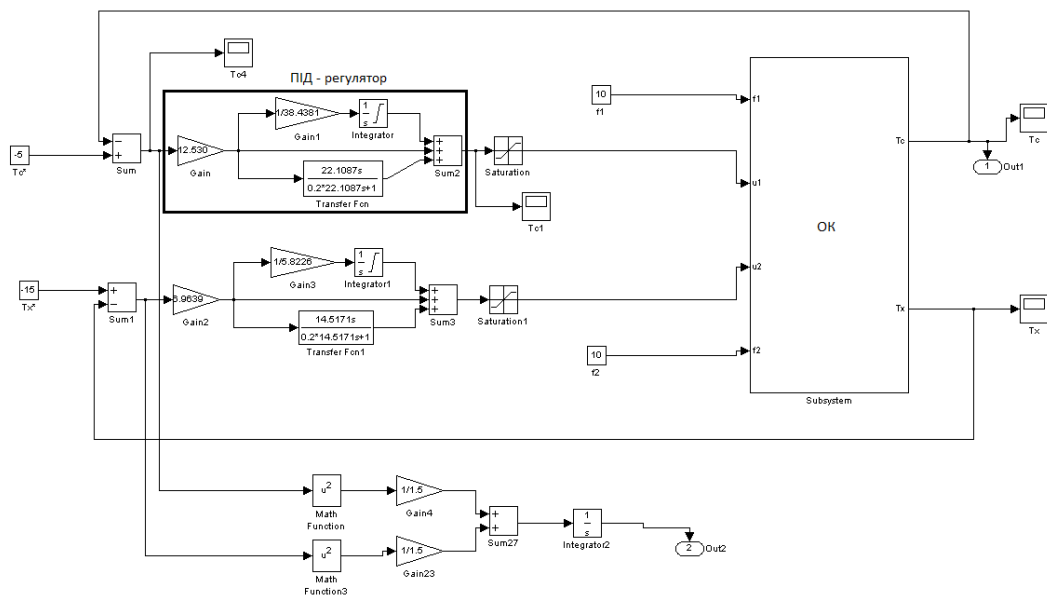
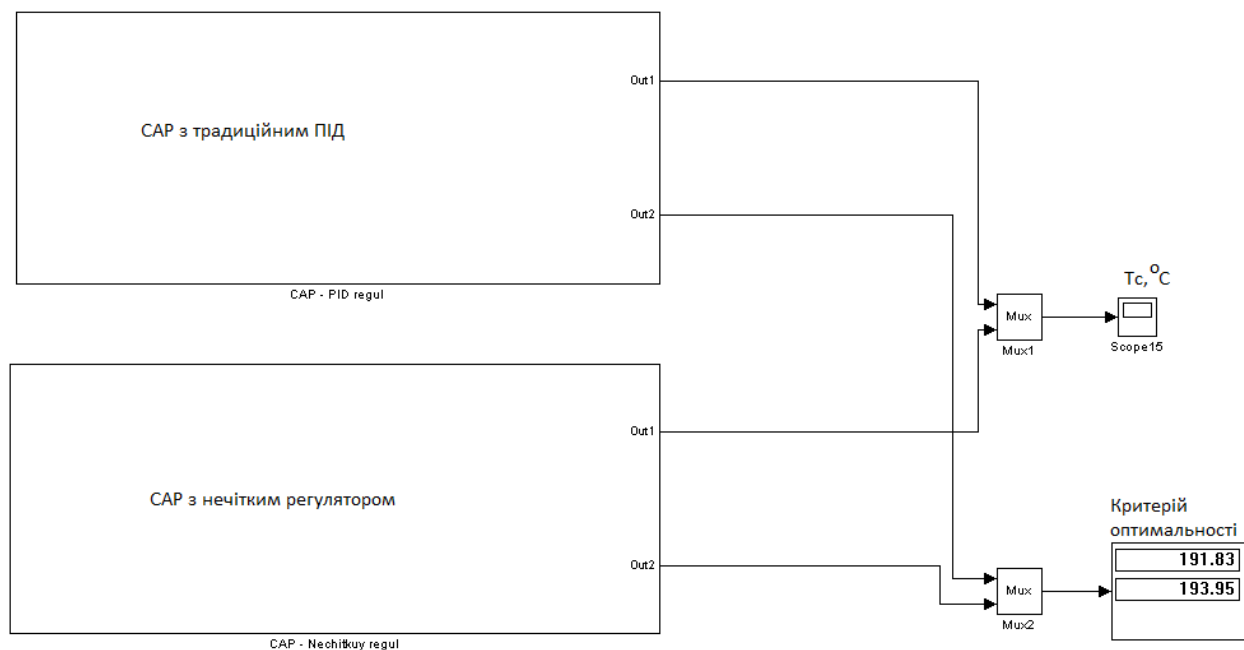
Слід зазначити, що всі функції приналежності к нечітким множинам та логічні правила функціонування при синтезі нечіткого логічного регулятора «Fuzzy Logic Controller» визначені на базі експертних даних. А далі скореговані в ході моделювання методом «проб і помилок». Також були визначені логічні правила функціонування з урахуванням правил функціонування нечітких регуляторів, представлених у відомих наукових роботах, одних із перших з Fuzzy управління.

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

При моделюванні САР з нечітким регулятором були отримані графіки перехідних процесів систем при номінальному режимі функціонування і також перехідні процеси при детермінованому впливі, що збурює. Для

порівняльного аналізу представлені відповідні графіки перехідних процесів САР з традиційним ПІД-регулятором.

На рисунку 3.13 представлені схеми моделювання САР з ПІД регулятором та САР з нечітким регулятором які відтворюють ПІ складову ПІД регулятора. Як можна побачити з рисунку диференціальна Д- складова однакова в різних системах управління. Такі системи були представлені паралельно для визначення відповідних перехідних характеристик і порівняльного аналізу за прямими показниками якості регулювання.



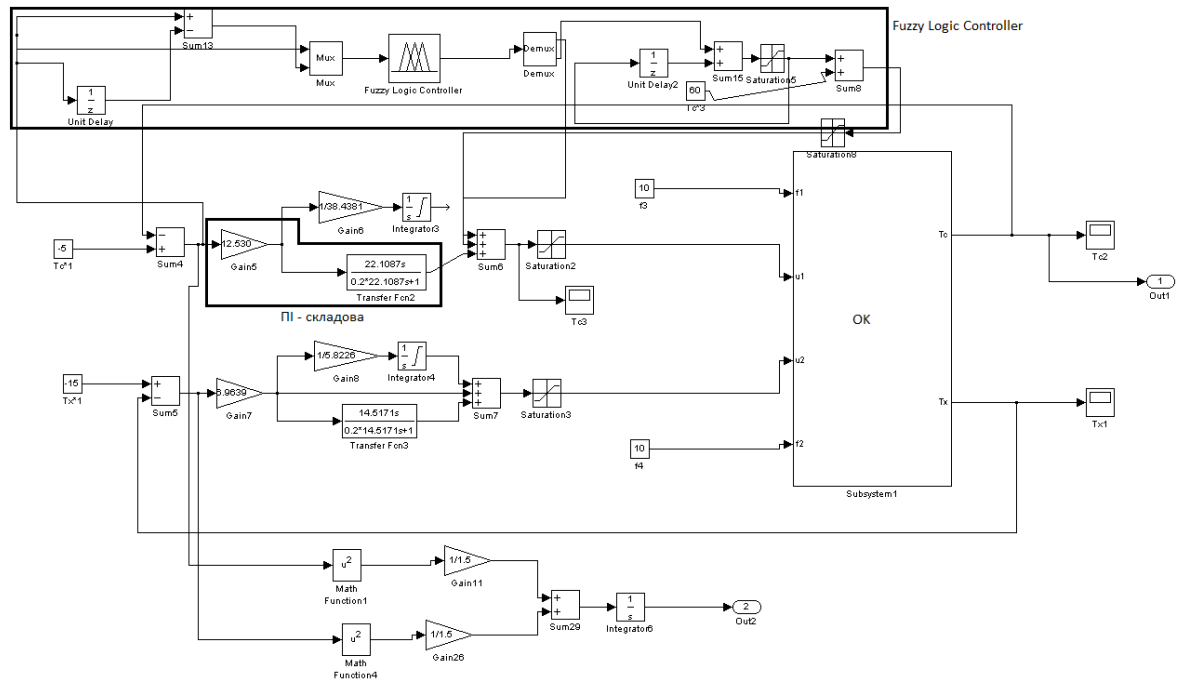


Рисунок 3.13. Структурні схеми моделей САР з ПІД-регулятором і САР з нечітким регулятором для отримання графіків перехідних процесів з метою порівняльного аналізу функціонування різних САР

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

Алгоритм Мамдані характеризується нечітким логічним виводом по базі знань (базі правил) формується в предметній області у вигляді нечітких предикатних правил виду:

П1: якщо $x \in A1$, тоді $z \in B1$,

П2: якщо $x \in A2$, тоді $z \in B2$,

.....

Пn: якщо $x \in An$, тоді $z \in Bn$,

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 математично можна представити форму алгоритму Мамдані 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, при якому знаходяться рівні відсічення для передумов кожного з правил (з використання правила мінімуму):

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0) \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)\end{aligned}$$

де через $\wedge$ позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

$$\begin{aligned}C'_1(z) &= (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \\ C'_2(z) &= (\alpha_2 \wedge C_2(z))\end{aligned}$$

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

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

Таким чином, щоб перейти до алгоритму Мамдані від Сугено 0-го порядку треба 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 рисунках 3.17 та 3.18 зображені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам —

«приріст керуючого впливу» великий (PE), «приріст керуючого впливу» приблизно нульовий (Z), «приріст керуючого впливу» від’ємний (NE).

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

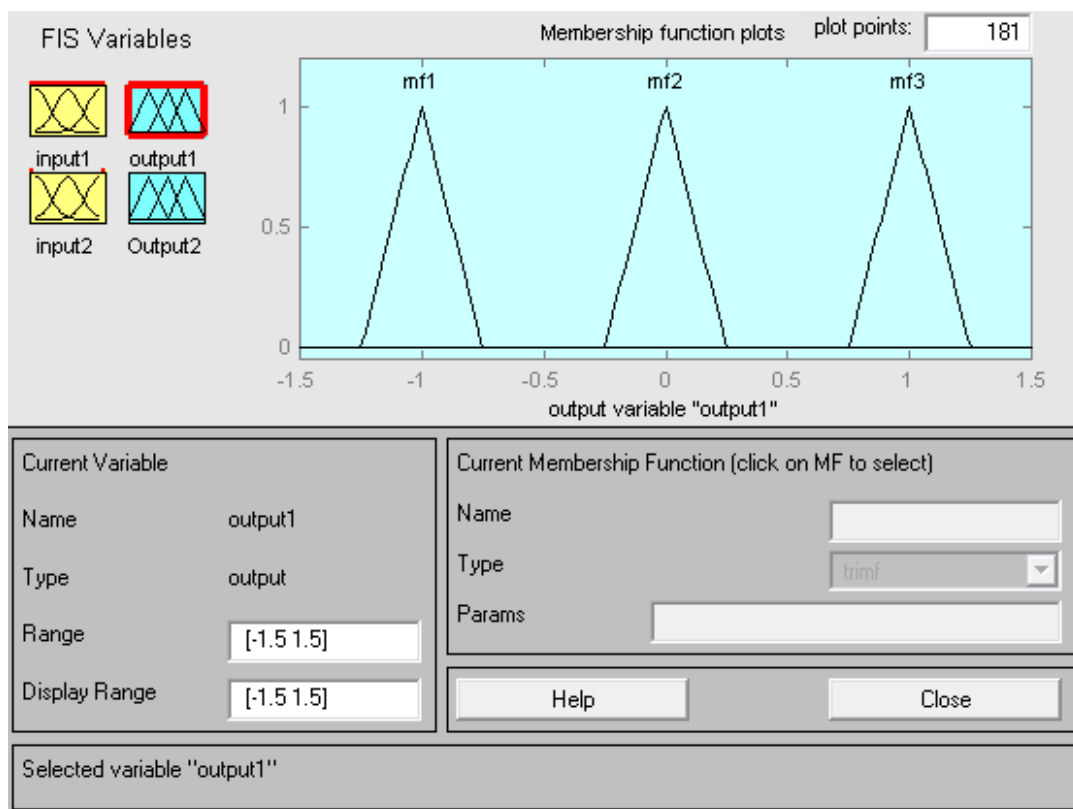


Рисунок 3.14 Вікна формування вихідних функцій приналежностей для алгоритму Мамдані до нечітких безліч – «збільшення керуючого впливу PE, Z, NE»

Щоб виконати чисельні розрахунки, на етапі дефазифікації для алгоритму Мамадані використана формула центру ваги (*тяжіння*) (англ. *Centre of Gravity, CoG*) або центроїд площі яка 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 .

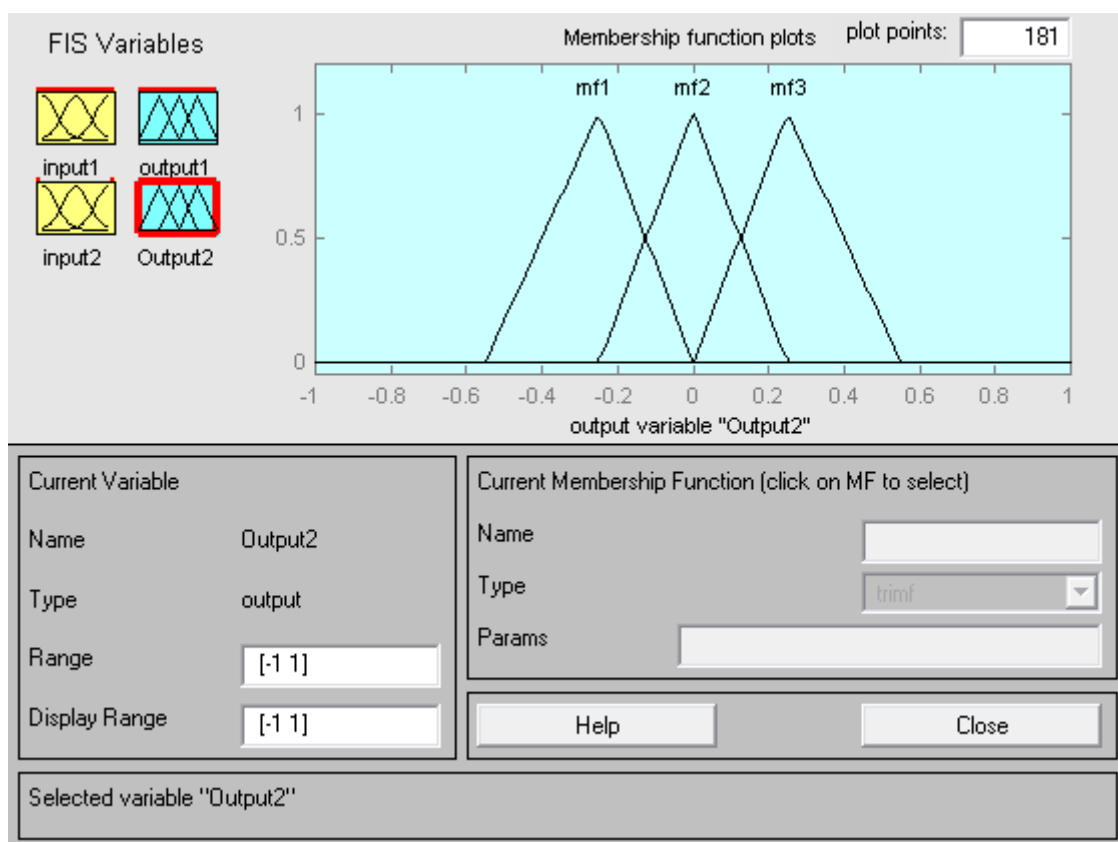


Рисунок 3.15 Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

Під час дефазифікації методом центру тяжіння чітке значення вихідної змінної визначається як абсциса центру ваги області, обмеженої графіком функції приналежності відповідної вихідної змінної.

На рисунку 3.16 представлені графіки перехідних процесів при дії детермінованих збурень. Опираючись на графіки перехідних процесів можна зробити висновок, що завдяки використанню нечіткого регулятора в системі якість регулювання незначно покращилася. Таким чином робота далі буде пов'язана з перетворенням системи з нечітким регулятором в систему з нейромережею для подальшої процедури оптимізації.

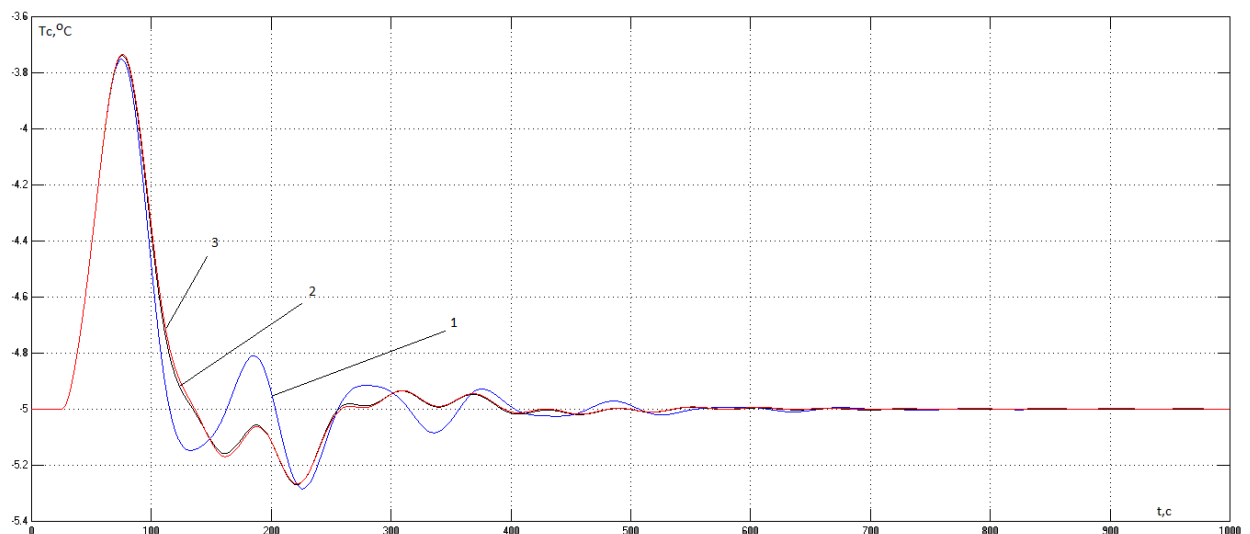


Рисунок 3.16. Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САР, графіки 1– перехідний процес у САР з ПІД регулятором; 2 – перехідний процес у САР з нечітким регулятором який функціонує згідно з алгоритмом виведення Мамдані; графік 3 – перехідний процес у САР з нечітким регулятором з висновком Сугено -0;

3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління

В історії розвитку ТАК (теорія автоматичного керування) можна чітко виділити три етапи:

Перший етап - класична детермінована теорія автоматичного регулювання, який існував в період з кінця XIX по 40-і роки XX століття. У

той період основними завданнями для керування було забезпечення стійкості систем і відповідної якості перехідних процесів.

Другий етап - теорія керування, він розпочався в 40— 50-х роках ХХ-го століття і тривав близько до середини 70-х років. Це — етап класичної стохастичної теорії автоматичного регулювання, який характеризувався новою постановкою основного завдання теорії керування, а саме врахувати випадкові збурювання, які діють на саму систему, і забезпечити якісну роботу в умовах постійно діючих перешкод.

Наприкінці ХХ-го століття в розвитку ТАК розпочався новий етап розвитку, який пов'язаний з адаптивністю систем до основного завдання керування, його особливість полягає у тому, що відсутні споконвічні знання про математичну модель об'єкта керування, це або диференціальні рівняння або спектральні щільності ймовірності випадкових зовнішніх впливів. Об'єкт представляє собою «чорний ящик», який зазнає невідомі випадкові впливи, нам лише доступні тільки його входи і виходи, які ми можемо використати. Метою системи керування (СК) є визначення закону регулювання під час функціонування цієї системи, щоб забезпечити оптимальну поведінку об'єкта, щоб розв'язати це завдання, додатково до основного контуру системи керування вводиться контур адаптації (Рисунок 3.17).

На третьому етапі розвитку систем керування значна увага приділялася адаптивному регулюванню лінійних стаціонарних об'єктів із невідомими параметрами. Зокрема, широко застосовувалися методи, засновані на побудові спостерігачів. У 1980-х роках у рамках цього підходу почали використовувати штучні нейронні мережі (ШНМ) для розв'язання завдань керування. Дослідження продемонстрували, що ШНМ є не просто новим інструментом у теорії автоматичного керування, а формують нову парадигму, для цього напряму в теорії керування було введено окремий термін — нейроуправління (neurocontrol).

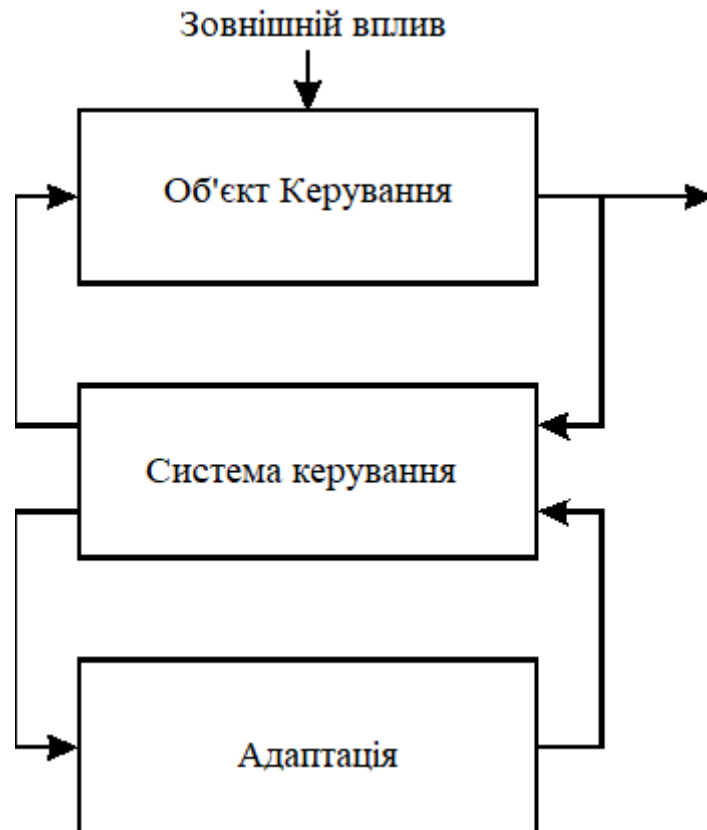


Рисунок 3.17. Загальна схема адаптивної системи керування

Штучні нейронні мережі (ШНМ) зараз знаходять широке застосування в самих різних предметних областях, з важливих напрямків можна відмітити використання штучних нейронних мереж для нейроуправління в системах автоматичного керування різноманітних типів, нейроуправління являє собою окремий випадок інтелектуального керування, коли у якості інструмента для розв'язку завдань керування застосовується штучна нейронна мережа.

Потенційними областями застосування штучних нейронних мереж можуть бути ті, де людський інтелект малоефективний, а традиційні обчислення трудомісткі або фізично незвичні для людини, застосування нейронних мереж багаторазово зростає, коли з'являється необхідність розв'язку погано формалізованих задач. Основні області для 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.

Штучна нейронна мережа як нейрорегулятор перетворює нелінійний вхідний сигнал і формує відповідний керуючий вплив, при цьому регулятор може мати багато оптимізованих параметрів (коефіцієнтів міжнейронних зв'язків), це дає можливість оптимізувати його майже під будь-який об'єкт з нелінійною статичною характеристикою. В нашій роботі нейрона мережа представляє з себе математичну модель з параметрами, які потрібно оптимізувати, і яка буде виконувати функції розробленого раніше нечіткого логічного регулятора.

3.7 Розробка моделі САР з нелінійними перетворюючими на основі штучних нейронних мереж

Використання ШНМ що навчається, дає змогу вирішувати завдання керування нелінійним об'єктом шляхом створення адаптивної системи управління (СУ) з нейроконтролером (НК), під навчанням розуміється процес впливу на систему зовнішнім корегуванням з подальшим виробленням в СУ бажаної реакції на зовнішні сигнали, зовнішнє коректування здійснюється “учителем”, який знає яка саме бажана реакція СУ повинна бути на певні впливи, при навчанні “учитель” повідомляє системі додаткову інформацію про те, вірна або невірна її реакція (Рисунок 3.18)

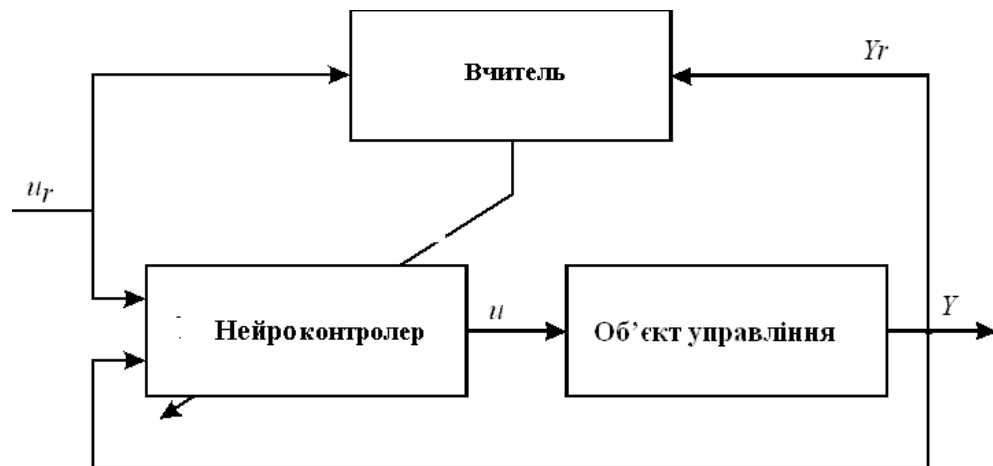


Рисунок 3.18 Загальна схема системи керування з нейроконтролером, що здатна навчатися

Адаптація в навчанні використовується для отримання інформації про стан і характеристики системи управління (СУ), необхідної для забезпечення оптимального керування в умовах невизначеності. По суті, адаптацію можна розглядати як процес оптимізації за умов недостатньої апріорної інформації.

До використання штучних нейронних мереж (ШНМ) як нейроконтролерів (НК) існує багато підходів, наприклад застосовувати ШНМ як нелінійні підсилювачі в пропорційній, інтегральній та диференціальній частинах ПІД-регулятора (рисунок 3.19).

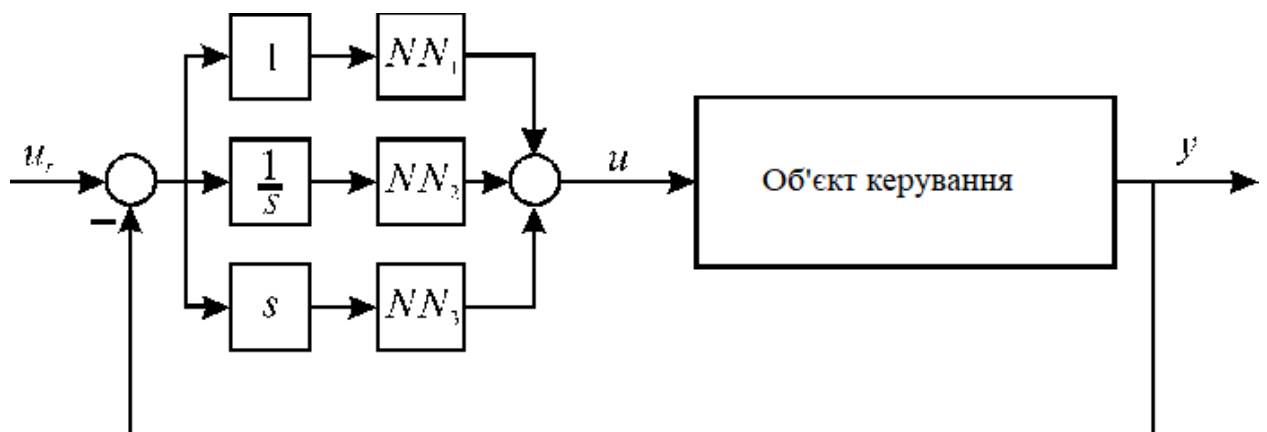


Рисунок 3.19 Система керування з комбінованим ПІД-нейрорегулятором

Математична модель застосована у якості нейронелементу в нейромереживому алгоритмі керування, аналогічна відомим найбільш розповсюдженим моделям, які дуже схожі з формальною моделлю нейрона Маккаллоха – Питса, у цій моделі сигнали, що поступили на входи нейроелементу, множаться, сигнал першого входу x_1 множиться на відповідну вагу w_1 , у підсумку отримуємо $x_1 w_1$, так до n -ого входу, на останньому вході буде $x_n w_n$. Потім всі множення передаються в суматор який просто підсумовує всі вхідні сигнали, помножені на відповідні ваги:

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

Подавати виважену суму просто так на вихід досить безглуздо, нейроелементу потрібно якось обробити її і сформуванати адекватний вихідний сигнал, для цих цілей і використовується функція активації, яка перетворює зважену суму в число, яке і є виходом нейрона.

Якщо представляти моделі нейроелемента що диференцовані з графічним представленням різних функцій активації, що відображено на рисунку 3.20, то такі нейронелементи будуть складати нейронні мережі які відтворюють нелінійне перетворення в різних складових регулятора як показано на рисунку 3.19.

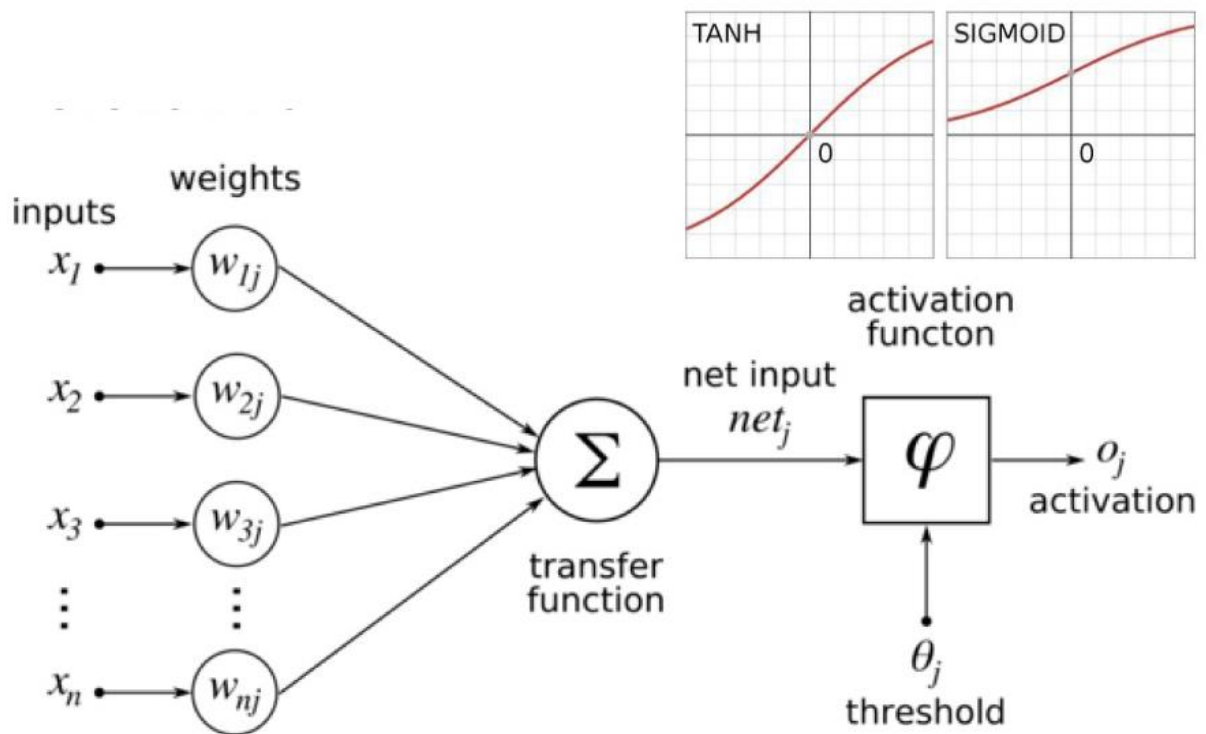


Рисунок 3.20 Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

Відомо, що одношарова нейронна мережа має обмежені можливості, тому в якості нелінійних перетворювачів будемо використовувати багатошарові нейронні мережі з функціями активації, чотирьох-шарова вже надлишкова для рішення різних задач, в нашому випадку потрібно використовувати багатошарову нейронну мережу у якості нелінійного перетворювача.

Багатошарові нейронні мережі є складнішими за структурою, оскільки, крім вхідного і вихідного шарів нейронів, вони також мають один або декілька прихованих шарів, які розташовані між вхідним і вихідним шарами. Для таких мереж розроблено поширені методи навчання та визначення коефіцієнтів з'єднань між нейронами. Одним із найвідоміших і широко використовуваних є алгоритм зворотного поширення помилки, він

реалізований у програмному середовищі MATLAB версії 5.2. За його допомогою можна налаштувати конкретну нейронну мережу, використовуючи відповідні команди у головному вікні Command Window цього середовища.

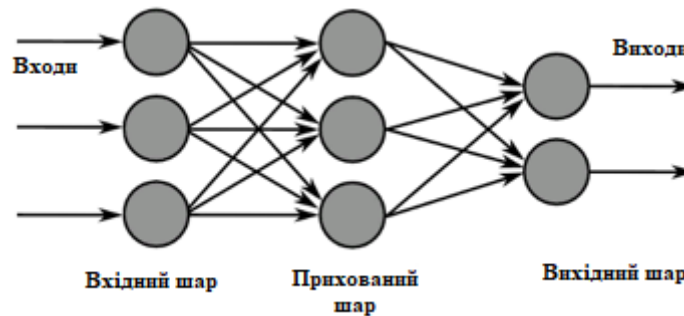


Рис. 3.21 – Багатошарова нейронна мережа яка може використовуватись для нелінійного перетворення сигналів в алгоритмі управління

Щоб забезпечити роботу алгоритму зворотнього поширення помилки треба поперемінно у випадковому порядку пред'являти всі тренувальні образи, щоб мережа, не забувала одні в міру запам'ятовуючи інші, для цього в командному вікні MATLAB представляється тренувальний набір команд вхідних та вихідних значень нейронної мережі у вигляді векторів P та T , в вектор P задаємо діапазон зміни вхідних сигналів в діапазоні зміни похибки регулювання в нашому випадку від -1,5 до 1,5, у векторі T задаємо діапазон зміни вихідних сигналів, оскільки функція активації обмежує сигнал в діапазоні від -1 до 1 то значення вектору T будуть відповідно від -0.05 до 0.05, програма яка відтворює багатошарову нейромережу представлена на рисунку 3.27. В перших двох рядках представлені вектори P та T , у третьому рядку представлена команда щоб визначити нейронну мережу в діапазоні вхідних сигналів від -1,5 до 1,5 з двома нейронами в першому шарі та одному нейроні у другому шарі (`newff([-2 2],[2 1])`), функція активації буде обраний гіперболічний тангенс (сігмод) який присутній у першому шарі нейромережі і на другому (`{'tansig','tansig'}`).

На четвертому рядку програми треба лише вказати кількість кроків навчання, в нашому випадку буде 200 кроків, що в середньому для такої невеликої нейтронної мережі достатня кількість кроків, і потім задаємо команду *net=train(net, P, T)* для тренування штучної нейтронної мережі за алгоритмом навчання на 200 кроків, потім після навчання необхідно виконати тестування визначеної нейтронної мережі.

```

» p=[-1.5 -0.5 -0.2 -0.05 0 0.05 0.2 0.5 1.5];
» t=[-0.05 -0.01667 -0.00667 -0.00167 0 0.00167 0.00667 0.01667 0.05];
» net=newff([-2 2], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=200;
» net=train(net, p, t);
TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 0.653797/0, Gradient 4.10378/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/200, MSE 4.46827e-008/0, Gradient 0.000175123/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/200, MSE 1.63948e-008/0, Gradient 3.44061e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/200, MSE 9.74502e-009/0, Gradient 1.45664e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/200, MSE 6.84689e-009/0, Gradient 8.09677e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/200, MSE 5.24011e-009/0, Gradient 5.17961e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/200, MSE 4.22441e-009/0, Gradient 3.61079e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/200, MSE 3.52675e-009/0, Gradient 2.66752e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/200, MSE 3.0192e-009/0, Gradient 2.05485e-006/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a=sim(net, p)
a =
Columns 1 through 7
-0.0500 -0.0166 -0.0066 -0.0017 -0.0000 0.0017 0.0066
Columns 8 through 9
0.0166 0.0500

```

» gensim(net)

```

» p=[-1.5 -0.5 -0.2 -0.05 0 0.05 0.2 0.5 1.5];
» t=[-0.05 -0.01667 -0.00667 -0.00167 0 0.00167 0.00667 0.01667 0.05];
» net=newff([-2 2], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=200;
» net=train(net, p, t);
TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 0.653797/0, Gradient 4.10378/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/200, MSE 4.46827e-008/0, Gradient 0.000175123/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/200, MSE 1.63948e-008/0, Gradient 3.44061e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/200, MSE 9.74502e-009/0, Gradient 1.45664e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/200, MSE 6.84689e-009/0, Gradient 8.09677e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/200, MSE 5.24011e-009/0, Gradient 5.17961e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/200, MSE 4.22441e-009/0, Gradient 3.61079e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/200, MSE 3.52675e-009/0, Gradient 2.66752e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/200, MSE 3.0192e-009/0, Gradient 2.05485e-006/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, p)

a =

Columns 1 through 7

-0.0500 -0.0166 -0.0066 -0.0017 -0.0000 0.0017 0.0066

Columns 8 through 9

0.0166 0.0500

» gensim(net)
»

```

Рисунок 3.22 Виконавчий код для генерації нейромережі, яка буде відтворювати нелінійне перетворення сигналів в алгоритмі управління

Тестування нейронної мережі здійснюється за допомогою спеціальної команди $a = \text{sim}(\text{net}, P)$, після її виконання виводяться фактичні вихідні сигнали, що відповідають вхідному вектору P , і отримані вихідні сигнали які можна порівняти із заданими, які представлені у векторі T . Згідно з програмою, фактичні значення вихідних сигналів мають незначні відхилення від заданих у векторі T . Точність навчання відображено на рисунку 3.23, де показано процес зменшення та стабілізації похибки навчання протягом 200 кроків.

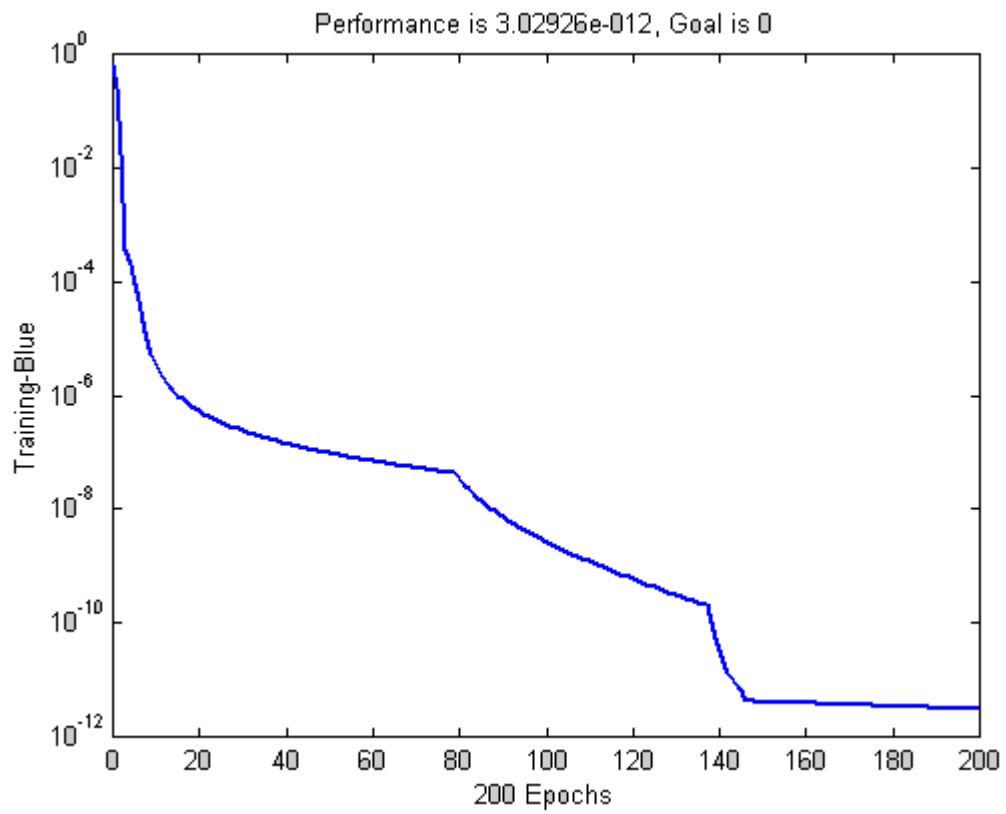


Рисунок 3.23 – Характеристика точності навчання нейромережі яка буде відтворювати нелінійне перетворення сигналів в алгоритмі управління

Остання команда яка вводиться для відтворення нейронної мережі в середовищі Simulink це команда `gensim(net)` після виконання цієї команди з'являється нейронна мережа як показано на рисунку 3.24.

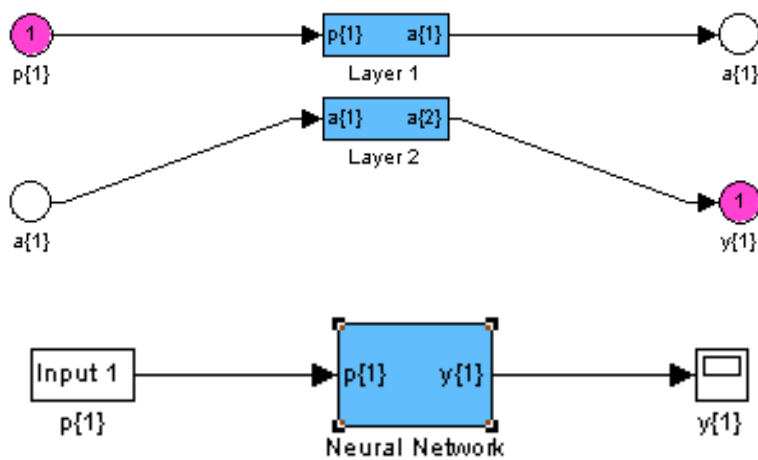


Рисунок 3.24. Відтворена нейронна мережа в середовищі Simulink після виконання відповідної програми

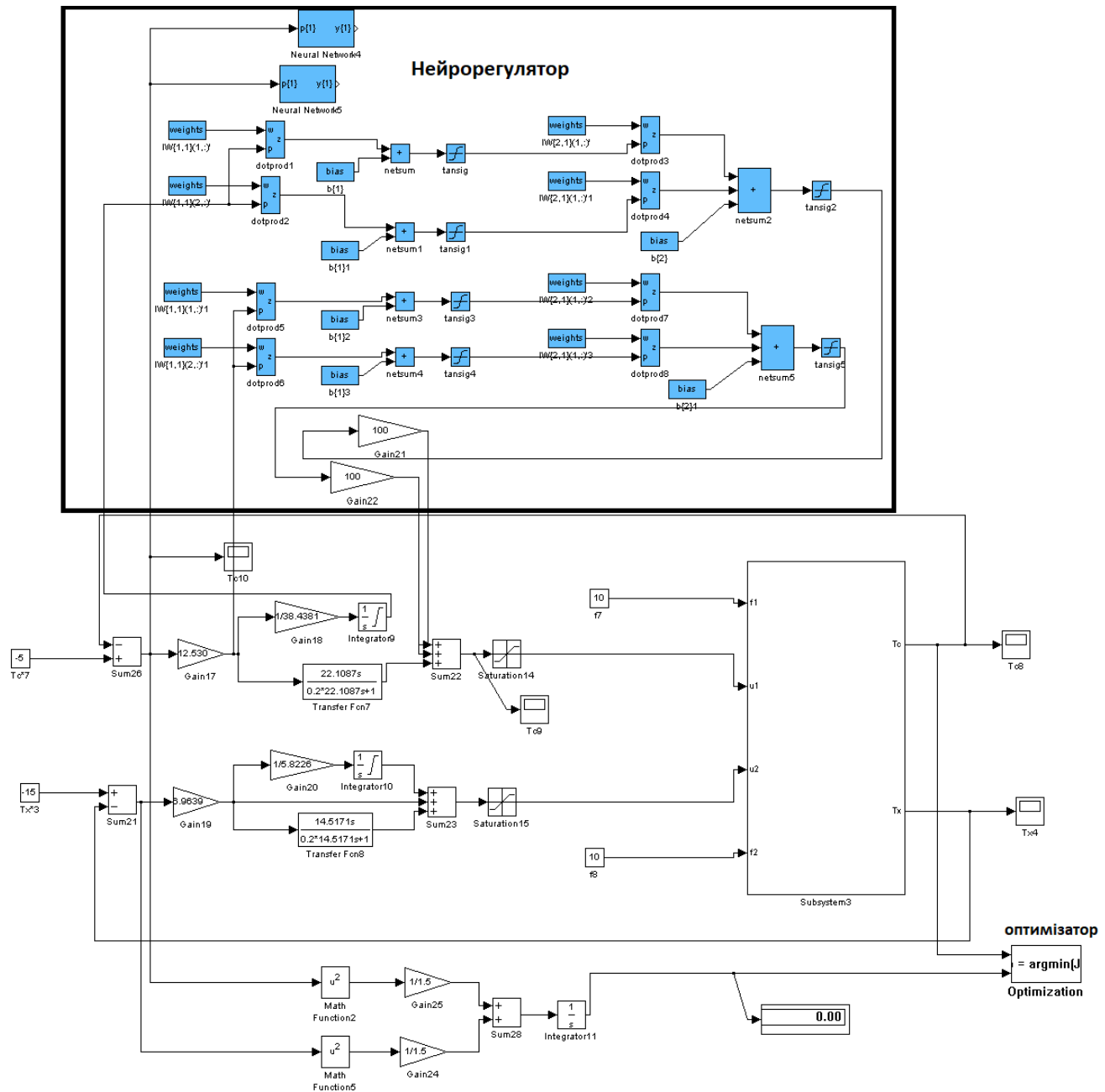
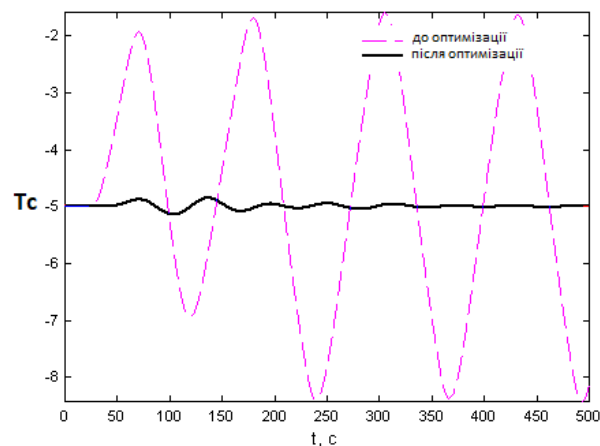


Рисунок 3.25 – Структурна схема САР з комбінованим регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи управління за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

На рисунку 3.24 бачимо, що нейронна мережа складається з двох шарів layer 1 , layer 2 які потім будуть синтезовані в системі регулювання, щоб налаштувати такі нелінійні перетворювачі, необхідно виконати оптимізацію САР.

У цій роботі була розроблена модель системи автоматичного регулювання (САР) з гібридним ПІД-регулятором та нелінійними перетворювачами, структурна схема якої наведена на рисунку 3.25, оптимізація моделі проводилася за тих самих умов, що й для системи зі стандартним ПІД-регулятором, значення параметрів ПІД-регулятора були визначені на етапі оптимізації стандартного регулятора та залишалися незмінними під час налаштування нелінійних перетворювачів.

Результати оптимізації представлені на рисунку 3.26, значення критерію якості роботи системи зменшилось, це свідчить про те що якість функціонування САР з гібридним регулятором мало чим відрізняється від САР зі стандартним ПІД регулятором, цей недолік усувається якщо виконати оптимізацію параметрів нелінійних перетворювачів за всіма коефіцієнтами міжнейронних зв'язків замість тільки коефіцієнтів першого шару.



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
k1	0.081736	-600.082	308242975055415600	600.082	до - 1621.6161
k2	-0.1343	-600.127	35699088703412600	600.127	після - 153.6431
k3	0.63007	-600.605	91184584354252600	600.605	оптимізації.
k4	-0.048342	-600.052	43323689102208600	600.052	Кількість кроків процедури оптимізації:
k5	-1.0502	-600.954	42208102953907600	600.954	Максимальне - 300
k6	-1.3563	-600.134	32236621437486600	600.134	Фактичне - 302

Рисунок 3.26 Вікно результатів параметричної оптимізації значень параметрів комбінованого регулятора САУ з каналом регулювання, що характеризуються нелінійною статичною характеристикою

Для визначення принципової придатності САР з комбінованим регулятором була проведена перевірка системи на грубість, згідно з перевіркою система є незначно грубою так само як система з традиційним ПІД регулятором, це можливо побачити якщо порівняти результати представлені на рисунках 3.5 та 3.27 – видно що де які перехідні процеси відповідають системам що знаходяться на границі стійкості, що вказує на те, що якість регулювання при зміні параметрів системи на $\pm 20\%$ значно погіршується що відповідає не грубій системі.

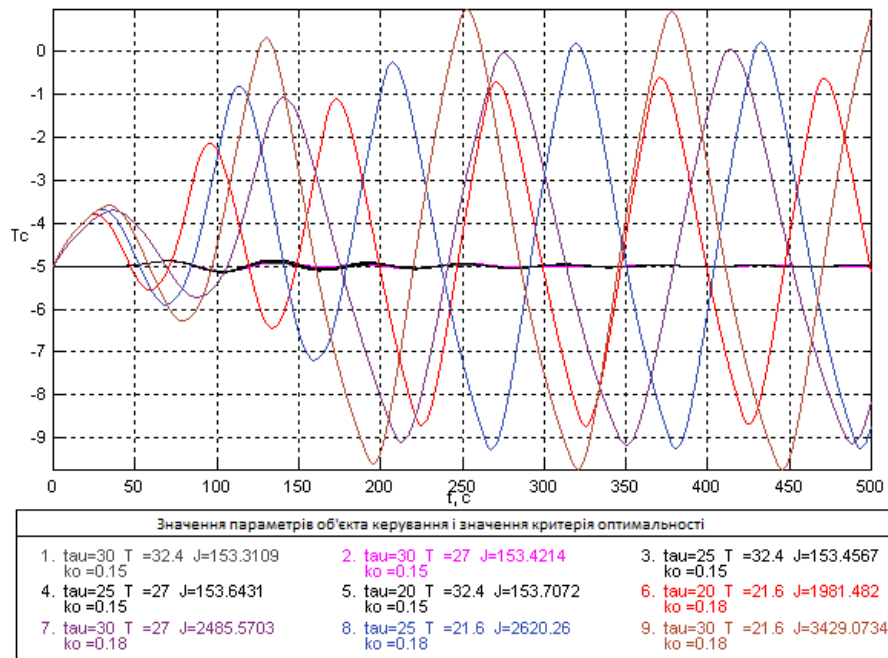


Рис. 3.27 – Вікно результатів перевірки на грубість САР з комбінованим ПІД регулятором

Для порівняльного аналізу в результаті моделювання отримані в одних осях перехідні характеристики в САР зі стандартним ПІД регулятором, САР з нечітким регулятором і САР з комбінованим регулятором, характеристики представлені на рисунку 3.28, з рисунку видно покращення якості регулювання за рахунок введення нелінійних перетворювачів до алгоритму регулювання, час регулювання помітно зменшився від 1800 секунд до 1400 сек. але за максимальним динамічним відділенням це не так помітно,

можливо ще більше покращити якість регулювання за рахунок інших схем нейромережевих алгоритмів керування які далі можливо синтезувати у рамках цієї роботи.

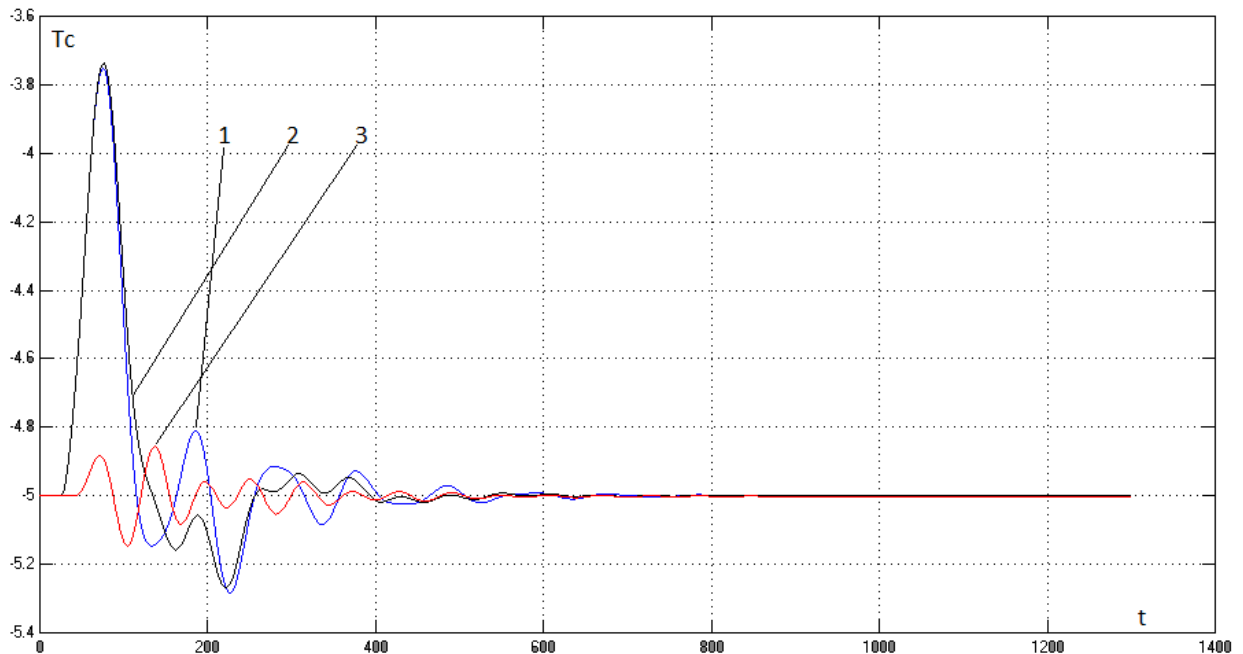


Рисунок 3.28 Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САР, графік 1 – перехідний процес в САР з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САР з нечітким регулятором; графік 3 –перехідний процес у САР з комбінованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж

3.8 Синтез моделі САР з нейрорегулятором як з альтернативним варіантом алгоритма управління

Нейрорегулятор використовується у нашому випадку як штучна нейронна мережа, що характеризується нелінійними характеристиками, таке його застосування на базі нейронної мережі дозволить досягти більш високих результатів в управлінні. Структура нейронної мережі програмування узяла

свій початок прямо з біології, вона представляє собою послідовність нейронів (нейронелементів), з'єднаних між собою синапсами. Найбільш поширена в використанні структура – багатошарова, застосовується в якості регуляторів нейромережових алгоритмів управління.

Оскільки нечіткий регулятор визначає приріст керуючої дії як додатне, так і від'ємне значення, під час синтезу нейронного регулятора необхідно обрати функції активації нейронів, які приймають значення в діапазоні від -1 до 1. У цьому випадку використовується гіперболічна тангенсоїдна функція активації (*tansig*), вона дозволяє отримувати вихідні значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що є важливим для роботи системи управління. Графічне зображення цієї функції наведено на рисунку 3.29.

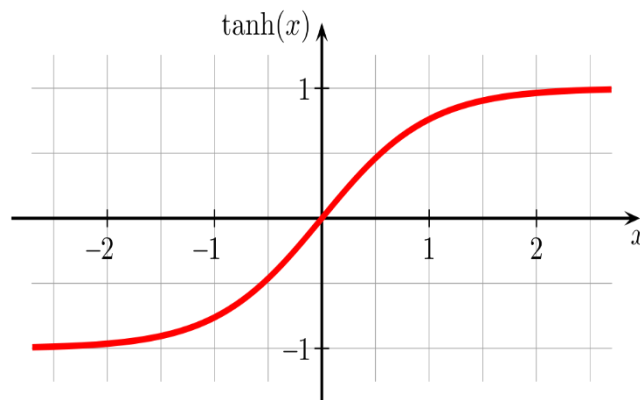


Рисунок 3.29. Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

В одній із перших робіт з нейроуправління була представлена дискретна система управління (СУ) з нейроконтролером (НК), який отримує на вхід сигнал керування системою $u_r(k)$ і затримані на кілька тактів сигнали з виходу об'єкта управління. У загальному випадку такий НК може також отримувати затримані сигнали зі свого власного виходу (рисунок 3.30). Таким чином, нейроконтролер формує керуючий вплив за наступним законом:

40

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

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

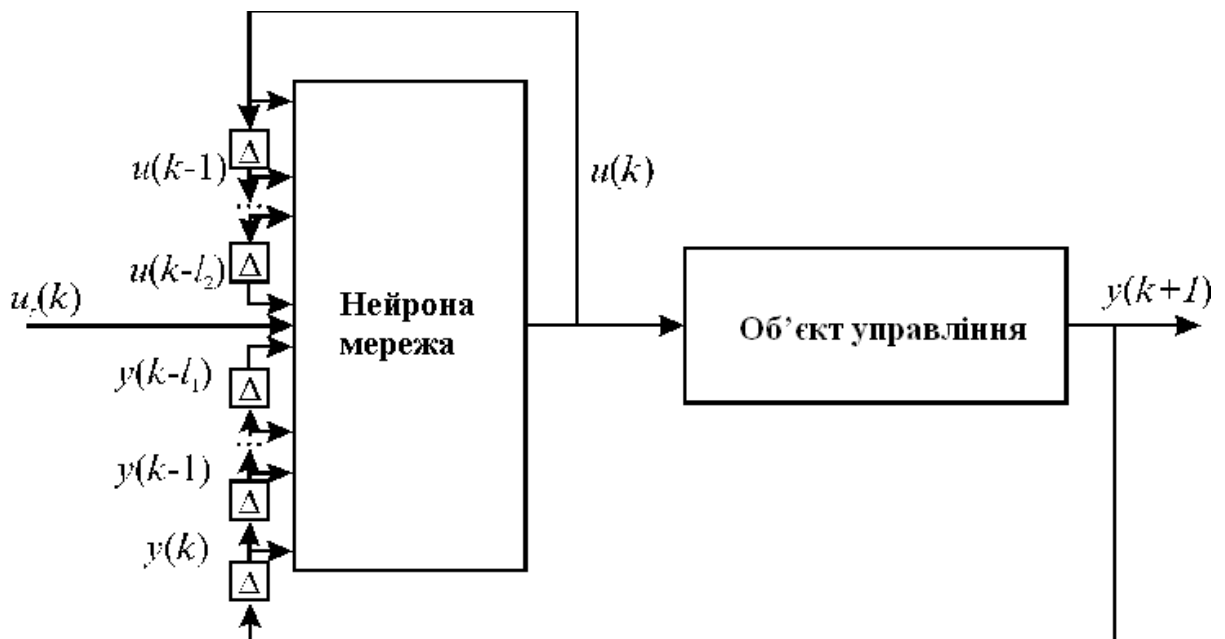


Рисунок 3.30 Система керування з нейроконтролером

Якщо перший тип САР у рамках класичного підходу з комбінованим регулятором є компромісним розв'язком, то другий тип що представлений на рисунку 3.30 побудований тільки на ШНМ.

В цьому другому випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.31.

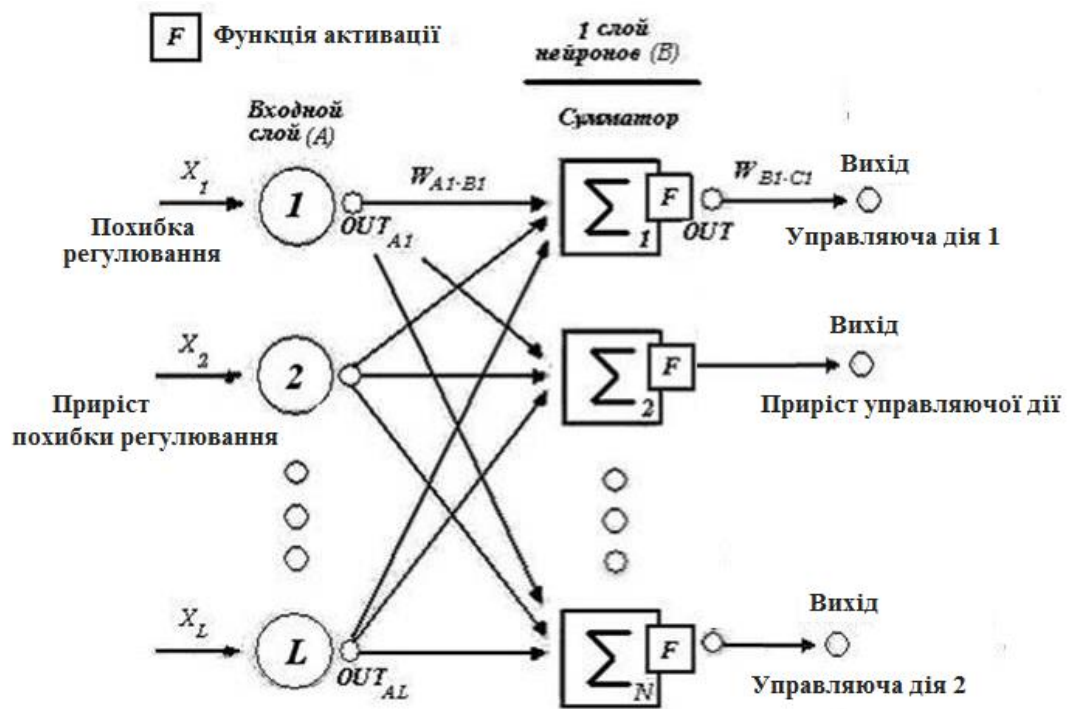


Рис. 3.31 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

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

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

Такий функціонал відповідає за поточний стан системи як показано на рисунку 3.32.

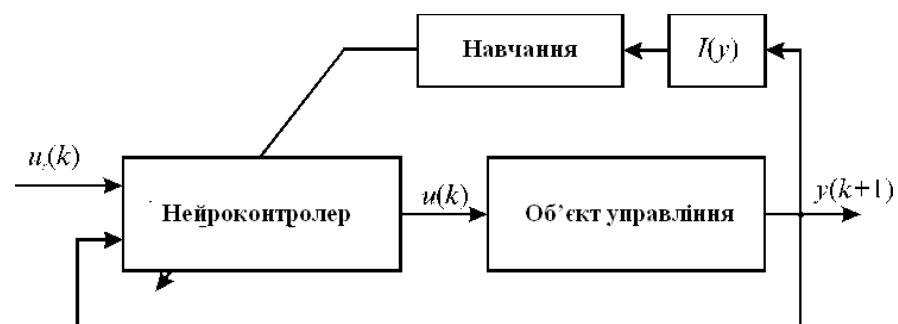


Рисунок 3. 32 Нейромережева система керування з екстремальним показником якості регулювання

Альтернативою нейромережевого алгоритму управління буде система з регулятором із прогнозуванням. Такий регулятор, відомий під назвою NN Predictive Controller, він використовує модель об'єкта управління на основі нейронної мережі для передбачення його майбутньої поведінки. Алгоритм оптимізації розраховує керуючі сигнали, які мінімізують різницю між бажаними та фактичними змінами вихідного сигналу моделі, оптимізуючи таким чином поведінку об'єкта на заданому часовому інтервалі, саме проектування нейрорегулятора складається з двох етапів: етап ідентифікації об'єкта управління нейрорегулятора і етапу синтезу закону управління.

На етапі ідентифікації розробляється модель об'єкта у вигляді нейронної мережі, яка на етапі синтезу буде використана для синтезу самого регулятора. Схема підсистеми ідентифікації показана на рис. 3.33, в неї входить модель об'єкта управління у вигляді нейронної мережі, яка повинна бути навчена в автономному режимі таким чином, щоб мінімізувати помилку між реакціями об'єкта і моделі на послідовність пробних сигналів u . Структурна схема на рисунку 3.34 ілюструє процес управління з прогнозом.

Сам по собі регулятор складається з нейромережевої моделі керованого об'єкта і блоку оптимізації, блок оптимізації визначає значення, задача яких мінімізувати критерій якості управління, а відповідний керуючий сигнал управляє процесом.

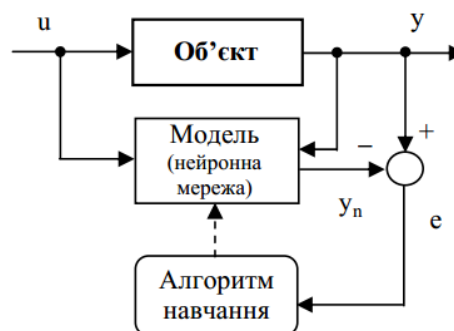


Рис. 3.33 Схема підсистеми ідентифікації

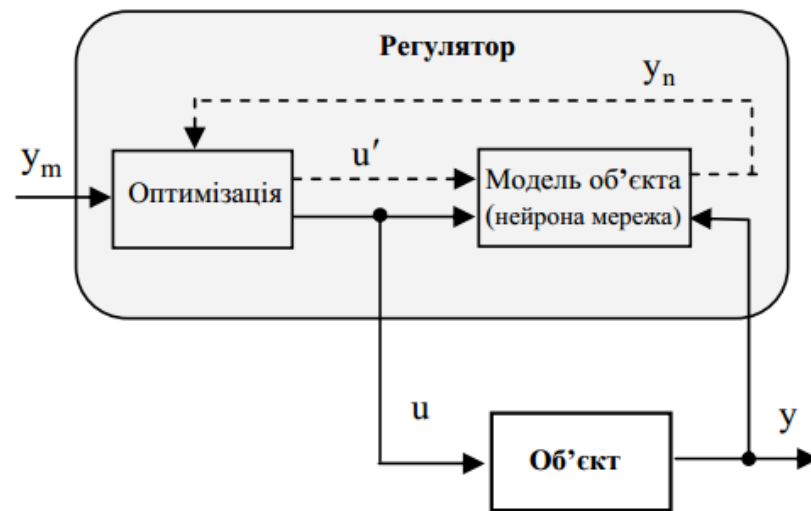


Рис. 3.34 Структурна схема системи з регулятором, що використовує принцип передбачення

У другому варіанті нейромережевого алгоритму управління нейрорегулятор можна попередньо налаштувати за допомогою методу зворотного поширення помилки. Для цього необхідно визначити кількість похибок регулювання, які будуть використовуватися для навчання нейронної мережі. На рисунку 3.35 показано похибки на кожному нейроні, які враховуються для коригування ваг за методом зворотного поширення. Якщо така структура виявиться недостатньою, може знадобитися збільшення кількості нейронів у вхідному шарі мережі, а також розширення структури мережі до трьох шарів.

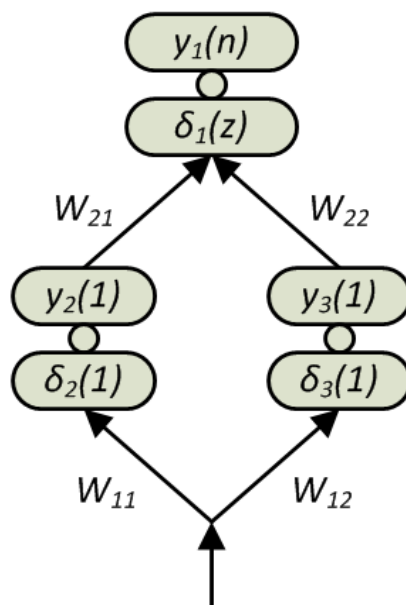


Рисунок 3.35 Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

За методом зворотного поширення було використано програмне середовище MATLAB, для визначення ваг між нейронними з'єднаннями, це дозволить згенерувати задану нейронну мережу на базі вхідних і вихідних значень сигналів, для тренування нейронної мережі необхідно спочатку вказати вхідні і вихідні значення сигналів нейрорегулятора, а точніше, значення похибок регулювання і приріст управляючого впливу.

Штучна нейронна мережа, яка виконує роль регулятора, була синтезована на базі характеристик нечіткого логічного регулятора. Ці характеристики представляються у табличній формі у вигляді вхідних і вихідних значень нечіткого регулятора (таблиця 2). Дані, представлені у таблиці 2, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

Далі у середовищі MATLAB створюється М-файл, у якому прописуються команди для створення та навчання нейрорегулятора. Вхідні та вихідні дані для нейрорегулятора визначаються на основі характеристик нечіткого логічного регулятора, отриманих зі схеми моделювання, наведеної на рисунку 3.36.

№	l	u	Δu
1	-1,5	-0.15	-0.05
2	-0,5	-0.05	-0.01667
3	-0,2	-0.02	-0.00667
4	- 0,05	-0.005	-0.00167
5	0	0	0
6	0,05	0.05	0.00167
7	0,2	0.02	0.00667
8	0,5	0.05	0.01667
9	1,5	0.15	0.05

Таблиця 2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

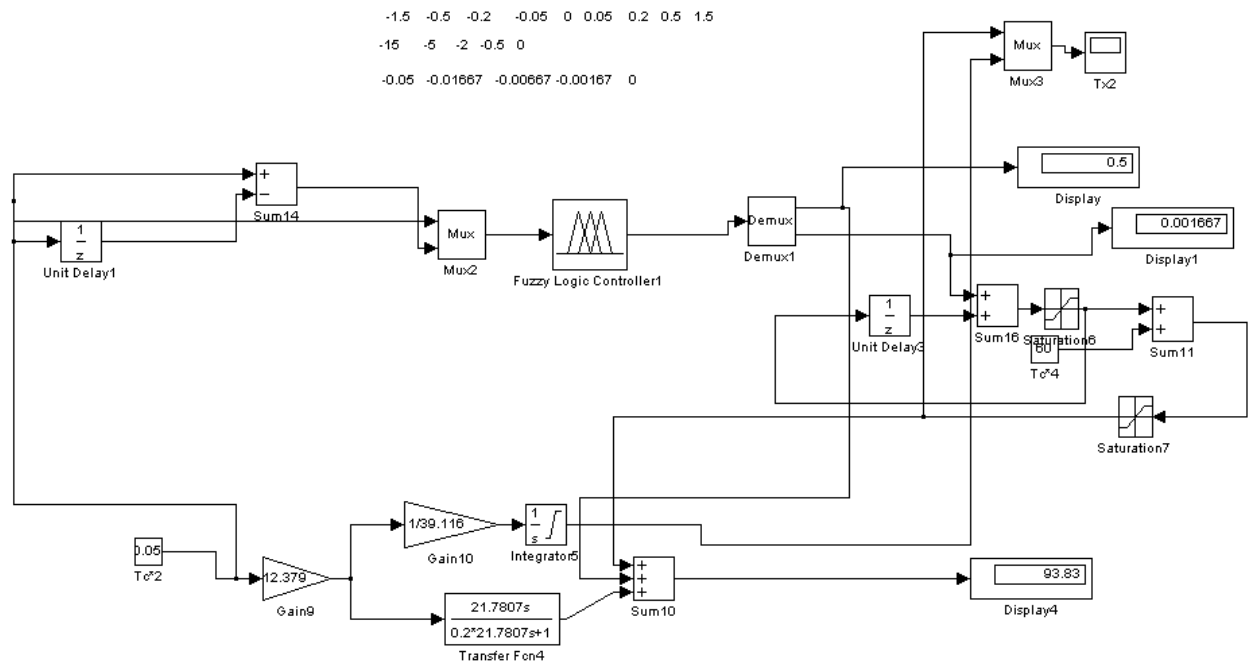


Рисунок. 3.36 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі.

У М-файлі було записано виконуваний код, який представлено на рисунках 3.37 і 3.38 для інтегральної та пропорційної складових регулятора відповідно. Цей код також можна ввести безпосередньо в командному рядку MATLAB (Command Window), у результаті чого буде згенеровано відповідну нейронну мережу.

```
» p=[-1.5 -0.5 -0.2 -0.05 0 0.05 0.2 0.5 1.5];
```

```
» t=[-0.15 -0.05 -0.02 -0.005 0 0.005 0.02 0.05 0.15];
```

```
» net=newff([-2 2], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
```

```
» net.trainParam.epochs=200;
```

```
» net=train(net, p, t);
```

```
TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 0.652491/0, Gradient 4.18448/1e-010
```

```
TRAINLM, Epoch 25/200, MSE 3.36487e-007/0, Gradient 0.000345737/1e-010
```

```
TRAINLM, Epoch 50/200, MSE 9.57545e-008/0, Gradient 5.28378e-005/1e-010
```

```
TRAINLM, Epoch 75/200, MSE 4.66314e-008/0, Gradient 1.86685e-005/1e-010
```

```
TRAINLM, Epoch 100/200, MSE 2.69735e-009/0, Gradient 4.4559e-005/1e-010
```

```
TRAINLM, Epoch 125/200, MSE 4.21469e-010/0, Gradient 5.28719e-006/1e-010
```

TRAINLM, Epoch 150/200, MSE 4.10186e-012/0, Gradient 1.01247e-006/1e-010

TRAINLM, Epoch 175/200, MSE 3.52338e-012/0, Gradient 8.58077e-007/1e-010

TRAINLM, Epoch 200/200, MSE 3.02926e-012/0, Gradient 7.27937e-007/1e-010

TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, p)

a =

Columns 1 through 7

-0.1500 -0.0500 -0.0200 -0.0050 -0.0000 0.0050 0.0200

Columns 8 through 9

0.0500 0.1500

» gensim(net)

```

» p=[-1.5 -0.5 -0.2 -0.05 0 0.05 0.2 0.5 1.5];
» t=[-0.15 -0.05 -0.02 -0.005 0 0.005 0.02 0.05 0.15];
» net=newff([-2 2], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=200;
» net=train(net, p, t);
TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 0.652491/0, Gradient 4.18448/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/200, MSE 3.36487e-007/0, Gradient 0.000345737/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/200, MSE 9.57545e-008/0, Gradient 5.28378e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/200, MSE 4.66314e-008/0, Gradient 1.86685e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/200, MSE 2.69735e-009/0, Gradient 4.4559e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/200, MSE 4.21469e-010/0, Gradient 5.28719e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/200, MSE 4.10186e-012/0, Gradient 1.01247e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/200, MSE 3.52338e-012/0, Gradient 8.58077e-007/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/200, MSE 3.02926e-012/0, Gradient 7.27937e-007/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

```

» a=sim(net, p)

a =

Columns 1 through 7

-0.1500 -0.0500 -0.0200 -0.0050 -0.0000 0.0050 0.0200

Columns 8 through 9

0.0500 0.1500

» gensim(net)

Рисунок 3.37 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

» p=[-1.5 -0.5 -0.2 -0.05 0 0.05 0.2 0.5 1.5];
» t=[-0.05 -0.01667 -0.00667 -0.00167 0 0.00167 0.00667 0.01667 0.05];
» net=newff([-2 2], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=200;
» net=train(net, p, t);

TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 0.653797/0, Gradient 4.10378/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/200, MSE 4.46827e-008/0, Gradient 0.000175123/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/200, MSE 1.63948e-008/0, Gradient 3.44061e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/200, MSE 9.74502e-009/0, Gradient 1.45664e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/200, MSE 6.84689e-009/0, Gradient 8.09677e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/200, MSE 5.24011e-009/0, Gradient 5.17961e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/200, MSE 4.22441e-009/0, Gradient 3.61079e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/200, MSE 3.52675e-009/0, Gradient 2.66752e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/200, MSE 3.0192e-009/0, Gradient 2.05485e-006/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, p)

a =

Columns 1 through 7

-0.0500 -0.0166 -0.0066 -0.0017 -0.0000 0.0017 0.0066

Columns 8 through 9

0.0166 0.0500

» gensim(net)

```

```

» p=[-1.5 -0.5 -0.2 -0.05 0 0.05 0.2 0.5 1.5];
» t=[-0.05 -0.01667 -0.00667 -0.00167 0 0.00167 0.00667 0.01667 0.05];
» net=newff([-2 2], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=200;
» net=train(net, p, t);
TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 0.653797/0, Gradient 4.10378/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/200, MSE 4.46827e-008/0, Gradient 0.000175123/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/200, MSE 1.63948e-008/0, Gradient 3.44061e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/200, MSE 9.74502e-009/0, Gradient 1.45664e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/200, MSE 6.84689e-009/0, Gradient 8.09677e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/200, MSE 5.24011e-009/0, Gradient 5.17961e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/200, MSE 4.22441e-009/0, Gradient 3.61079e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/200, MSE 3.52675e-009/0, Gradient 2.66752e-006/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/200, MSE 3.0192e-009/0, Gradient 2.05485e-006/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, p)

a =

Columns 1 through 7

    -0.0500    -0.0166    -0.0066    -0.0017    -0.0000     0.0017     0.0066

Columns 8 through 9

     0.0166     0.0500

» gensim(net)
»

```

Рисунок 3.38 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

У представленому виконуваному коді змінна p відповідає вхідним значенням нейромережі (похибкам регулювання), а змінна t — відповідним вихідним значенням нейромережі. На третій стрічці задаються діапазон, кількість шарів нейромережі та функції активації. Крім того, визначається кількість етапів навчання, команда для навчання нейромережі та її генерації.

Характеристики точності навчання наведені на рисунку 3.39, де видно, що корекція ваг між з'єднаннями нейронів завершилася приблизно на 40-му етапі навчання. Під час генерації нейромережі в головному вікні MATLAB відображаються фактичні значення вихідного сигналу для кожного вихідного нейрона мережі. На рисунках 3.40 і 3.41 показано бажані та фактичні значення вихідного сигналу відповідних нейронів, які відтворюють інтегральну (I) та пропорційну (P) складові нейрорегулятора вологості окремо.

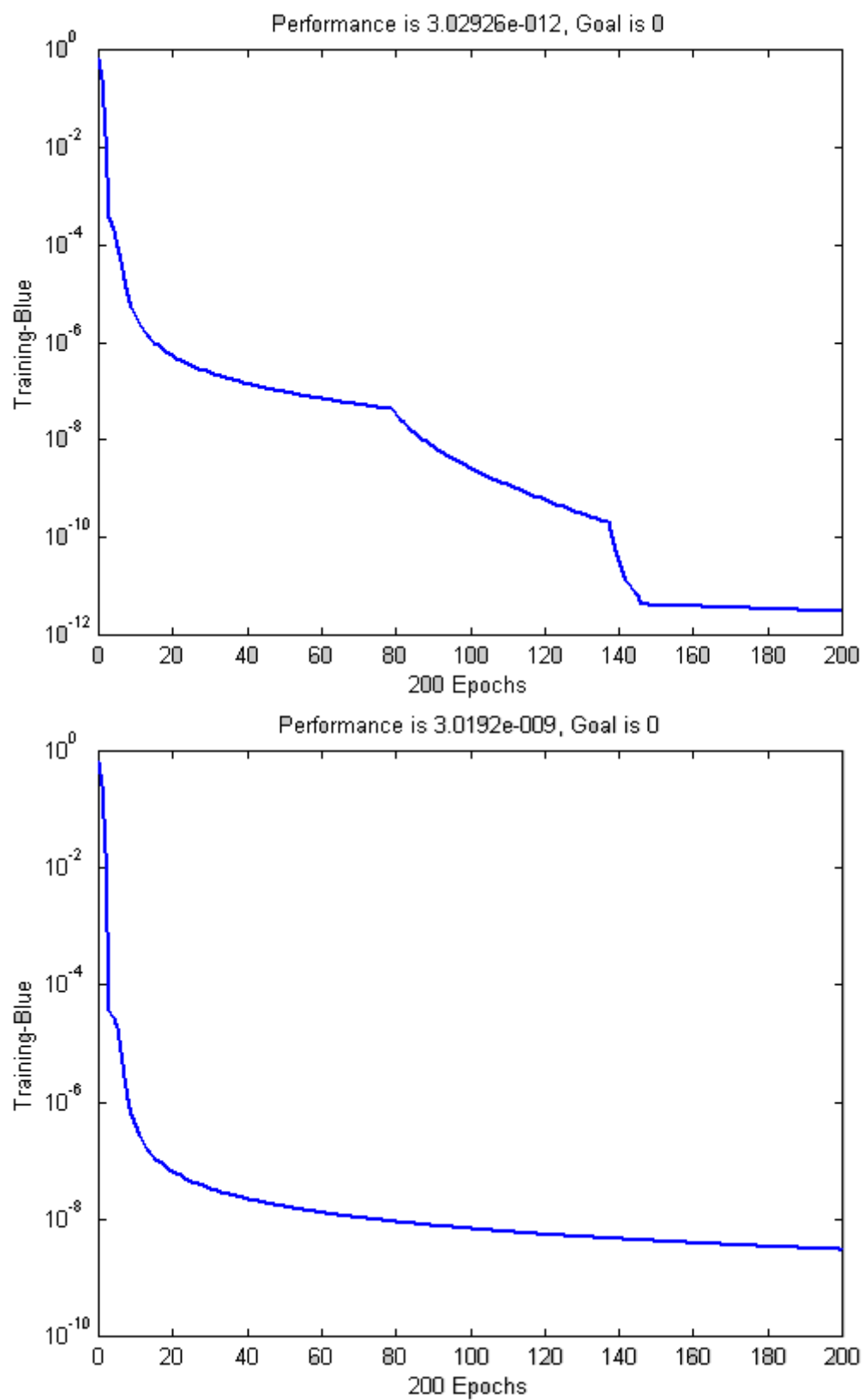


Рисунок 3.39 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Фактичні значення:									
-0.0500	-0.0166	-0.0066	-0.0017	0.0000	0.0017	0.0066	0.0500	0.0166	
Бажані значення:									
-0.05	-0.01667	-0.00667	-0.00167	0	0.00167	0.00667	0.01667	0.05	

Рисунок 3.40 - бажані та фактичні значення вих. сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює І – складову нейрорегулятора

Фактичні значення:									
-0,1500	-0,0500	-0,0200	-0,0050	0,0000	0,1500	0,0500	0,0200	0,0050	
Бажані значення:									
-0.15	-0.05	-0.02	-0.005	0	0.005	0.02	0.05	0.15	

Рисунок 3.41 - бажані та фактичні значення вих. сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює ІІ – складову нейрорегулятора

На основі даних, наведених на рисунках 3.40 і 3.41, розраховуються похибки для вихідного шару та для і-тих нейронів прихованого шару нейронної мережі за методом зворотного поширення помилки. Ці розрахунки використовуються для оцінки якості навчання нейронної мережі.

Відповідно до методу зворотного поширення помилки, похибка для вихідного шару нейронної мережі визначається за формулою (1):

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

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

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

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

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

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

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

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 3.40:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) \\ &= (-0.0017 + 0.00167) * (-0.0017) * (1 + 0.0017) \\ &= 0.000000051 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) \\ &\quad * 0.000000051 = -0.000000000858 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) \\ &\quad * 0.000000051 = -0.000000002115 \end{aligned}$$

Розрахунок помилок для I – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned}\delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * (y_1(n)(1 - y_1(n))) \\ &= (0.05 - 0.02) * (0.05) * (1 - 0.05) = 0.001425\end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i-тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned}\delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) \\ &= 0,9599 * (1 - 0,9599) * 7,3655548636428527 * 0.001425 \\ &= 0,000403214\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) \\ &= 0,9766 * (1 - 0,9766) * (-7,3307275810928836) \\ &\quad * 0.001425 = -0,0002387\end{aligned}$$

З результатів розрахунків бачимо, що помилки є практично нульовими, отже ними можна знехтувати і не проводити розрахунок значень наведеної погрішності.

Сформовані нейронні мережі були інтегровані в схему моделювання замість нечіткого регулятора, як показано на рисунку 3.13. Таким чином, у середовищі MATLAB/Simulink була синтезована модель САР із нейрорегулятором. Фрагмент структурної схеми цієї моделі наведено на

рисунку 3.42.

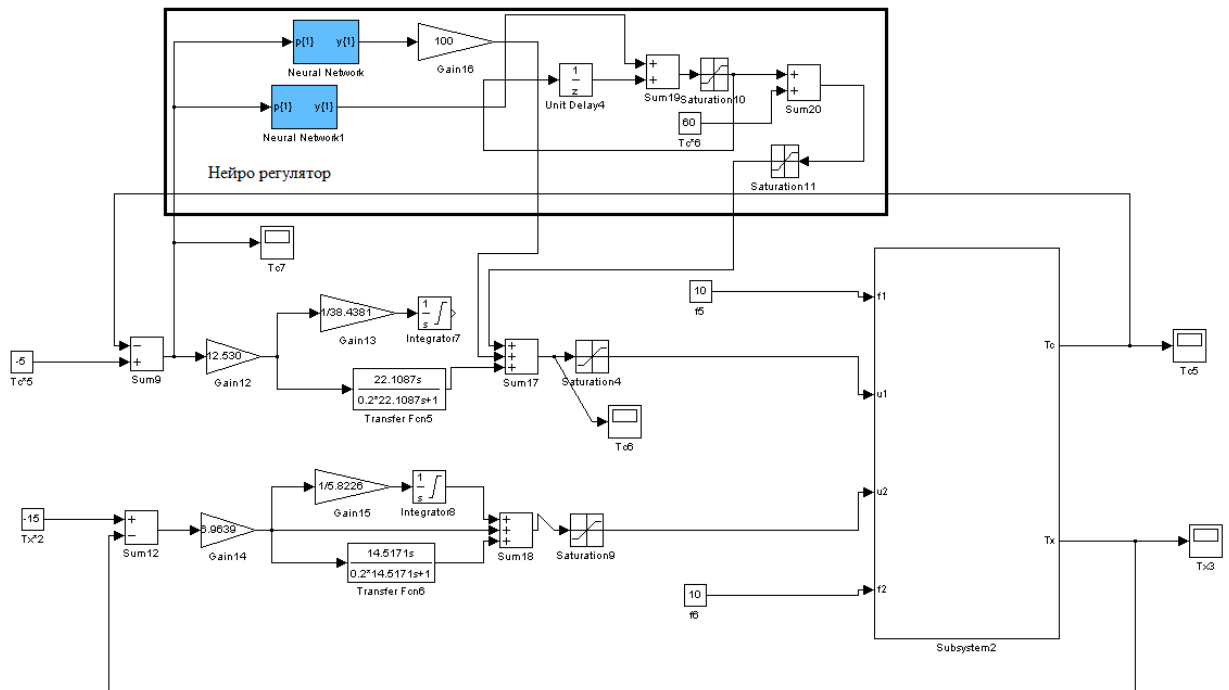


Рисунок 3.42 – Структурна схема моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

Використовуючи дані з сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, яка представлена на рисунку 3.43, є розгорнутою схемою, представленої на попередньому рисунку 3.42.

У результаті моделювання САР із нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів за тих самих умов, що використовувалися для моделювання САР із нечітким регулятором та традиційним ПІД-регулятором. Ці графіки наведені на рисунку 3.44. З аналізу перехідних процесів видно, що за якістю регулювання САР із нейрорегулятором демонструє дещо гірші результати порівняно з САР із нечітким регулятором.

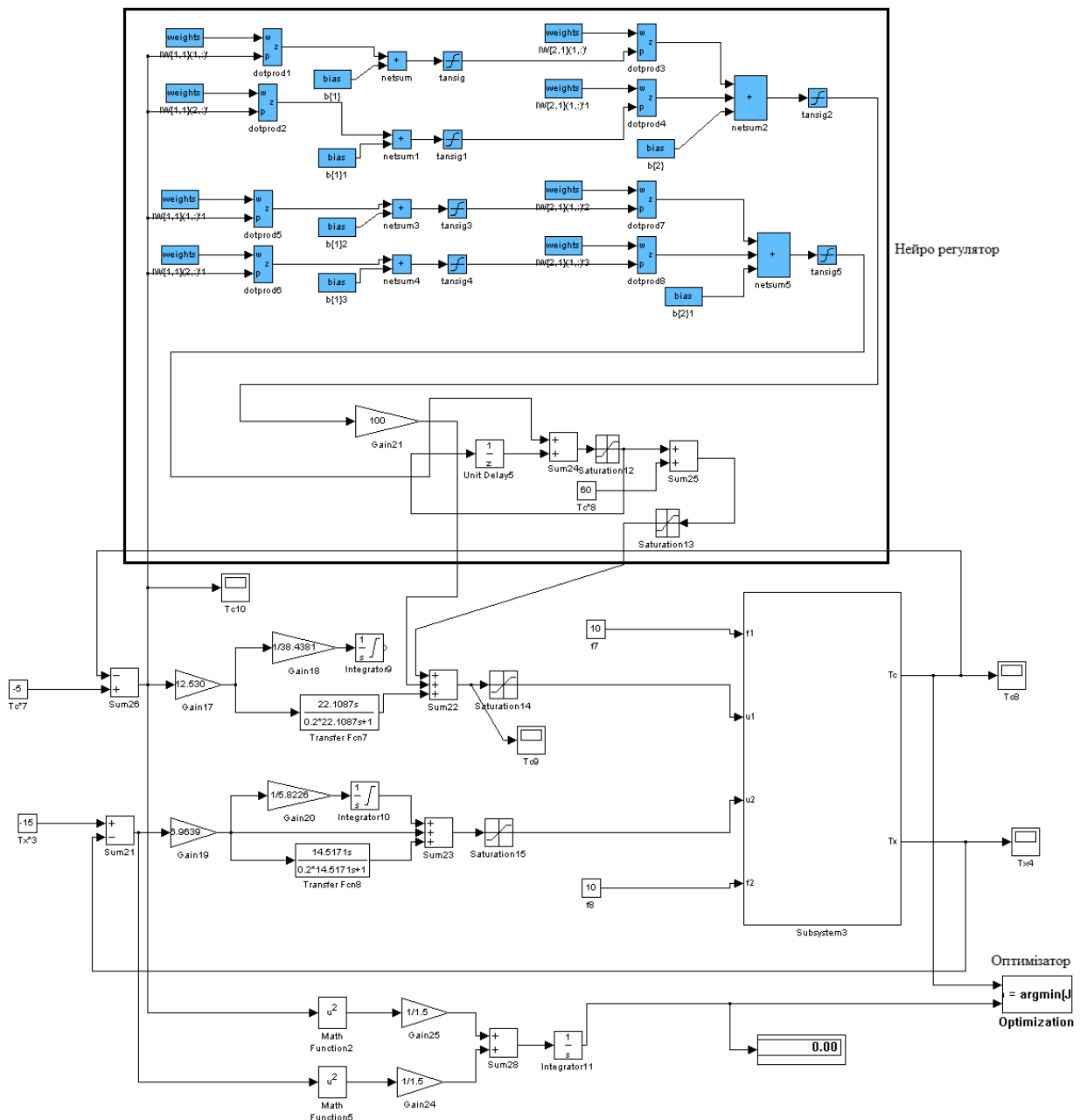


Рисунок 3.43 – Схема моделювання нейронного регулятора

Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування складає 2000 секунд при САР з нечітким та традиційним ПД регулятором, і 1800 секунд, для САР з нейронним регулятором, максимальне динамічне відхилення при детермінованому збуренні значно більше в САР з нейрорегулятором, як видно на рисунку 3.44. Попри це регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має 8-м ваг між нейронних з'єднань, параметри яких можна оптимізувати для покращення якості

регулювання, також видно з рисунку 3.43, що є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

Можна зробити висновок, що для оцінки доцільності застосування різних САР необхідно оптимізувати нейрорегулятор за тими ж умовами, що й традиційний ПД-регулятор, щоб отримати остаточний висновок щодо ефективності регулювання в різних системах.

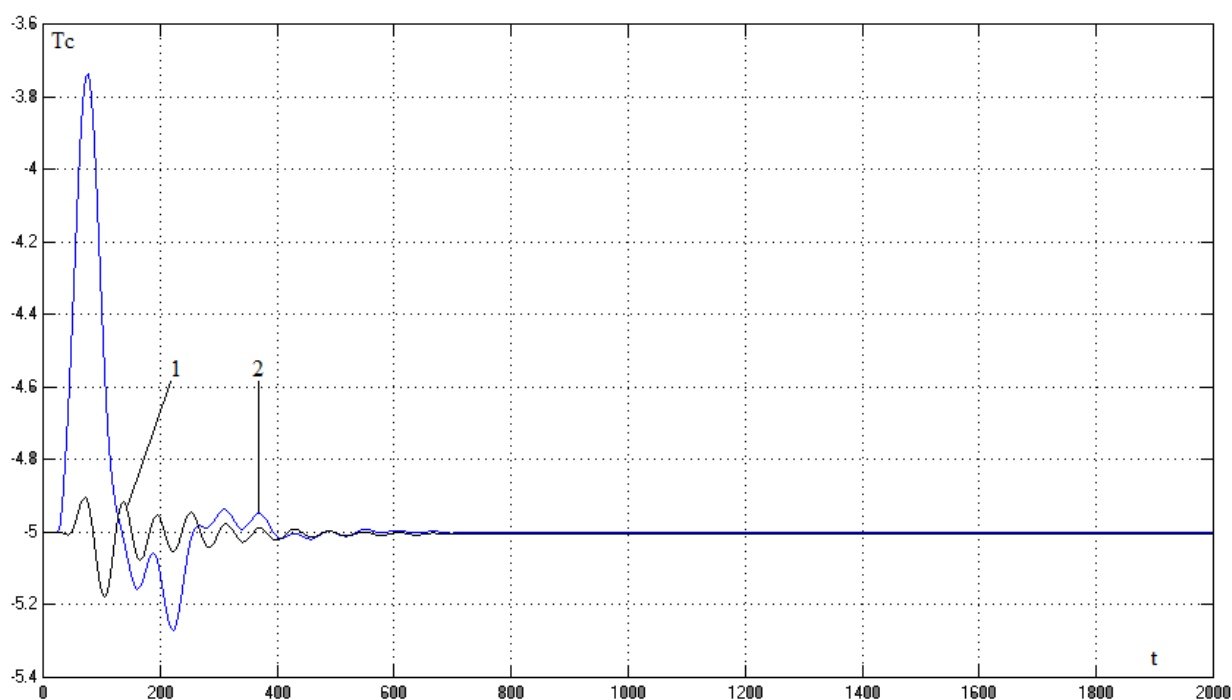


Рисунок 3.44. Графіки переходних процесів, отримані в результаті моделювання різних САР, графік 1 – перехідний процес у САР з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж; графік 2 – перехідний процес у САР з нечітким регулятором.

3.9 Параметрична оптимізація САР з нейрорегулятором

Для покращення якості регулювання в роботі була проведена параметрична оптимізація САР з нейрорегулятором. Оптимізувалися чотири параметри налаштування нейрорегулятора — вагові коефіцієнти нейронних з'єднань між першим вхідним шаром штучної нейронної мережі. Оптимізація

нейрорегулятора проводилася за тими ж умовами, що й оптимізація САР з традиційним ПІД-регулятором.

Інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний таким самим, як і при оптимізації САР з традиційним ПІД-регулятором. У програмному середовищі MATLAB/Simulink 5.2 була розроблена модель САР з нейрорегулятором та параметричним оптимізатором, структурну схему якої показано на рисунку 3.45.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні значення ваг між нейронними з'єднаннями першого шару нейронної мережі. Графіки перехідних процесів і значення вагових коефіцієнтів відображено у відповідному вікні результатів оптимізації на рисунку 3.46. Цей результат був отриманий після кількох етапів оптимізації САР з ПІД-регулятором за визначеним інтегральним критерієм якості роботи системи.

Згідно з порівнянням рисунків 3.4 та 3.46, видно, що вдалося значно покращити якість регулювання, порівнявши значення інтегральних критеріїв якості роботи системи. Інтегральний показник для САР з ПІД-регулятором становить 191,8, а для САР з нейрорегулятором — 153,9, можливе і подальше покращення роботи нейрорегулятора за рахунок додаткової оптимізації обраних вагових коефіцієнтів, а також вагових коефіцієнтів між нейронними з'єднаннями вихідного шару нейронної мережі.

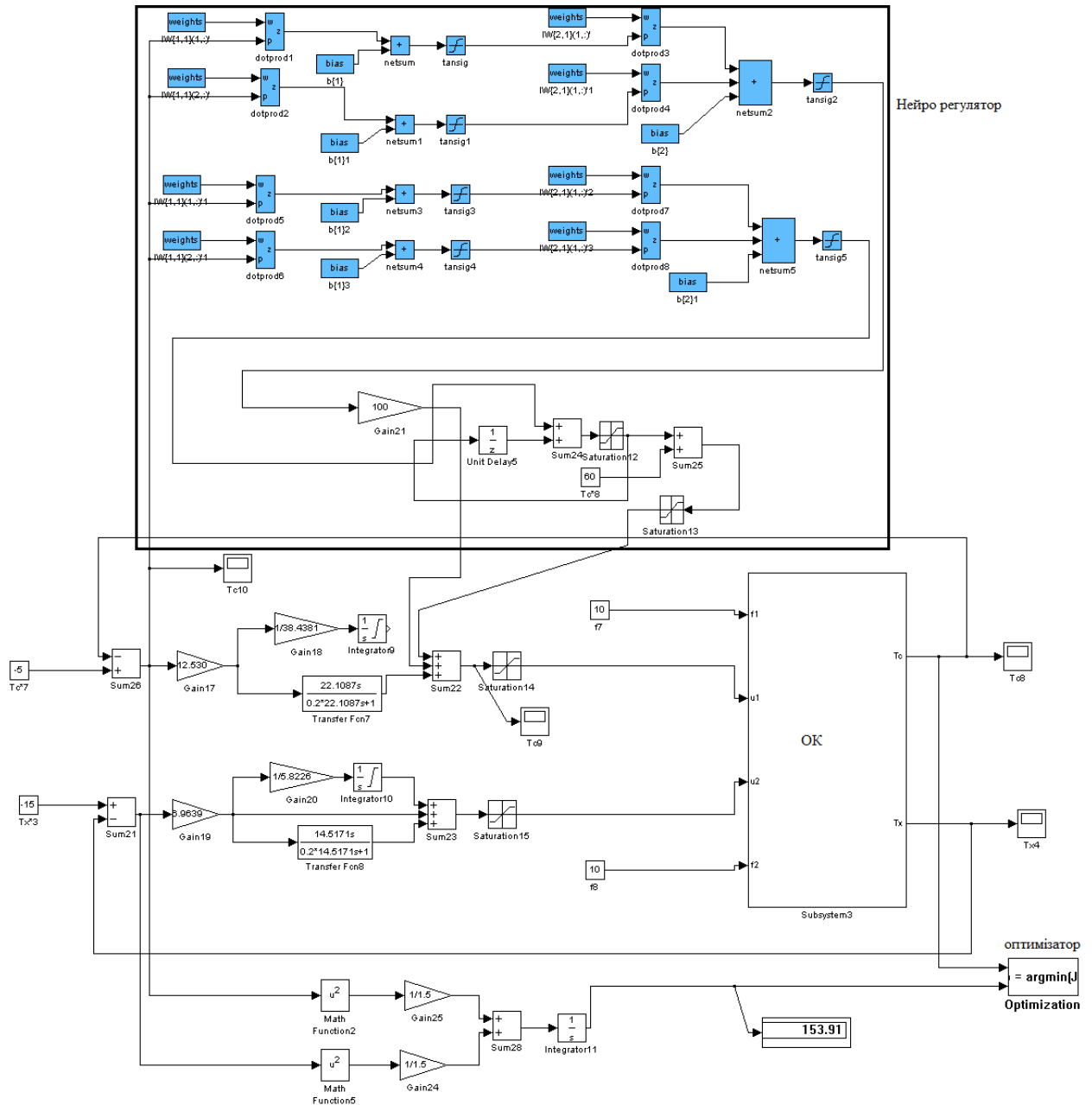


Рисунок 3.45 – Структурна схема моделі САР з нейронним регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи управління за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

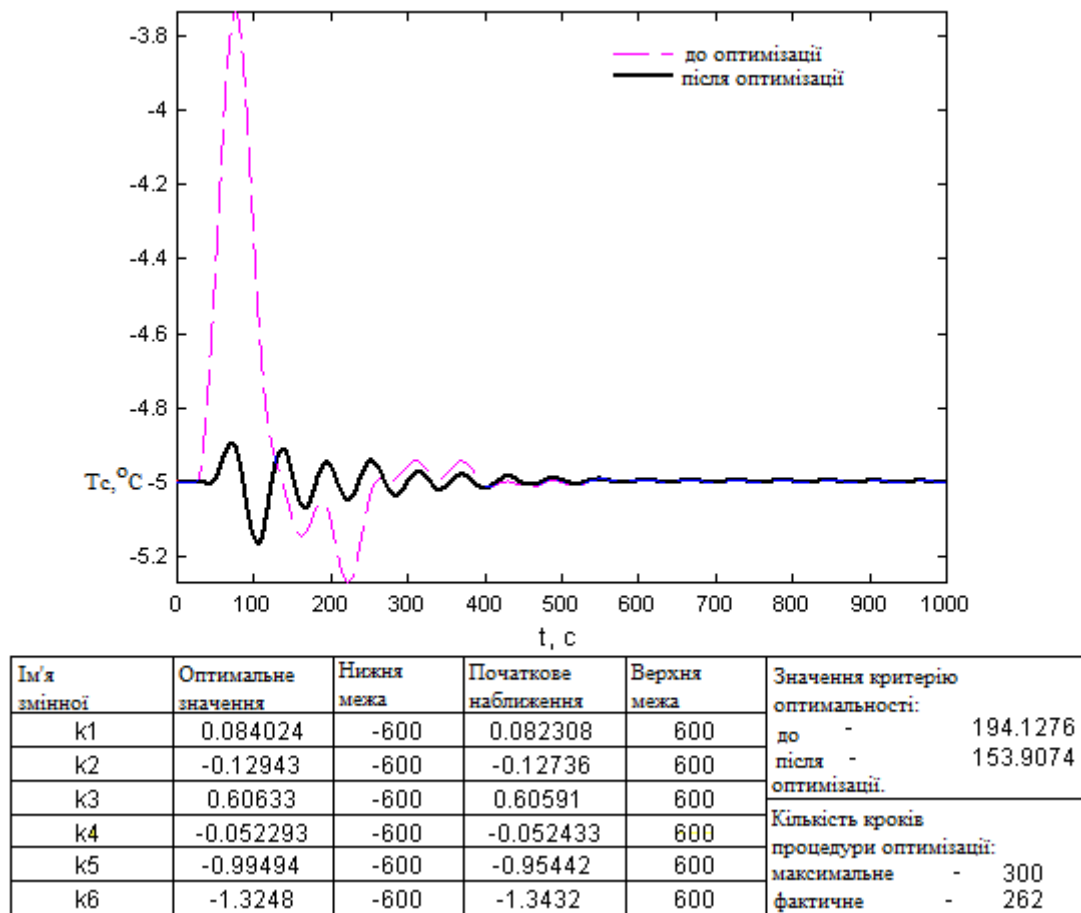


Рисунок 3.46 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

Результати параметричної оптимізації показують, що на відміну від традиційного нечіткого регулятора, нейрорегулятор має значно більшу гнучкість у налаштуванні для роботи з обраним об'єктом, який має нелінійну статичну характеристику каналів регулювання. Для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора необхідно визначити, чи не втрачає стійкість САР при змінах параметрів системи в межах відхилення +/- 20% від значень, визначених на етапі розробки моделі.

Після параметричної оптимізації система була перевірена на грубість для оцінки її придатності при використанні оптимізованого нейрорегулятора, що показано на рисунку 3.47. Параметри перевірки на грубість залишаються такими ж, як і в попередньому випадку, коли проводилася перевірка системи з ПД-регулятором.

Перевірка на грубість показала, що система з нейрорегулятором стала значно грубішою порівняно з попереднім випадку, особливо в каналі регулювання, що характеризується нелінійною статичною характеристикою, порівнявши результати на рисунках 3.5 та 3.47. Як показано на рисунку 3.5, система з ПД-регулятором є не грубою, що пояснюється тим, що нейрорегулятор є нелінійним елементом, який після оптимізації можна підлаштувати до роботи з каналом регулювання, що має нелінійну статичну характеристику.

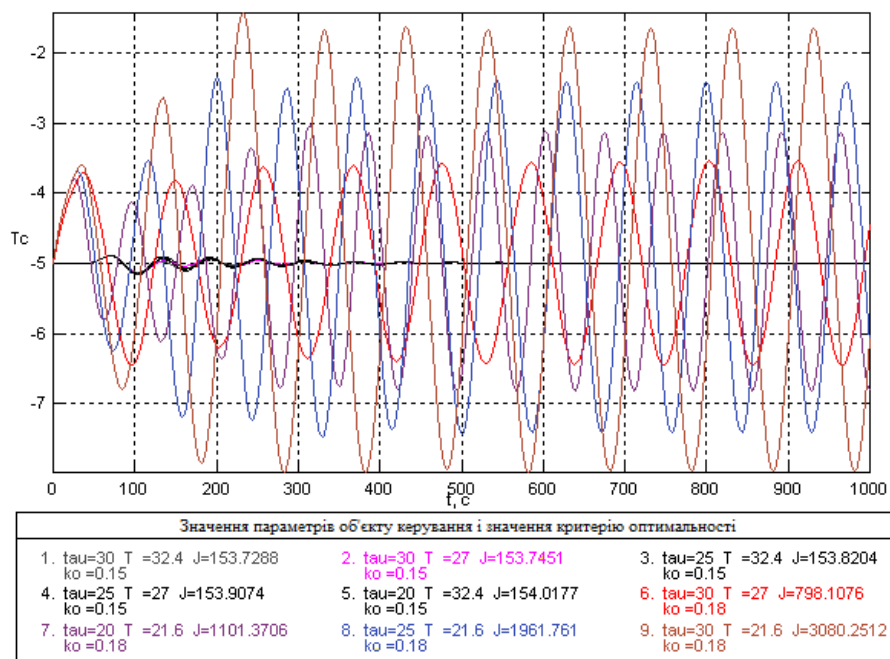


Рис. 3.47 – Вікно результатів перевірки на грубість САР з нейрорегулятором

Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, показав, що система не втрачає стійкість при різних параметрах у діапазоні $\pm 20\%$. Отже синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролера для практичного застосування його у відповідній системі управління.

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

На заключному етапі розробки САР було проведено порівняльний аналіз ефективності різних САР за критерієм якості регулювання, у процесі моделювання були отримані графіки перехідних процесів для різних САР, які демонструють вихід системи на номінальний режим функціонування, проаналізувавши графіки видно, що час регулювання до досягнення стабільного номінального режиму значно зменшився в системі з регулятором, побудованим на основі штучної нейронної мережі.

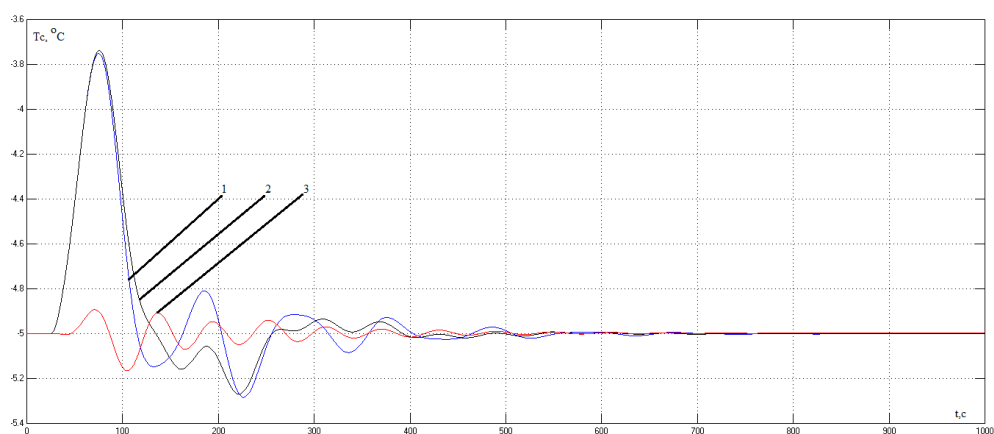


Рисунок 3.48. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САР, графік 1 – перехідний процес в САР з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 –перехідний процес у САР з нечітким регулятором графік; 3 – перехідний процес у САР з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж;

На основі аналізатора ймовірнісних характеристик, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, була визначена якість регулювання різних САР під час впливу випадкових збурень. У цьому випадку було порівняно середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання для різних САР при випадкових збуреннях. Результати наведені на рисунку 3.49, де показано вікно результатів аналізу з середніми квадратичними відхиленнями та математичними очікуваннями значень похибки регулювання для різних САР.

З рисунку 3.49 можна зробити висновок, що за середнім квадратичним відхиленням САР з традиційним ПІД-регулятором та САР з нейронним регулятором функціонують майже однаково, тоді як САР з нечітким регулятором демонструє дещо гірші результати. У підсумку, показники якості регулювання для різних САР були зведені в таблицю 3.

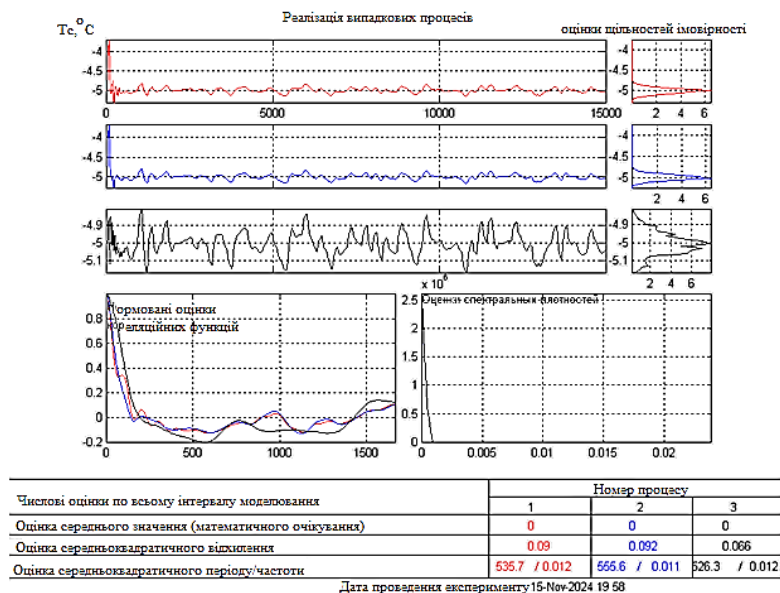


Рисунок 3.49 - Вікно результатів аналізу аналізатора ймовірнісних характеристик

САР	САР з традиційним ПІД- регулятором	САР з нечітким регулятором	САР з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Максимальн е динамічне відхилення	$\approx 0,07$	$\approx 0,15$	$\approx 0,28$
Інтегральни й показник	0,139	-	0,125
Математичне очікування	0	0	0
Середньоквадра тичне відхилення	0,09	0,092	0,066

Таблиця 3 – Показники якості регулювання різних САР

З таблиці 3 робимо остаточний висновок, що за якістю регулювання САР з нейронним регулятором трохи краще функціонує, ніж інші розглянуті САР. САР з традиційним ПІД-регулятором і САР з нечітким регулятором функціонують за якістю регулювання практично ідентично 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 клавішу Generate code. Згенерований код для SIMATIC STEP 7 наступний:

```
( *
*
* File: lpcod1.scl
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for
subsystem "lpcod1/Subsystem"
*
* Model name                : lpcod1
* 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            : lpcod1/Subsystem
* Subsystem sample time     : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 1.3 (R2012a) 29-
Dec-2011
* ST code generated on      : Tue Dec 11
21:15:00 2012
*
```

```

* Target IDE selection                : Siemens SIMATIC
Step 7 5.4

```

```

* Test Bench included                : No

```

```

*

```

```

*)

```

```

FUNCTION_BLOCK Subsystem

```

```

VAR_INPUT

```

```

    ssMethodType: INT;

```

```

    In1: REAL;

```

```

END_VAR

```

```

VAR_OUTPUT

```

```

    Out1: REAL;

```

```

END_VAR

```

```

VAR

```

```

    UnitDelay2_DSTATE: REAL;

```

```

    rtb_Gain11: REAL;

```

```

    rtb_Product: REAL;

```

```

END_VAR

```

```

CASE ssMethodType OF

```

```

    0:

```

```

        (* InitializeConditions for UnitDelay:
        '<S1>/Unit Delay2' *)

```

```

        UnitDelay2_DSTATE := 0.0;

```

```

    1:

```

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

```
(* Sum: '<S1>/Sum28' incorporates:
   * Constant: '<S12>/one'
   * Constant: '<S12>/one1'
   * Constant: '<S13>/one'
   * Constant: '<S13>/one1'
   * Constant: '<S14>/one'
   * Constant: '<S14>/one1'
   * Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:) '1'
   * Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:) '1'
   * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:) '2'
   * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:) '3'
   * Constant: '<S1>/b{1}2'
   * Constant: '<S1>/b{1}3'
   * Constant: '<S1>/b{2}1'
   * Gain: '<S12>/Gain'
   * Gain: '<S12>/Gain1'
   * Gain: '<S13>/Gain'
   * Gain: '<S13>/Gain1'
   * Gain: '<S14>/Gain'
```

```

* Gain: '<S14>/Gain1'
* Math: '<S12>/Exp'
* Math: '<S12>/Reciprocal'
* Math: '<S13>/Exp'
* Math: '<S13>/Reciprocal'
* Math: '<S14>/Exp'
* Math: '<S14>/Reciprocal'
* Product: '<S20>/Product'
* Product: '<S21>/Product'
* Product: '<S22>/Product'
* Product: '<S23>/Product'
* Sum: '<S12>/Sum'
* Sum: '<S12>/Sum1'
* Sum: '<S13>/Sum'
* Sum: '<S13>/Sum1'
* Sum: '<S14>/Sum'
* Sum: '<S14>/Sum1'
* Sum: '<S1>/netsum3'
* Sum: '<S1>/netsum4'
* Sum: '<S1>/netsum5'
* UnitDelay: '<S1>/Unit Delay2'
*
* About '<S12>/Exp':
* Operator: exp
*

```

```

* About '<S12>/Reciprocal':
*   Operator: reciprocal
*
* About '<S13>/Exp':
*   Operator: exp
*
* About '<S13>/Reciprocal':
*   Operator: reciprocal
*
* About '<S14>/Exp':
*   Operator: exp
*
* About '<S14>/Reciprocal':
*   Operator: reciprocal *)

rtb_Product := (((1.0 / (EXP((((((1.0 /
(EXP((-0.00025616 * rtb_Gain11) +
0.012860465887807272) * -2.0) + 1.0))) *
2.0) - 1.0) * -2.8942196224549188) +
((((1.0 / (EXP((-0.0051755 * rtb_Gain11) +
7.4685439831064233) * -2.0) +
1.0))) * 2.0) - 1.0) * -
0.76863388370057517)) + 0.80579) * -2.0) + 1.0)) * 2.0)
- 1.0) + UnitDelay2_DSTATE;

(* Outport: '<Root>/Out1' incorporates:
*   Constant: '<S10>/one'
*   Constant: '<S10>/one1'
*   Constant: '<S11>/one'

```

```

* Constant: '<S11>/one1'
* Constant: '<S15>/one'
* Constant: '<S15>/one1'
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)''
* Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:)''
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)''
* Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)1'
* Constant: '<S1>/b{1}'
* Constant: '<S1>/b{1}1'
* Constant: '<S1>/b{2}'
* Gain: '<S10>/Gain'
* Gain: '<S10>/Gain1'
* Gain: '<S11>/Gain'
* Gain: '<S11>/Gain1'
* Gain: '<S15>/Gain'
* Gain: '<S15>/Gain1'
* Gain: '<S1>/Gain10'
* Math: '<S10>/Exp'
* Math: '<S10>/Reciprocal'
* Math: '<S11>/Exp'
* Math: '<S11>/Reciprocal'
* Math: '<S15>/Exp'
* Math: '<S15>/Reciprocal'
* Product: '<S16>/Product'
* Product: '<S17>/Product'

```

```

* Product: '<S18>/Product'
* Product: '<S19>/Product'
* Sum: '<S10>/Sum'
* Sum: '<S10>/Sum1'
* Sum: '<S11>/Sum'
* Sum: '<S11>/Sum1'
* Sum: '<S15>/Sum'
* Sum: '<S15>/Sum1'
* Sum: '<S1>/Sum5'
* Sum: '<S1>/netsum'
* Sum: '<S1>/netsum1'
* Sum: '<S1>/netsum2'
*
* About '<S10>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S10>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S11>/Exp':
* Operator: exp
*
* About '<S11>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal
*

```

```

* About '<S15>/Exp':
*   Operator: exp
*
* About '<S15>/Reciprocal':
*   Operator: reciprocal *)

Out1 := (((1.0 / (EXP((((1.0 / (EXP((-
0.0070825 * rtb_Gain11) + 0.012860465887807272) * -2.0)
+ 1.0)) * 2.0) -

1.0) * -2.8942196224549188) + (((1.0 /
(EXP((-0.0090912 * rtb_Gain11) + 7.4685439831064233) *
-2.0) + 1.0)) *

2.0) - 1.0) * -0.76863388370057517)) +
1.2353) * -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

```

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

У процесі виконання роботи була розроблена модель САР з нечітким регулятором. Нечіткий регулятор був створений у середовищі MATLAB\Simulink, де були визначені функції приналежності для нечітких множин, сформована база правил для регулятора у табличному вигляді, а також алгоритм нечіткого виведення за методом Сугено 0-го порядку. Було встановлено, що за якістю регулювання дана САР функціонує трохи гірше, ніж САР з традиційним ПІД-регулятором, коли об'єкт управління має нелінійну статичну характеристику в каналі регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САР було виконано тренування штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Тренування мережі було здійснено засобами MATLAB\Simulink за допомогою відповідного виконавчого коду. Також була розроблена модель САР з регулятором, представленим штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація цієї системи була проведена за тими ж умовами, що й для САР з традиційним ПІД-регулятором.

У результаті моделювання різних САР було встановлено, що за якістю регулювання САР з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САР, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 0,12 при САР з нейрорегулятором і 0,139 при САР з традиційним ПІД-регулятором.

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

Таким чином, на основі виконаного синтезу і аналізу різних САР можна зробити заключний висновок, що нейрорегулятор має принципову придатність для практичного використання на базі промислового контролера

при об'єктах управління з нелінійними характеристиками за каналам регулювання.

Розділ 4. Удосконалення САР на основі розширення складу функцій управління.

4.1. Обґрунтування актуальності додаткової функції САК для підвищення якості готового продукту

В умовах жорсткого температурного регламенту ТП швидкого охолодження виноматеріалу, порушення якого може призводити до аварійних зупинок, втратам сировини, зниженню якості продукту та інших небажаних наслідків. Потрібна така система, яка без порушень регламенту дозволить зберегти продуктивність, підвищити якість готового продукту та сталий режим роботи навіть в умовах діючих нестаціонарних збурень випадкового характеру, рішення цього завдання є не тривіальним і може бути досягнуто за рахунок реалізації системи гарантуючого керування. Для реалізації системи гарантуючого керування швидкого охолодження виноматеріалу потрібно доповнити її функцією гарантуючого керування, цьому і присвятимо цей розділ роботи.

4.2. Вибір та опис принципу реалізації функції гарантування якості готового продукту при дотриманні обмежень.

Суть побудови таких систем полягає у постійній оцінці (на ковзному інтервалі часу) поточного значення відсутності ймовірності порушень та коригування режиму роботи об'єкта, щоб ця ймовірність відповідала наперед заданої ймовірності. Вимірювання значення цієї ймовірності безпосередньо неможливо, тому потрібна розробка спеціальної моделі, яка дозволить за допомогою оцінки доступних для вимірювання змінних отримати необхідну оцінку. Таку модель можна називати (МНР) – модель порушення регламенту.

Оцінювати (прямо чи опосередковано) поточне значення відсутності ймовірності порушення $\hat{P}_{\bar{S}}(y^{rp\pm}, T, t)$, можливо тоді, якщо потік подій $S(t)$ є пуассонівським, тобто вірогідність подій $\bar{S}$ (відсутність S) визначатиметься з виразу:

$$P_{\bar{S}}(y^{rp\pm}, T) = \exp\{-n_s(y^{rp\pm})T\} = \exp\{N_s(y^{rp\pm}, T)\}$$

де $n_s(y^{rp\pm})$ - середня частота (інтенсивність) порушень у обмежень $y^{rp\pm}$ на T ;

$N_s(y^{rp\pm}, T)$ – загальна кількість подій S на T ;

Альтернативні варіанти оцінки ймовірності виникнення події S представлені у формі виразів для розрахунку поточних значень оцінок середньої інтенсивності подій S , тобто $\hat{n}_s(y^{rp\pm}, T)$. Вихідною інформацією в цих розрахунках є результат оцінювання ймовірнісних характеристик процесу $y(t)$ а також значення $y^{rp\pm}$. Вигляд МНР буде залежати від прийнятої моделі зміни $y(t)$ і від виду прийнятої моделі зміни $m_y(t)$. У нашому випадку будемо приймати що $m_y(t)$ є квазістаціонарною (практично постійною) на $T_{\text{кст}}$ функцією часу, тобто $m_y(t) = m_y = \text{const} \forall t \in T_{\text{кст}}$ -

$$\hat{n}^{\pm}(y^{rp\pm}, t) = \exp\left\{-\frac{\hat{\sigma}_{\dot{y}}}{2\pi\hat{\sigma}_y} \exp\left\{-\frac{(y^{rp\pm} - \hat{m}_y)}{2\hat{\sigma}_y^2}\right\}\right\}, \quad \text{тоді за контуром}$$

стабілізації інтенсивності порушень розрахунок заданого допустимого значення $y^{\text{здд}\pm}$ буде здійснюватися за формулою:

$$y^{\text{здд}\pm}(t) = y^{rp\pm} \mp \hat{\sigma}_y \sqrt{2 \left| \ln(T \hat{\sigma}_{\dot{y}} / 2\pi \hat{\sigma}_y \ln(1/P_{\bar{S}}^{\Gamma}(y^{rp\pm}, T)) \right|};$$

де $\hat{m}_y, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_{\dot{y}}, \hat{A}_y, \hat{\omega}_y$ - оцінки відповідних характеристик випадкових процесів, обчислювані на кожному інтервалі часу $T_{\text{кст}}$;

$\hat{m}_y(t), \hat{m}_{\dot{y}}(t)$ - оцінки математичного очікування, що змінюється, та його першою похідною, обчислювані на кожному інтервалі часу $T_m \ll T_{\text{кст}}$;

Оцінки характеристик випадкових процесів, обчислювані в реальному часі на ковзному інтервалі, визначаються усередненням на $T_{\text{кст}}$.

При усередненні з рівномірним зважуванням реалізуються такі вирази:

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

Для розрахунків коли $m_y(t)$ є апіорі невідомою функцією часу необхідні оцінки можуть бути розраховані зі слідуючих співвідношень:

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_{y1}^2 &= \hat{\sigma}_y^2 - \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_y^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y^4 \right)} = \hat{\sigma}_y^2 - \frac{\hat{A}_y^2}{2}; \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}1}^2 = \hat{\sigma}_{\dot{y}}^2 - \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_{\dot{y}}^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_{\dot{y}}^4 \right)} = \hat{\sigma}_{\dot{y}}^2 - \frac{\hat{A}_{\dot{y}}^2}{2}; \\ \hat{A}_y &= \sqrt{2} \sqrt[4]{2 \left(\hat{\sigma}_y^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y^4 \right)}; \quad \hat{A}_{\dot{y}} = \sqrt{2} \sqrt[4]{2 \left(\hat{\sigma}_{\dot{y}}^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_{\dot{y}}^4 \right)}; \quad \hat{\omega}_y = \hat{A}_{\dot{y}} / \hat{A}_y, \\ \text{де } y_1(t) &= y(t) - \hat{A}_y \sin(\omega_y t + \varphi_y), \quad \dot{y}_1 = dy_1/dt;\end{aligned}$$

$\hat{\mu}_y^4, \hat{\mu}_{\dot{y}}^4$ – Оцінки четвертих центральних моментів $y_c(t)$ на інтервалі $T_{\text{кст}}$.

Структурна схема СГУ з розрахунком допустимого значення уставки контуру регулювання у контурі стабілізації інтенсивності порушень представлена на рис. 4.

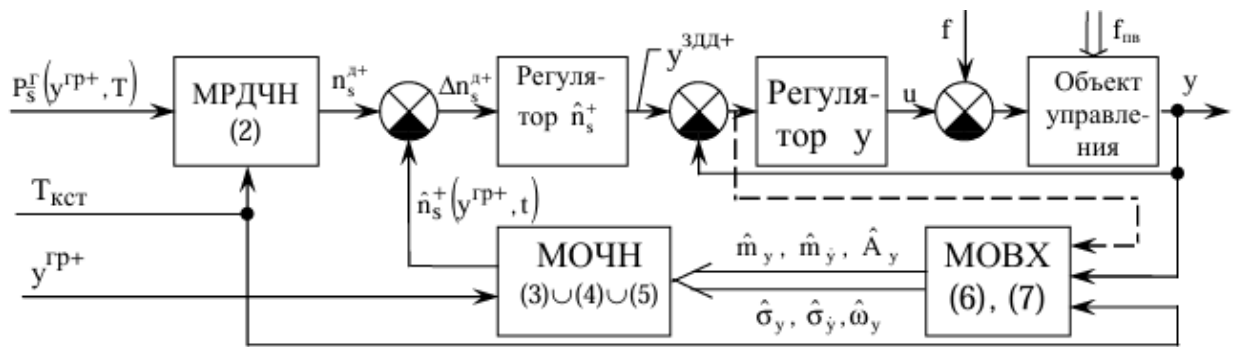


Рис. 4. Структурна схема СГУ з розрахунком допустимого значення уставки контуру регулювання у контурі стабілізації інтенсивності порушень (модулі: МРДЧН – розрахунку допустимої частоти S; МОЧН – оцінки інтенсивності S; МОВХ - оцінки ймовірнісних характеристик $y(t)$)

На вхід модуля МРДЧН надходять $P_s^{\Gamma}(y^{\Gamma p \pm}, T)$ та $T_{\text{кст}}$ для проведення розрахунку допустимого рівня частоти порушень n_s^{d+} яка надходить на вхід регулятора $\hat{n}_s^+$ в якому порівнюються допустима та фактична частота порушень для стабілізації значення інтенсивності, після чого регулятор визначає відповідне задане допустиме значення $U^{\text{здд}+}$ поточної змінної, далі сигнал з помилки регулювання і поточний стан змінної надходить на вхід модуля оцінки ймовірнісних характеристик МОВХ, куди також надходить $T_{\text{кст}}$, де виконуються умови квазістаціонарних $y^0(t)$. У МОВХ йде розрахунок вірогідних оцінок вихідної змінної (середньоквадратичне відхилення поточної змінної, середньоквадратичне відхилення її похідної, частота та амплітуда випадкової складової, а також математичне очікування похідної від поточної змінної). Далі вище зазначені змінні надходять на вхід МОЧН модуль оцінки інтенсивності в якому оцінюється поточна інтенсивність порушень на основі $y^{\Gamma p+}(t)$ та МРДЧН для проведення нового розрахунку допустимого рівня частоти порушень n_s^{d+} далі формується таке значення, що після відрахування з граничним значенням $U^{\Gamma p}(t)$ було таке значення $U^{\text{здд}+}$, яке разом із контуром регулювання забезпечувало роботу нашої САР з наперед заданою ймовірністю безаварійності.

4.3. Розробка структурної схеми САК підвищення якості готового продукту, формалізація алгоритму керування, обґрунтування значень їх настрювальних параметрів.

На основі базової САР була розроблена структура модернізованої САР (СГК), яка передбачає керування температурою виноматеріалу. Структурна схема САК представлена на рис. 4.1.

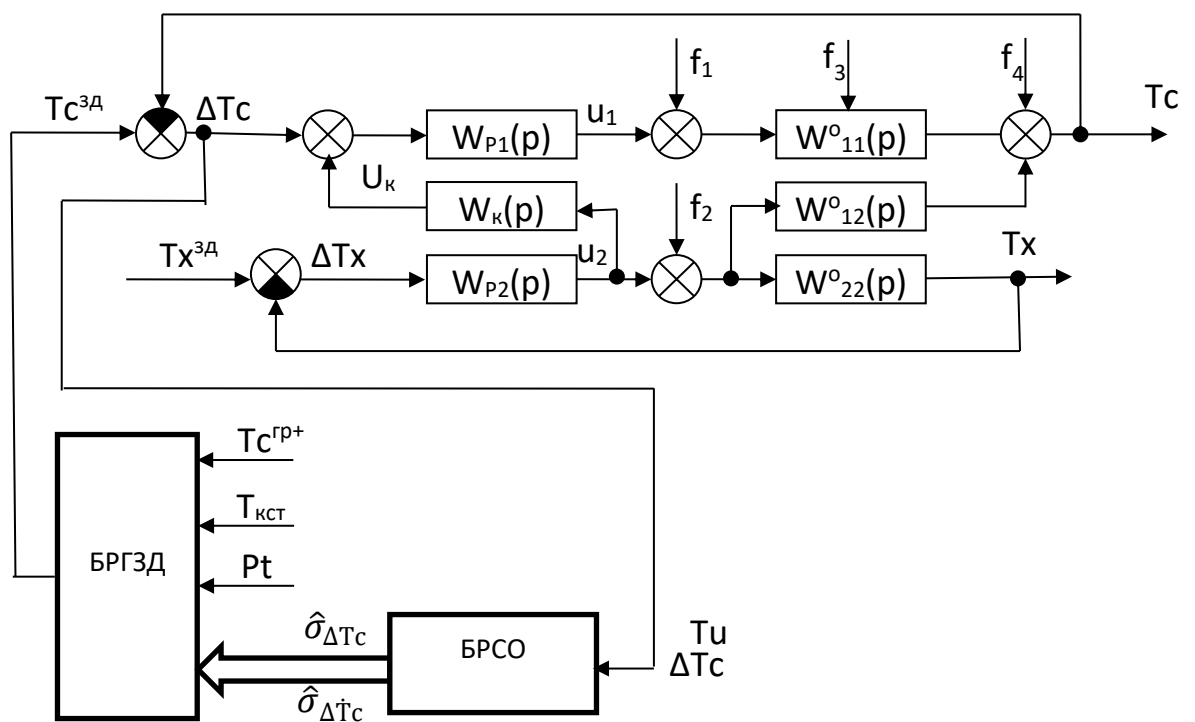


Рис. 4.1 Структурна схема СГК процесу швидкого охолодження виноматеріалу (БРГЗД – блок розрахунку гарантуючого заданого значення; БРСО – блок розрахунку статистичних оцінок).

Позначення на схемі:

$T_c^{гр+}$ - гранична температура регульованої координати, °C;

$T_{кст}$ – час квазістаціонарності;

P_t – задана ймовірність події S ;

$T_c^{зд}$ та $T_x^{зд}$ – задані значення регульованих координат, $^{\circ}C$;

T_c та T_x – поточні значення регульованих координат, $^{\circ}C$;

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

ΔT_c та ΔT_x – помилки регулювання, $^{\circ}C$;

u_1 та u_2 – керуючі дії, %х.р.о.;

f_1 та f_2 – неконтрольовані збурення;

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

$W_{11}(p), W_{12}(p), W_{22}(p)$ – передаточні функції ОК;

f_3 – параметричні збурення (зміна коефіцієнту передачі та часу запізнення в каналі T_c);

f_4 – координатні збурення;

$\hat{\sigma}_{\Delta T_c}$ – Оцінка середньоквадратичного відхилення помилки регулювання температури виноматеріалу;

$\hat{\sigma}_{\Delta \dot{T}_c}$ – Оцінка середньоквадратичного відхилення похідної помилки регулювання температури виноматеріалу;

T_u – інтервал часу усереднення;

Задане значення $T_c^{зд}$ розраховується в БРГЗД на основі $T_c^{гр+}$ граничної температури регульованої координати, $T_{кст}$ часу квазістаціонарності, P_t заданої ймовірності події S та $\hat{\sigma}_{\Delta T_c}$, $\hat{\sigma}_{\Delta \dot{T}_c}$ статистичних оцінок відхилення помилки регулювання які отримані в БРСО на основі ΔT_c помилки регулювання та на ковзному інтервалі часу. При реалізації алгоритму гарантування використовувались такі налаштування: гарантована вірогідність дотримання обмежень $P_t = 0.9$ на інтервалі часу $T_{уср} = 200$ сек, інтервал квазістаціонарності $T_{кст} = 400$ сек.

4.4. Розробка схеми імітаційного моделювання САК та плану комп'ютерних експериментів з дослідження її ефективності, представлення та аналіз результатів моделювання.

Для перевірки адекватності роботи системи керування, ОК був доповнений моделями параметричних збурень таких як зміна запізнення в каналі регулювання температури виноматеріалу і зміна коефіцієнту передачі на $\pm 20\%$, а також зміну дисперсії координатних збурень у тому ж самому каналі регулювання на $\pm 30\%$, повна схема моделювання ОК наведена на рис. 4.2, параметричні збурення та зміна дисперсії координатних збурень реалізуються на основі гармонійних сигналів зі змінним періодом.

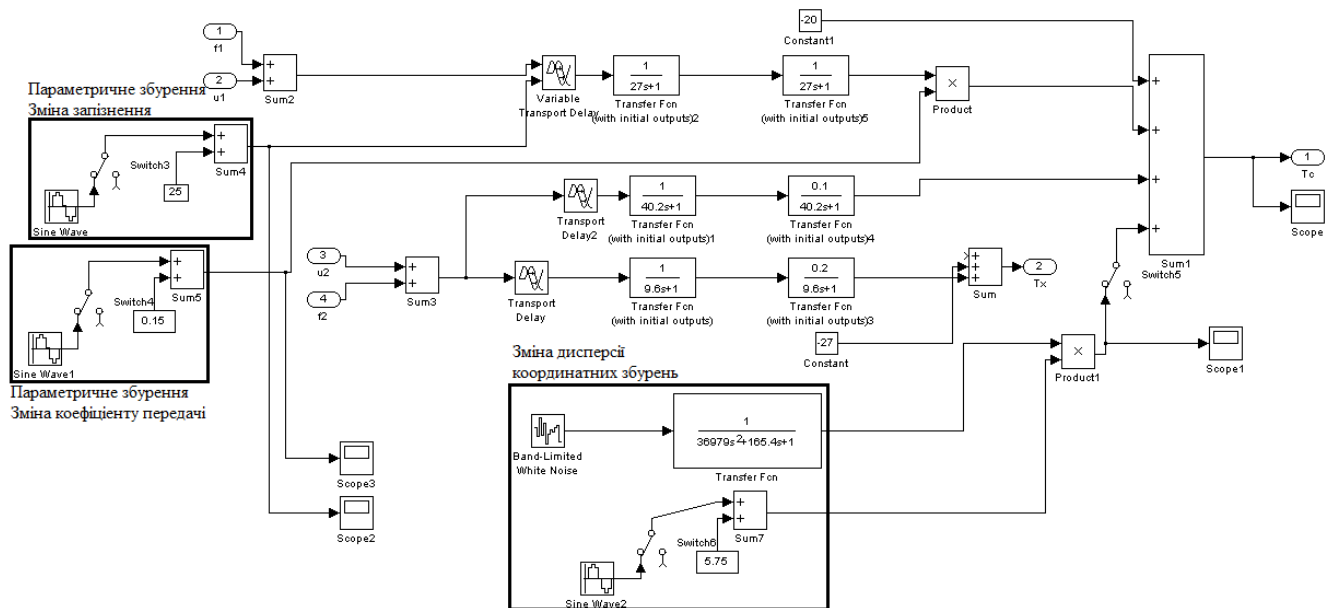


Рис. 4.2 – схема моделювання доповненого ОК

Налаштування генераторів гармонійних сигналів для реалізації параметричних збурень та зміни дисперсії координатних збурень наведені на рис. 4.3 та 4.4

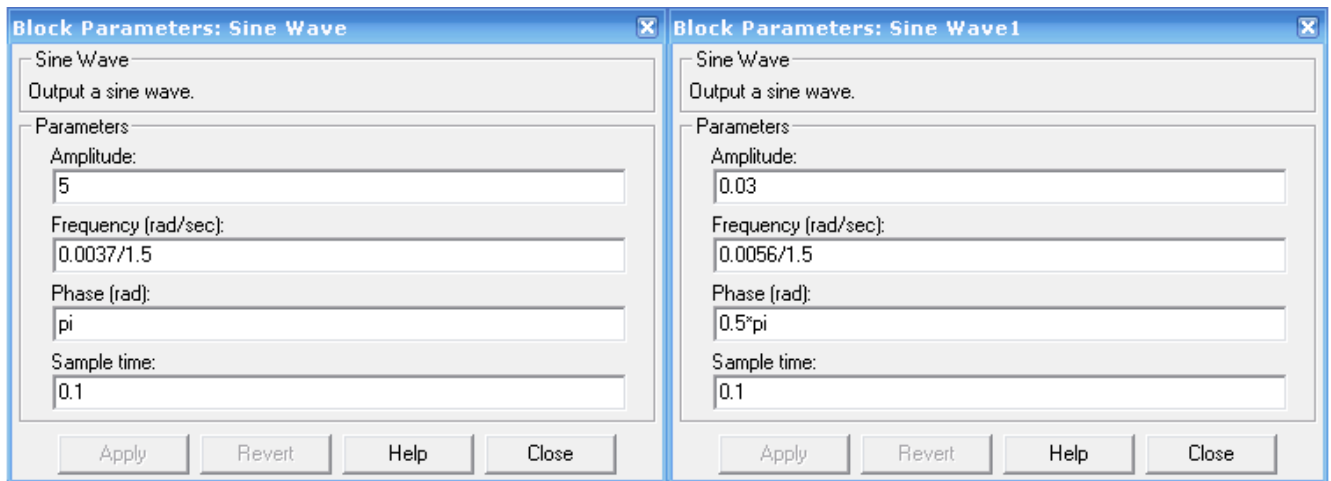


Рис. 4.3 налаштування параметричних збурень (запізнення та коефіцієнт передачі) в каналі регулювання u_1 – T_c .

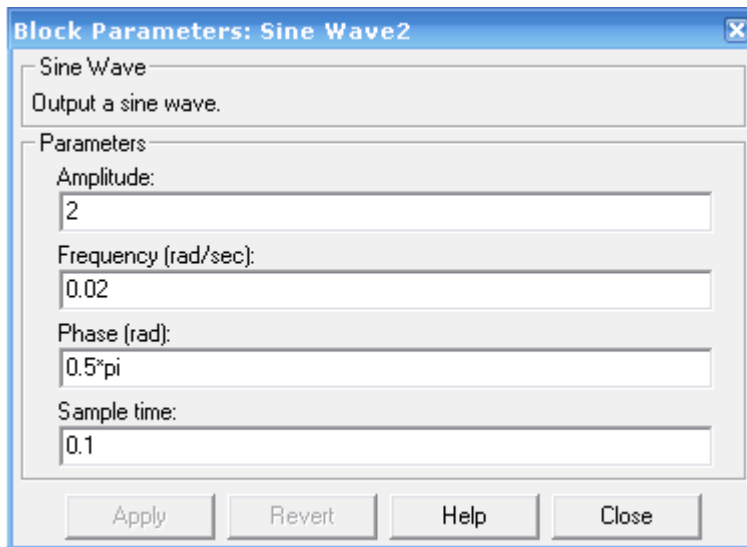


Рис. 4.4 налаштування зміни дисперсії координатних збурень в каналі регулювання u_1 – T_c .

Для розробки схеми імітаційного моделювання СГК, САР була доповнена функціональними блоками, які реалізують алгоритми гарантуючого керування з налаштуванням їх параметрів, схема імітаційного моделювання гарантуючого керування представлена на рис. 4.5 а схеми функціональних блоків, що реалізують цей алгоритм на рис. 4.6 та 4.7.

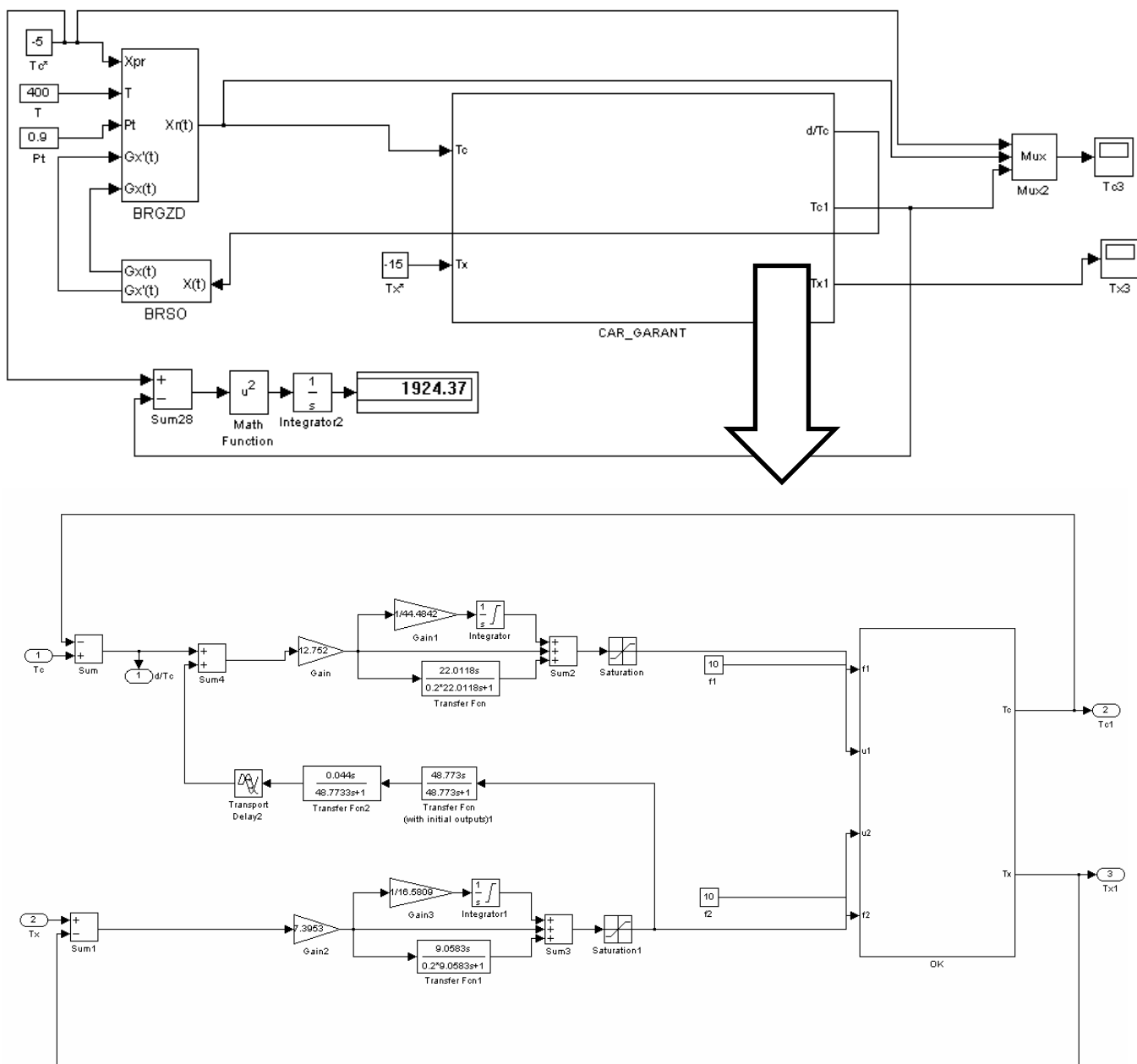


Рис. 4.5 Схема моделювання САР с алгоритмом гарантуючого керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу

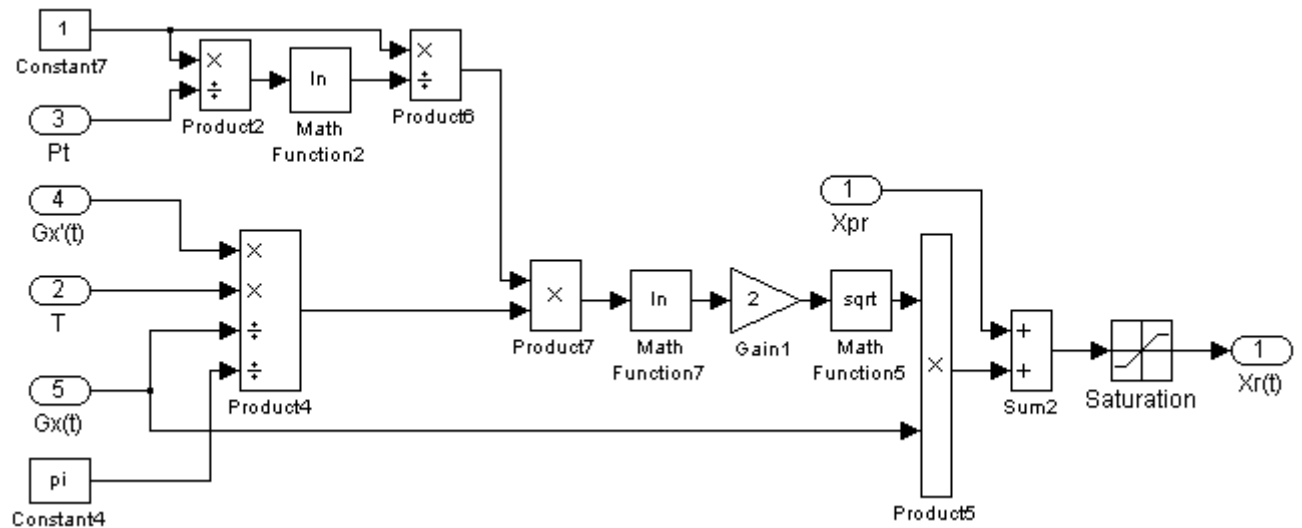


Рис. 4.6 Внутрішня структура блоку BRGZD.

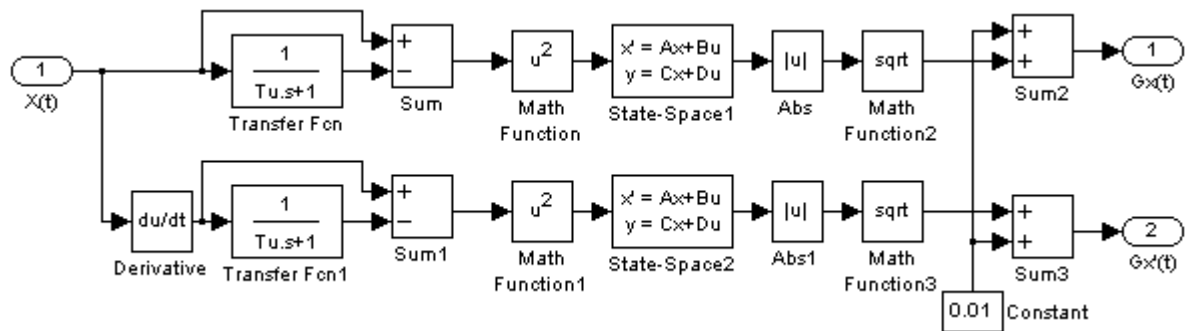


Рис. 4.7 Внутрішня структура блоку BRSO.

Перед тим як проводити експеримент зафіксуємо перехідні характеристики збурень які впливатимуть на системи, результати моделювання збурень наведені на рис. 4.8 – 4.10.

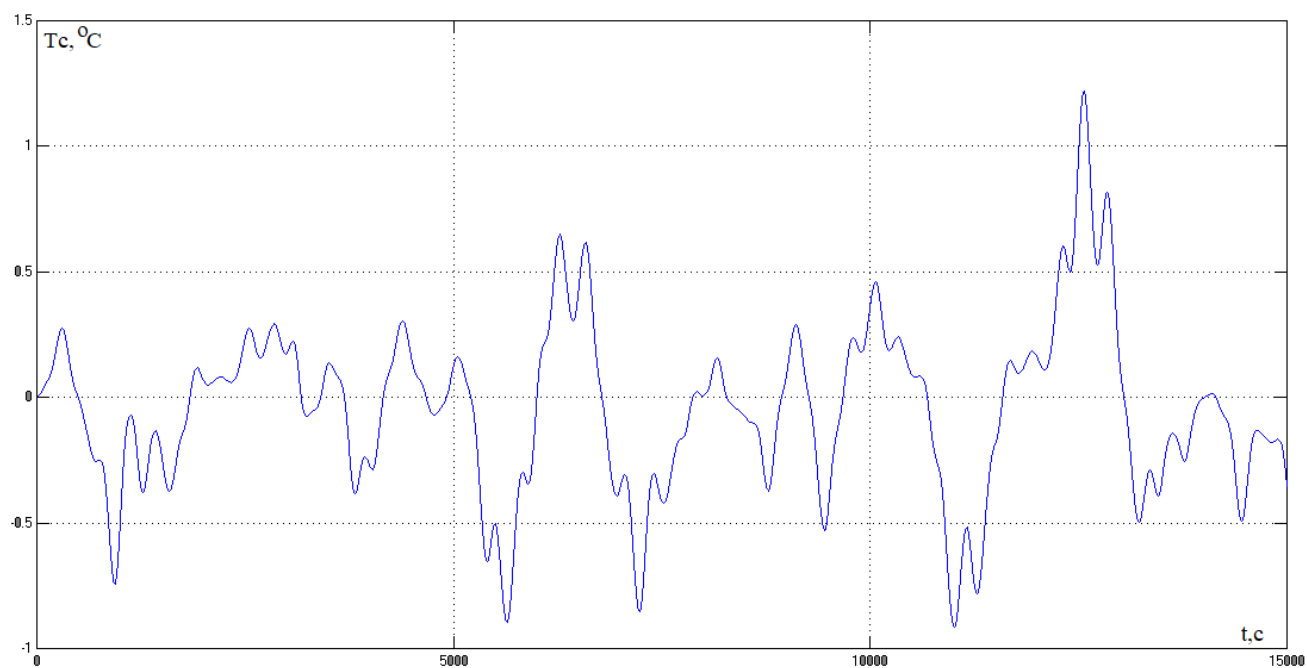


Рис. 4.8 результати моделювання неконтрольованих координатних збурень зі зміною дисперсії адитивних до каналу регулювання $u_1 - T_c$.

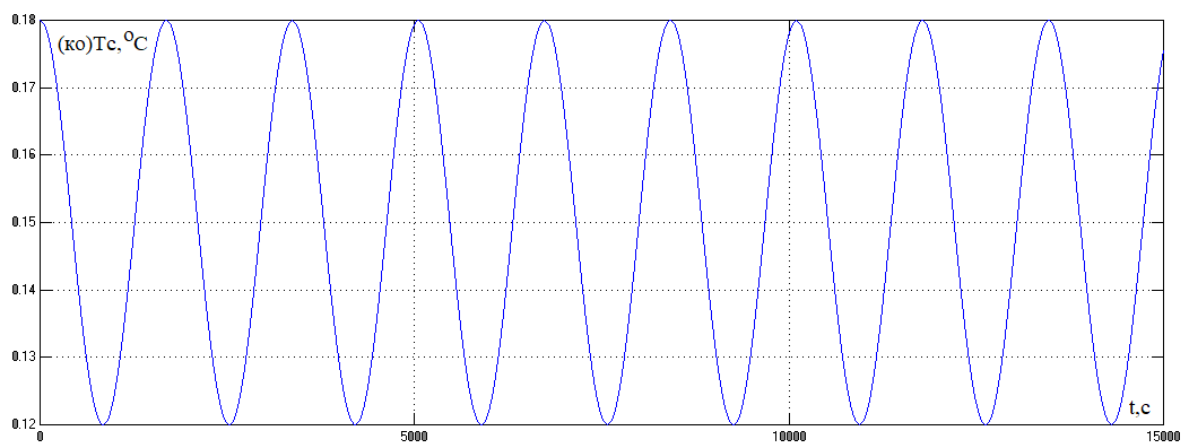
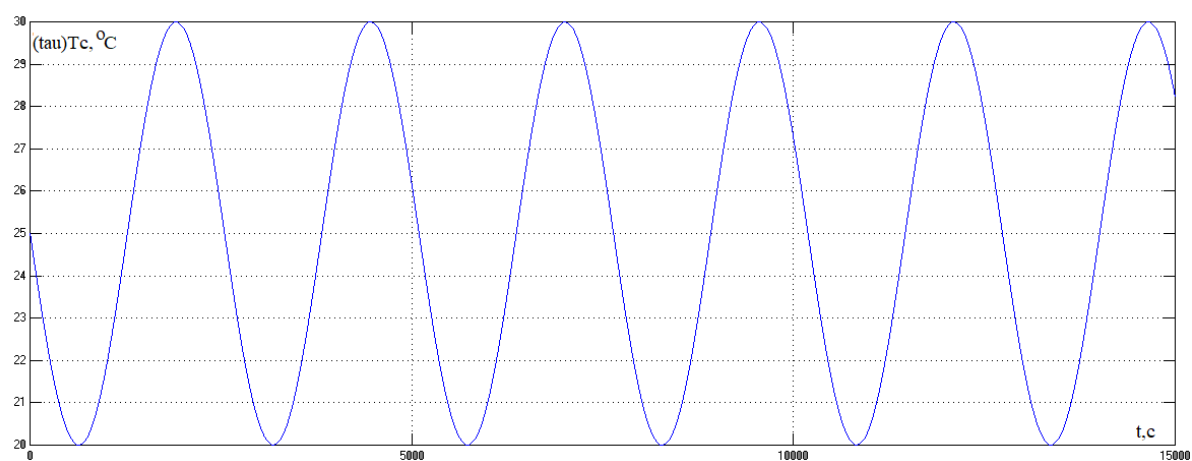


Рис. 4.9 результати моделювання параметричних збурень адитивних до каналу регулювання $u_1 - T_c$.

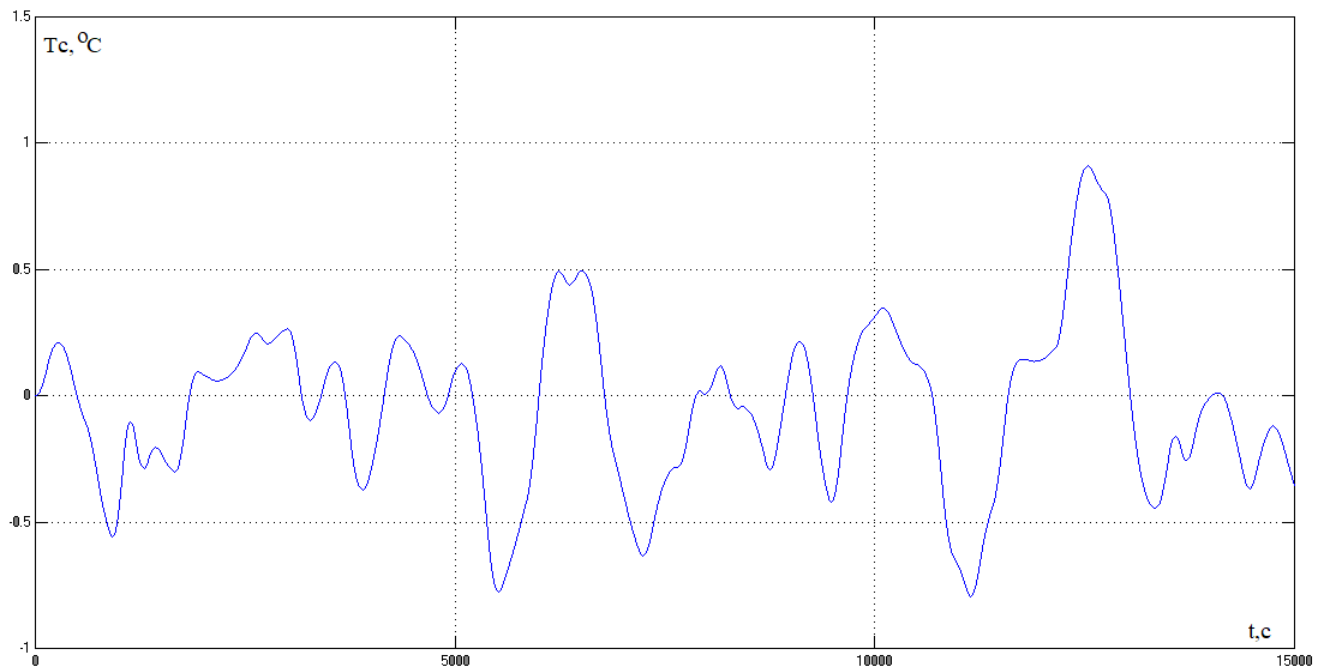


Рис. 4.10 результати моделювання неконтрольованих координатних збурень без зміни дисперсії адитивних до каналу регулювання $u_1 - T_c$.

Після отримання перехідних характеристик збурень перейдемо до експериментів в яких на системи СГК та САР ПДТ будуть порівнюватися в умовах дії координатних та параметричних збурень.

На рис. 4.11 – 4.14 представлено порівняльний аналіз, проведення моделювання та дослідження систем керування СГК та САР ПДТ в умовах дії координатних та параметричних збурень. (для зручності перехідні характеристики отримані в одній системі координат)

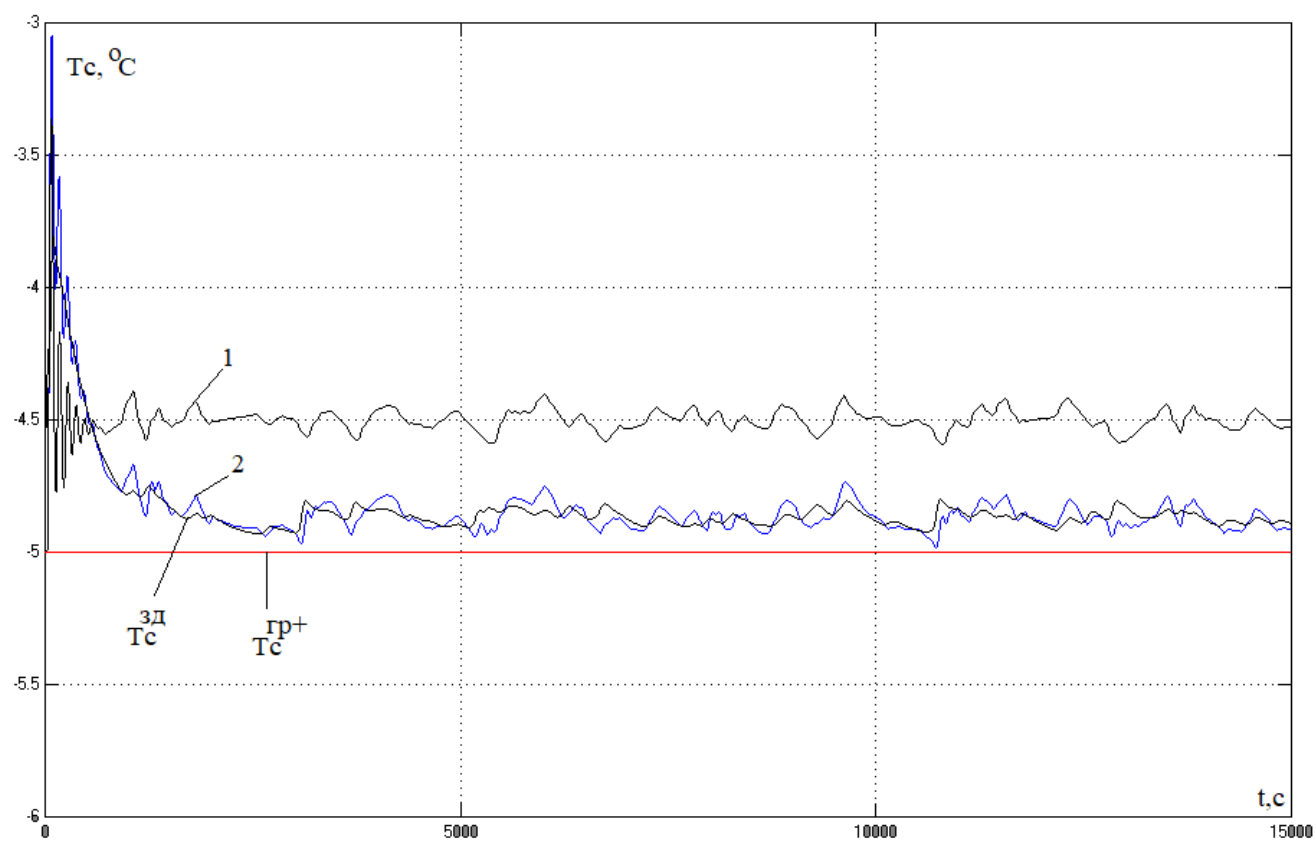


Рис. 4.11 результати моделювання 1 – САР ПДТ, 2 – СГУ в умовах дії неконтрольованих координатних збурень за каналом регулювання $u_1 - T_c$

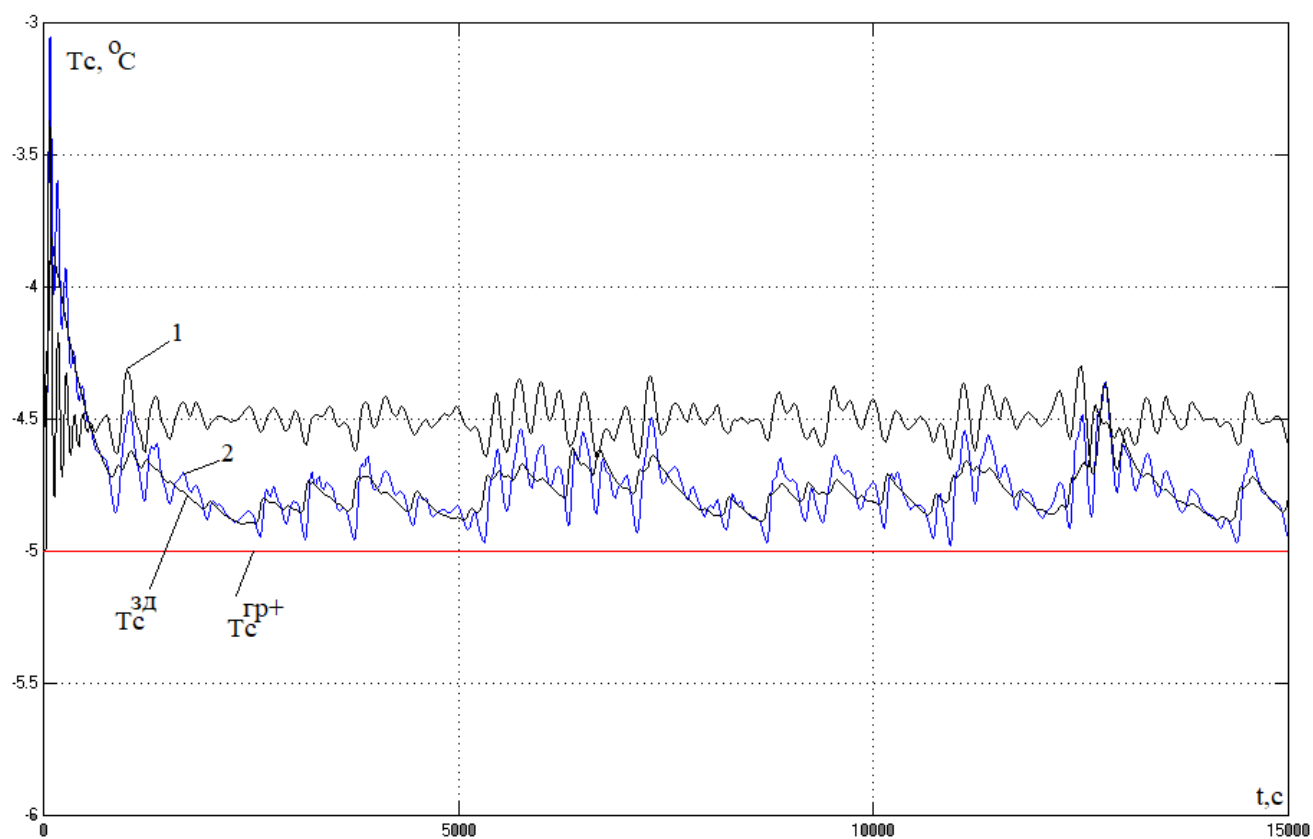


Рис. 4.12 - Результати моделювання 1 – САР ПДТ, 2 – СГУ в умовах дії неконтрольованих координатних збурень зі зміною дисперсії за каналом регулювання $u_1 - T_c$

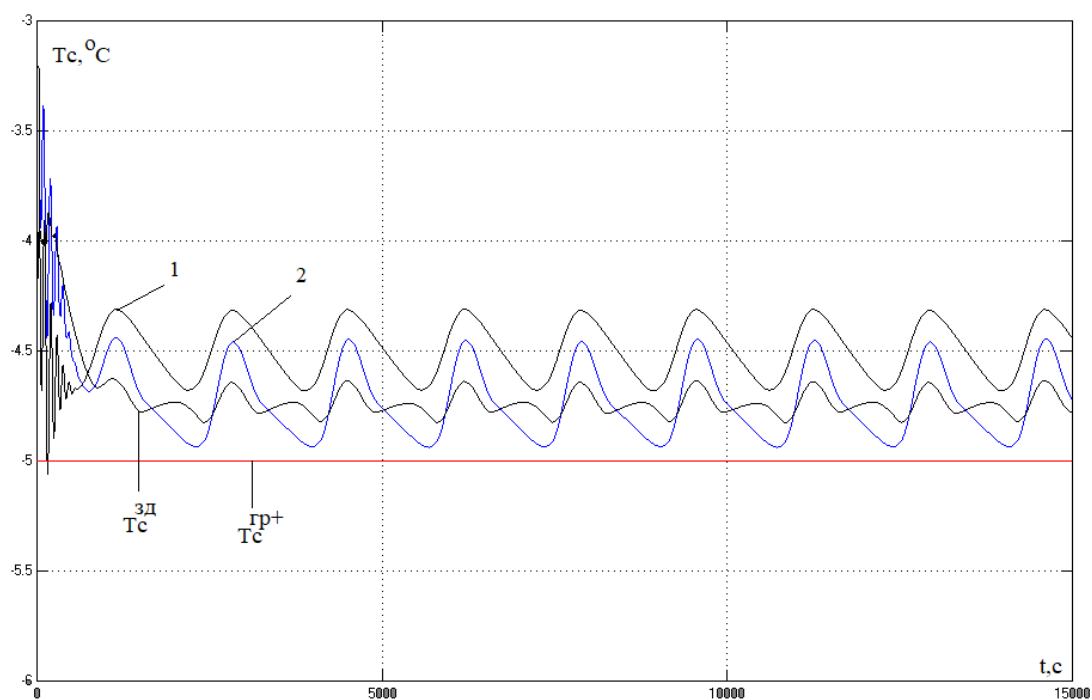


Рис. 4.13 результати моделювання 1 – САР ПДТ, 2 – СГУ в умовах дії параметричних збурень за каналом регулювання $u_1 - T_c$

На даному етапі через дію параметричних збурень та неконтрольованих координатних збурень зі зміною дисперсії перехідні характеристики САР ПДТ та СГУ буде складно відлічити один від одного, тому результати їх моделювання будуть представлені окремо на рис. 4.14 та рис. 4.15

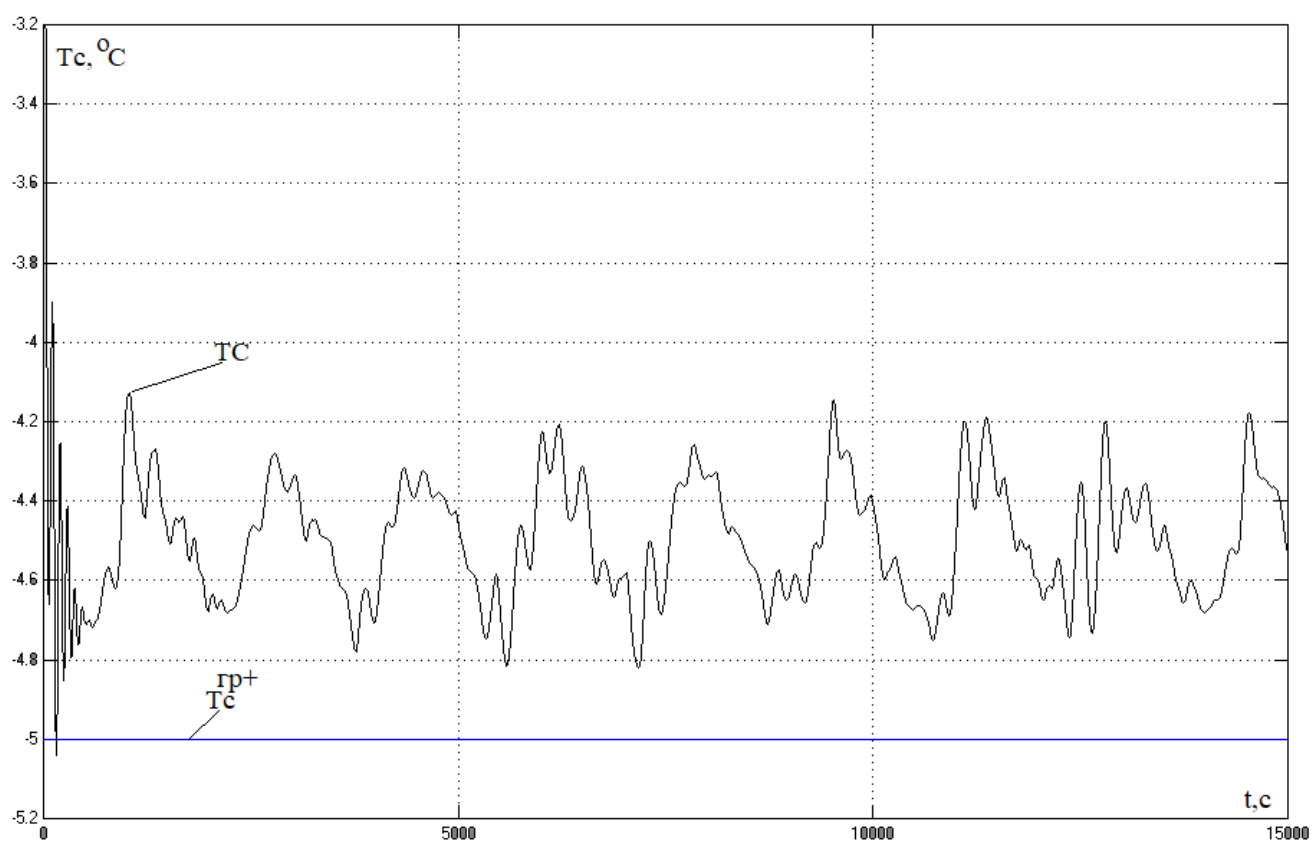


Рис. 4.14 результати моделювання САР ПДТ, в умовах дії параметричних збурень та неконтрольованих координатних збурень зі зміною дисперсії за каналом регулювання $u_1 - T_c$

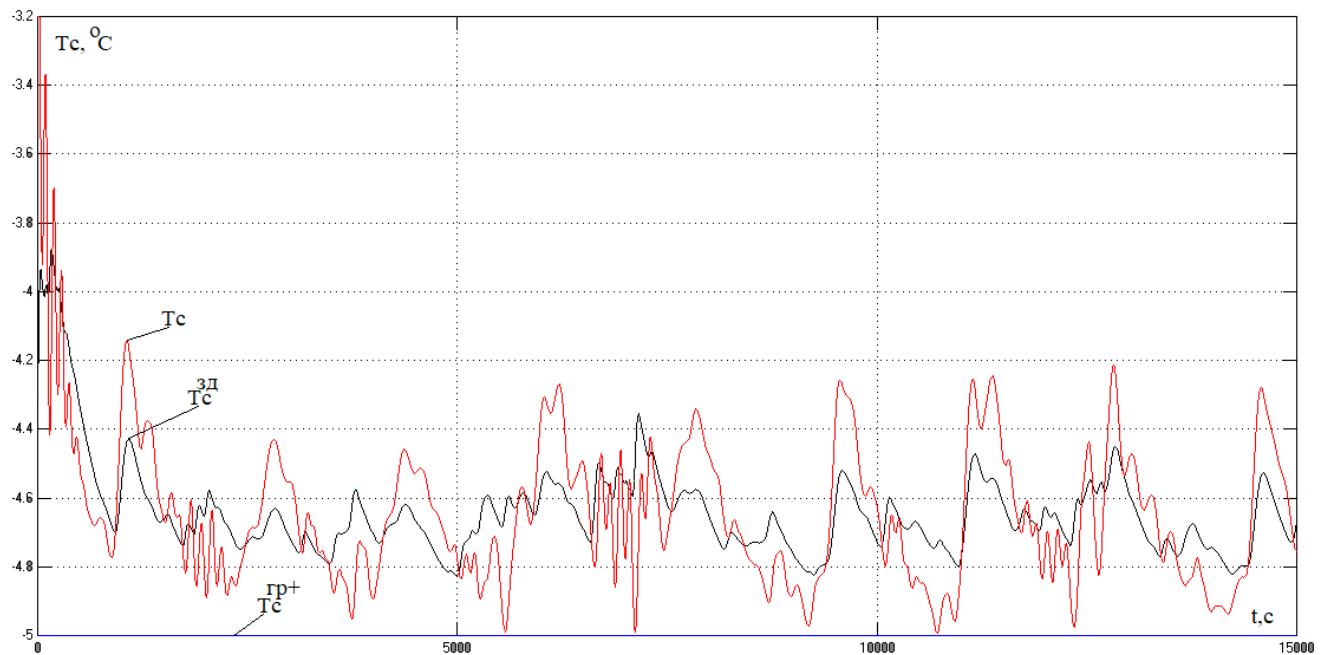


Рис. 4.15 результати моделювання СУ, в умовах дії параметричних збурень та неконтрольованих координатних збурень зі зміною дисперсії за каналом регулювання $u_1 - T_c$

За результатами експерименту бачимо, що САР ПДТ при деяких варіаціях дії збурень працює досить добре, але в умовах дії неконтрольованих координатних збурень зі зміною дисперсії робота САР ПДТ погіршується на відміну від SGK яка працює на достатньо гарному рівні, та має переваги перед САР ПДТ, у вигляді роботи близько до граничної межі, що в подальшому дає змогу в разі підвищити якість готового продукту, це підтверджує актуальність розробки СУ ТП швидкого охолодження виноматеріалу.

Проведемо ще одне дослідження SGK при різних її ймовірностей виходу за граничну межу ($P_t = [0.9, 0.99, 0.999]$), результати дослідження наведені на рис. 4.16 – 4.18.

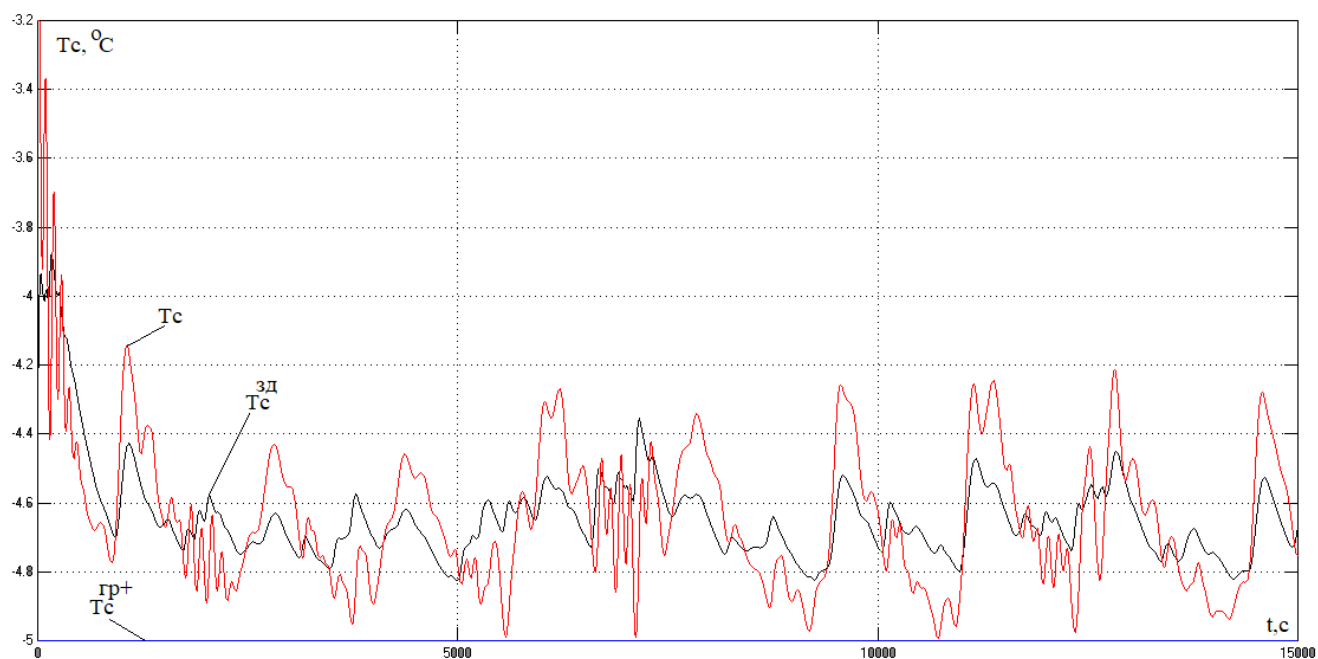


Рис. 4.17 результати моделювання СПК при ймовірності виходу за граничну межу $P_t = 0.9$

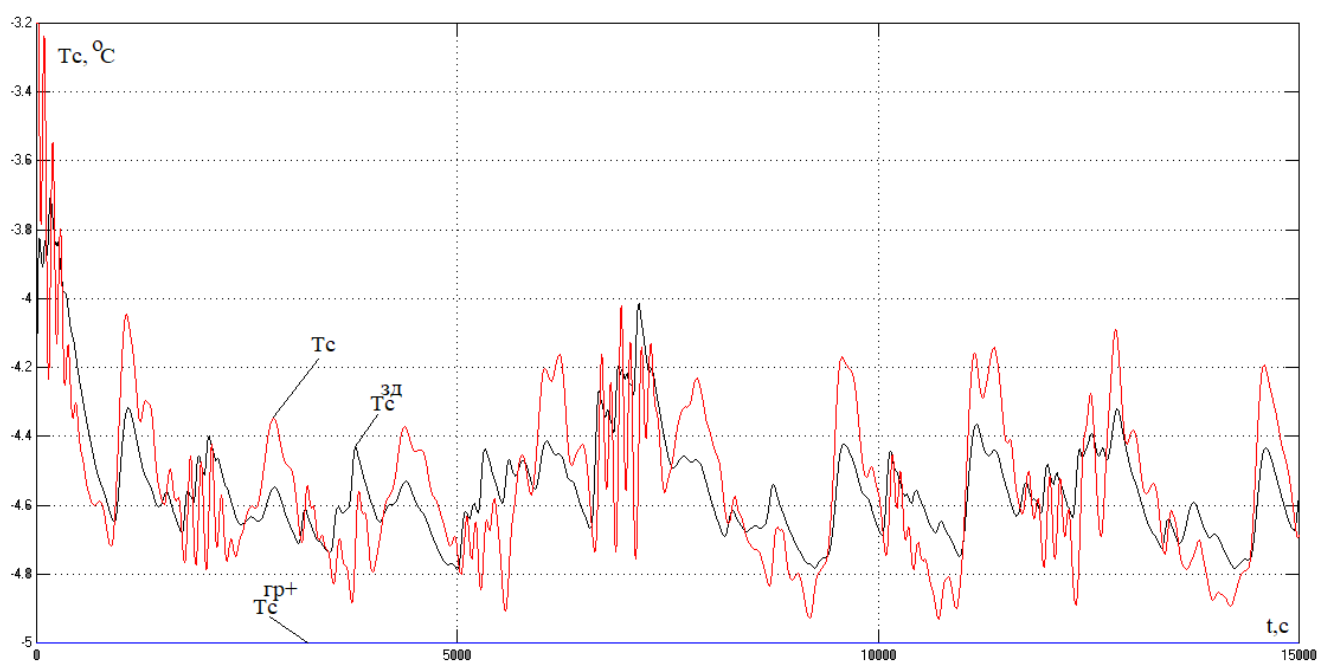


Рис. 4.18 результати моделювання СПК при ймовірності виходу за граничну межу $P_t = 0.99$

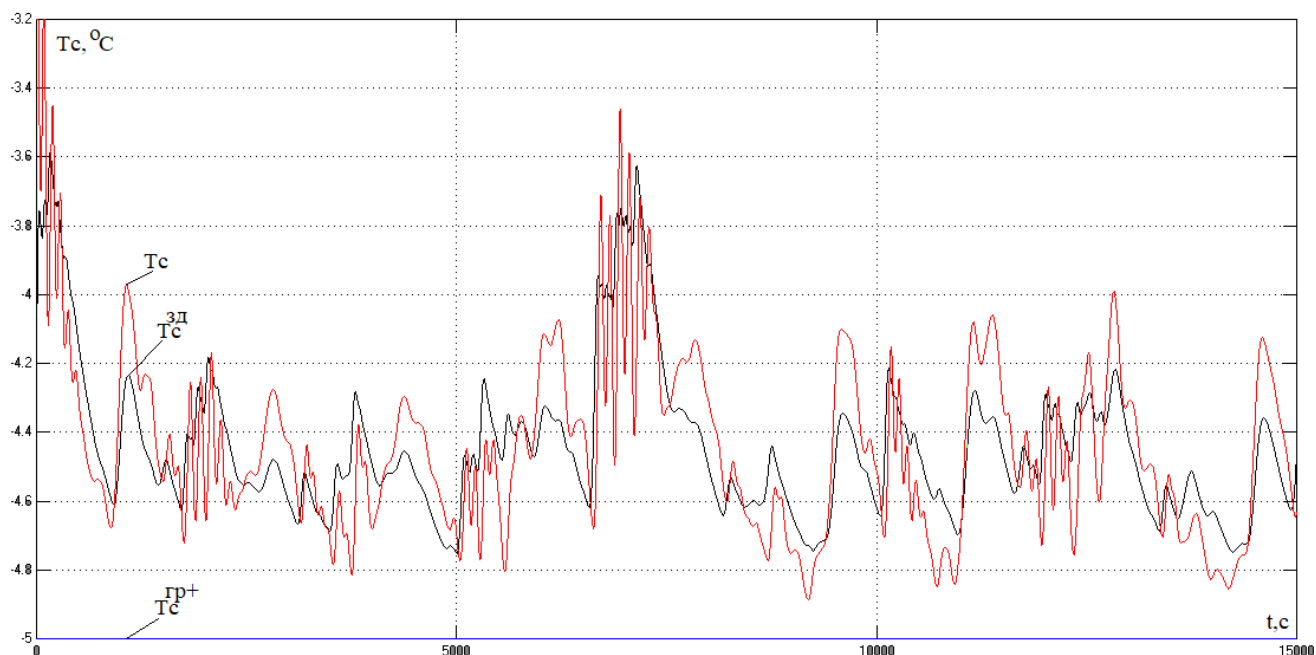


Рис. 4.19 результати моделювання СТК при ймовірності виходу за граничну межу $P_t = 0,999$

За результатами цього експерименту можна зробити висновок, чим більше значення ймовірності невиходу за граничну межу P_t , тим далі СТК відводить задане значення з яким також змінюється поточне значення температури виноматеріалу. Якщо ж знижувати значення ймовірності виходу за граничну межу P_t , то задане значення навпаки підводиться ближче до граничної межі, а також можливі виходи за граничне значення.

4.5 висновки за розділом.

У даному розділі курсової роботи була модернізована САР базової структури в СТК процесу швидкого охолодження виноматеріалу, проведені порівняльні експерименти САР ПДТ та СТК які підтвердили ефективність її застосування. СТК досить непогано виконує свою функцію, завдяки чому забезпечується зниження браку готової продукції та питомих енерговитрат (витрат холодоагенту для охолодження виноматеріалу) за рахунок підтримки температури близької до межі регламенту без його порушення. У всіх експериментах в умовах дії збурень та зміни ймовірності виходу за граничну

межу SGK є кращою, ніж CAP базової структури, і тому подальше її використання є доцільним.

Розділ 5 Реалізація алгоритмів керування розробленої САК на контролері, їх тестування та підготовка до впровадження.

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

Систему керування процесом охолодження виноматеріалу розроблено на базі розподіленої системи WAGO I/O. Для реалізації алгоритмів керування в модулях ПЗО контролера передбачені 2- аналогових входів, 2-аналогових виходи, 5-дискретних входів і 5-дискретних виходів.

Для реалізації алгоритмів керування використовується контролер WAGO PFC200 750-8213 з модулями ПЗО. Загальний вид контролера та схема його підключення наведені на рис.5, технічні характеристики та схема підключення (рис. 5.1).

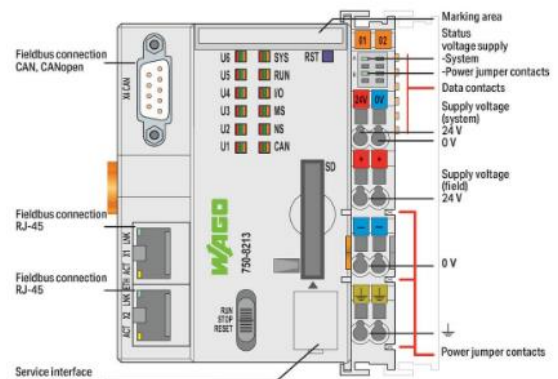


Рис. 5 – Контролер Wago 750-8213 PFC200 зовнішній вигляд

Технічні дані

спілкування	CANopen Modbus TCP master/slave Modbus (UDP), WagoAppPlcModbus Library ETHERNET EtherNet/IP™ Adapter (slave) EtherNet/IP™ Scanner EtherCAT® Master OPC UA Server/Client OPC UA Pub/Sub (можна встановити пізніше) MQTT BACnet/IP, потрібна додаткова ліцензія Протоколи телеконтролю, потрібна додаткова ліцензія
Протоколи ETHERNET	DHCP DNS NTP FTP FTPS SNMP HTTP HTTPS SSH
Протоколи телеконтролю	IEC 60870 (додаткова ліцензія як підлеглий або головний) IEC 61850 (додаткова ліцензія як клієнт або сервер) DNP3 (додаткова ліцензія як підлеглий або головний)
Візуалізація	Веб-Візу
Операційна система	Linux у реальному часі (з патчем RT-Preempt)
ЦП	Cortex A8; 1 ГГц
ЦП	Cortex A8; 1 ГГц
Мови програмування згідно IEC 61131-3	Список інструкцій (IL) Сходова діаграма (LD) Функціональна блок-схема (FBD) Безперервна функціональна схема (CFC) Структурований текст (ST) Послідовна функціональна схема (SFC)
Середовище програмування	CODESYS V3.5, версія мікропрограми 23 або вище e! COCKPIT (на базі CODESYS V3) до версії мікропрограми 22 WAGO-I/O- PRO V2.3 (на основі CODESYS V2.3), до версії мікропрограми 22
Параметри конфігурації	CODESYS V3 e! COCKPIT WAGO-I/O- CHECK Веб-керування e! Бібліотека <i>RUNTIME</i> Бібліотека CODESYS
Швидкість передачі даних (зв'язок/польова шина 1)	10/100 Мбіт/с
Швидкість передачі даних	ETHERNET: 10/100 Мбіт/с
Середовище передачі (зв'язок/польова шина)	ETHERNET: вита пара S-UTP; 100 Ом; кішка 5; Максимальна довжина кабелю 100 м
Основна пам'ять (RAM)	512 Мб
Внутрішня пам'ять (флеш)	4096 Мб
Енергонезалежна апаратна пам'ять	128 кбайт
Програмна пам'ять	CODESYS V2: 16 Мб; CODESYS V3: 32 Мб

Програмна пам'ять	CODESYS V2: 16 МБ; CODESYS V3: 32 МБ
Пам'ять даних	CODESYS V2: 64 МБ; CODESYS V3: 128 МБ
Енергонезалежна пам'ять програмного забезпечення	128 кбайт
Енергонезалежна пам'ять програмного забезпечення	128 кбайт
Тип карти пам'яті	SD і SDHC до 32 ГБ (всі гарантовані властивості дійсні тільки з картою пам'яті WAGO 758-879/000-001)
Слот для карти пам'яті	Механізм Push-push; Кришка (закривається)
Кількість модулів на вузол (макс.)	250
Кількість модулів без розширення шини (макс.)	64
Вхідний і вихідний образ процесу (внутрішній) макс.	1000 слів/1000 слів
Вхідний і вихідний образ процесу (Modbus®) макс.	CODESYS V2: 1000 слів/1000 слів; CODESYS V3: 32000 слів/32000 слів
Вхідний і вихідний образ процесу (CAN) макс.	2000 слів/2000 слів
Індикатори	Світлодіод (SYS, RUN, I/O, CAN, U1 ... U6) червоний/зелений/помаранчевий; стан системи, програма, внутрішня шина даних, CANopen, статус програмується користувачем (можна використовувати через бібліотеку CODESYS); Світлодіод (A, B) зелений; стан живлення системи, польове живлення
Напруга живлення (система)	24 В постійного струму (-25 ... +30 %); через роз'єм (з'єднання CAGE CLAMP®)
Вхідний струм (тип.) при номінальному навантаженні (24 В)	550 мА
Загальний струм (живлення системи)	1700 мА

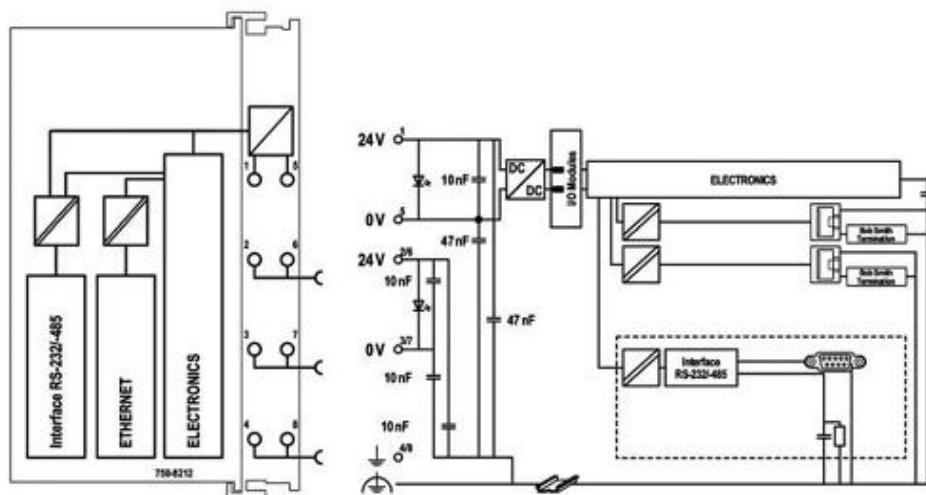
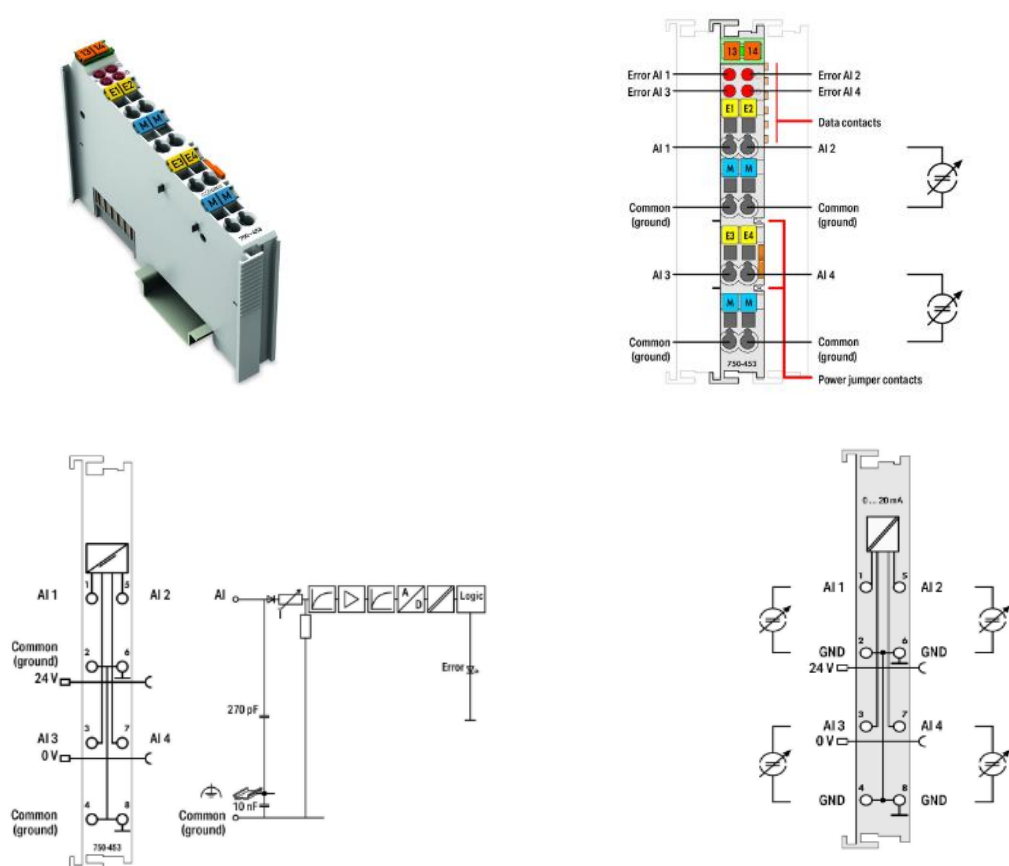


Рис. 5.1 – Технічні характеристики та схема підключення контролера WAGO 750-8212.

Для введення аналогових сигналів у контролер будемо використовувати 4-канальний модуль аналогового введення WAGO 750-453, і 4-канальний модуль аналогового виводу WAGO 750-555 для виведення аналогових сигналів, для вводу дискретних сигналів до контролеру будемо використовувати 8-канальний модуль дискретного вводу WAGO 750-430, а для виводу дискретних сигналів використаємо 8-канальний модуль

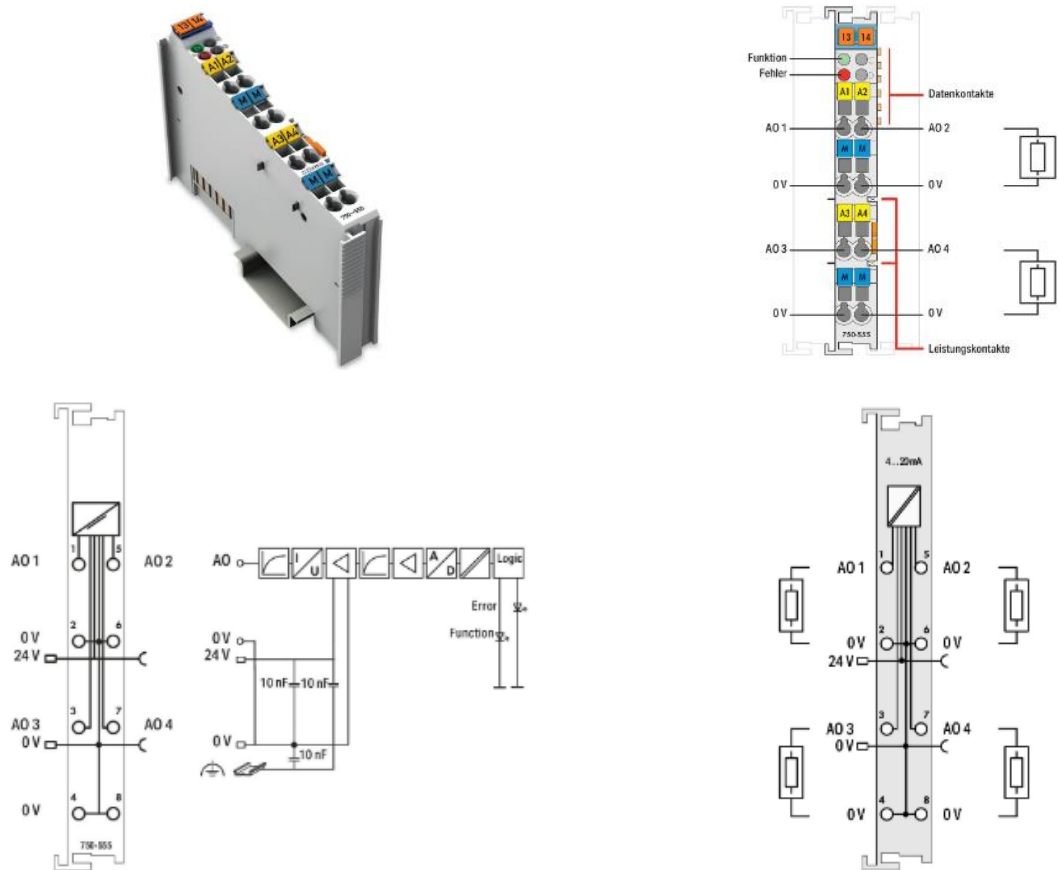
дискретного виводу WAGO 750-530, зовнішній вигляд, схеми підключення та технічні параметри наведені на рис. 5.2, рис. 5.3, рис. 5.4, рис. 5.5.



Технічні дані

Кількість аналогових входів	4
Загальна кількість каналів (модуль)	4
Тип сигналу	поточний
Тип сигналу (поточний)	0 ... 20 mADC
Підключення датчика	4 x (2-провідний)
Вхідна напруга (макс.)	32 В
Характеристики сигналу	Односторонні
Роздільна здатність (біт)	12 біт
Вхідний опір (макс.)	100 Ом
Ширина даних	4 x 16-бітних даних; 4 x 8-розрядний контроль/статус (опціонально)
Час перетворення (тип.)	10 мс
Похибка вимірювання (еталонна температура)	25 °C
Похибка вимірювання, відхилення (макс.) від верхнього значення діапазону	0,1 %
Температурна похибка (макс.) верхнього значення діапазону	0,01 %/K
Напруга живлення (система)	5 В постійного струму; через дані контакти
Споживаний струм (системне живлення 5 В)	65 мА

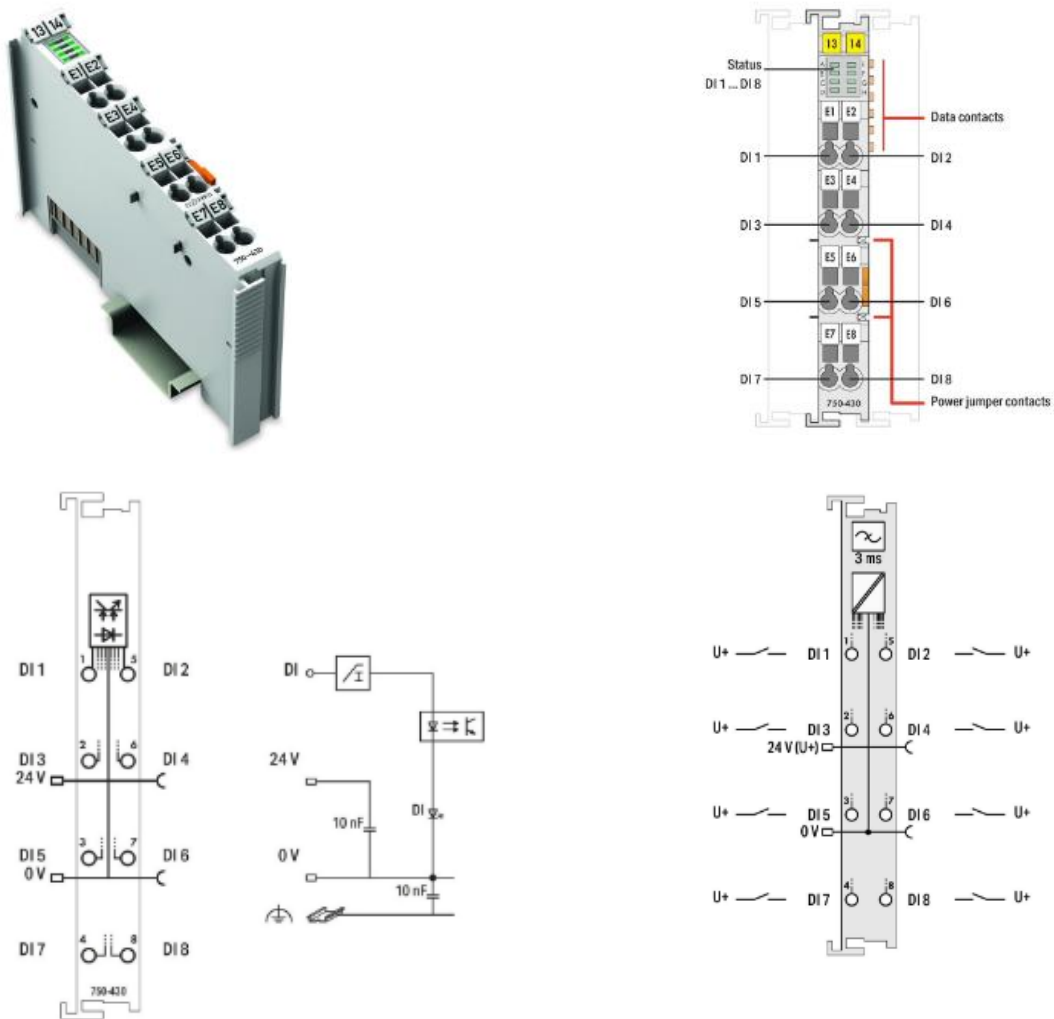
Рис. 5.2 – Загальний вигляд модуля ПЗО WAGO 750-453, його характеристики та схема підключення.



Технічні дані

Кількість аналогових виходів	4
Загальна кількість каналів (модуль)	4
Тип сигналу	поточний
Тип сигналу (поточний)	4 ... 20 мАД
Підключення приводу	4 x (2-провідний)
Роздільна здатність [біт]	12 біт
Ширина даних	4 x 16-бітних даних; 4 x 8-розрядний контроль/статус (опціонально)
Опір навантаження	Або 0 ... 300 Ω або 300 ... 600 Ω (однаковий опір для всіх імпедансів навантаження)
Час перетворення (тип.)	10 мс
Похибка вимірювання (еталонна температура)	25 °C
Похибка вимірювання, відхилення (макс.) від верхнього значення діапазону	0,1 %
Температурна похибка (макс.) верхнього значення діапазону	0,01 %/K
Вихідна помилка, контрольна температура	
Помилка виведення, відхилення (макс.) верхнього значення діапазону	0,1 %

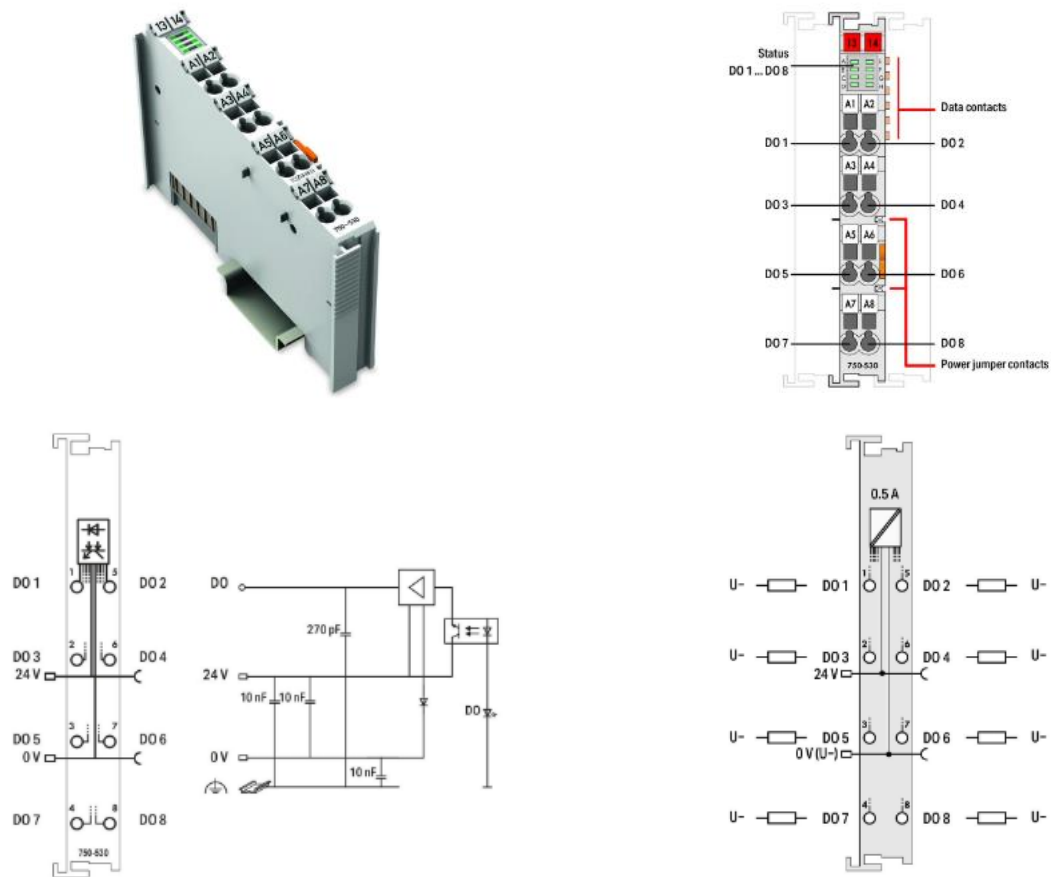
Рис. 5.3 – Загальний вигляд модуля ПЗО WAGO 750-555, його характеристики та схема підключення.



Технічні дані

Кількість цифрових входів	8
Загальна кількість каналів (модуль)	8
Тип сигналу	цифровий
Тип сигналу (напруга)	24 В постійного струму
Підключення датчика	8 x (1-провідний)
Вхідна характеристика	перемикання високої сторони
Вхідний фільтр (цифровий)	3 мс
Вхідний струм на канал для сигналу (1) тип.	2.8 мА
Діапазон напруги для сигналу (0)	-3 ... +5 В постійного струму
Діапазон напруги для сигналу (1)	15 ... 30 В постійного струму
Ширина вхідних даних (внутрішня) макс.	8 біт
Напруга живлення (система)	5 В постійного струму; через дані контактів
Споживаний струм (системне живлення 5 В)	17 мА

Рис. 5.4 – Загальний вигляд модуля ПЗО WAGO 750-430, його характеристики та схема підключення.



Технічні дані

Кількість цифрових виходів	8
Загальна кількість каналів (модуль)	8
Тип сигналу	цифровий
Тип сигналу (напруга)	24 В постійного струму
Підключення приводу	8 x (1-провідний)
Вихідна характеристика	перемикання високої сторони
Вихідний струм на канал	0,5 А
Вихідний струм	захислений від короткого замикання
Частота перемикання (макс.)	2 кГц
Тип навантаження	Резистивне, індуктивне, лампове навантаження
Розсіювання енергії відключення індуктивного навантаження (макс.)	0,9 Дж
Ширина вихідних даних (внутрішня) макс.	8 біт
Напруга живлення (система)	5 В постійного струму; через дані контакти
Споживаний струм (системне живлення 5 В)	25 мА

Рис. 5.5 – Загальний вигляд модуля ПЗО WAGO 750-530, його характеристики та схема підключення.

Додатково нам знадобиться кінцевий модуль шини 750-600. Зв'язок контролера з комп'ютером здійснюється за допомогою інтерфейсу Ethernet. Враховуючи обраний контролер, модулі ПЗО до нього, та список змінних, які

необхідно вводити та виводити з контролера схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи автоматичного керування прийме наступний вигляд. (рис. 5.6).

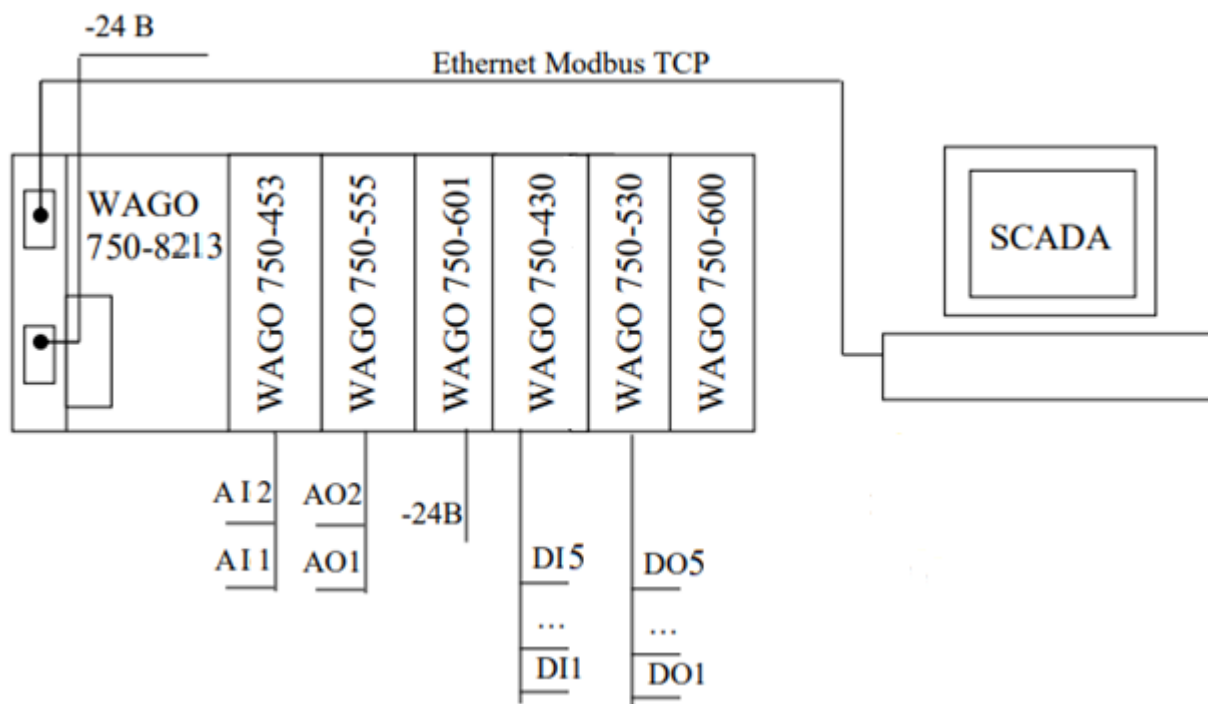


Рис. 5.6 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом охолодження виноматеріалу в установці швидкого охолодження.

Існуюча система керування процесом охолодження виноматеріалу в установці швидкого охолодження була доповнена функцію гарантуючого керування температури вина в охолоджувальному резервуарі яка забезпечує підвищення енергетичної ефективності роботи установки в умовах дії координатних та параметричних збурень. Також САР була доповнена алгоритмами на основі нейронних мереж. Інтегровані алгоритми не потребують істотного збільшення обчислюваних ресурсів. Існуюча система не потребує технічних доповнень та реалізації додаткових каналів вимірювання.

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

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені складні алгоритми керування процесом охолодження виноматеріалу може розроблятися безпосередньо у середовищі CoDeSys 3.5 з використанням стандартних мов програмування контролерів. Наприклад мовами ST та LAD. Для цього потрібно розроблені у системі Simulink алгоритми керування перевести у цифрову форму та вид придатний для програмування (наприклад різницеві рівняння у рекурентній формі), а потім написати відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загальніший підхід потребує багато часу. Альтернативою цьому є варіант прямої конвертації отриманих алгоритмів гарантуючого керування з системи Simulink у середу програмування контролерів CoDeSys 3.5. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.

Програмну реалізацію розроблених алгоритмів керування процесом охолодження виноматеріалу будемо проводити з використанням пакету Simulink PLC Coder з його бібліотекою функціональних блоків PLCLib. Для цього використовуючи блоки бібліотеки PLCLib проведемо цифрову реалізацію алгоритмів керування процесом охолодження виноматеріалу у моделі Simulink. Розглянемо конвертацію алгоритмів керування. Отримана модель СГК з ПІД регуляторами та іншими модулями підготовленими до конвертації наведена на рис. 5.7.

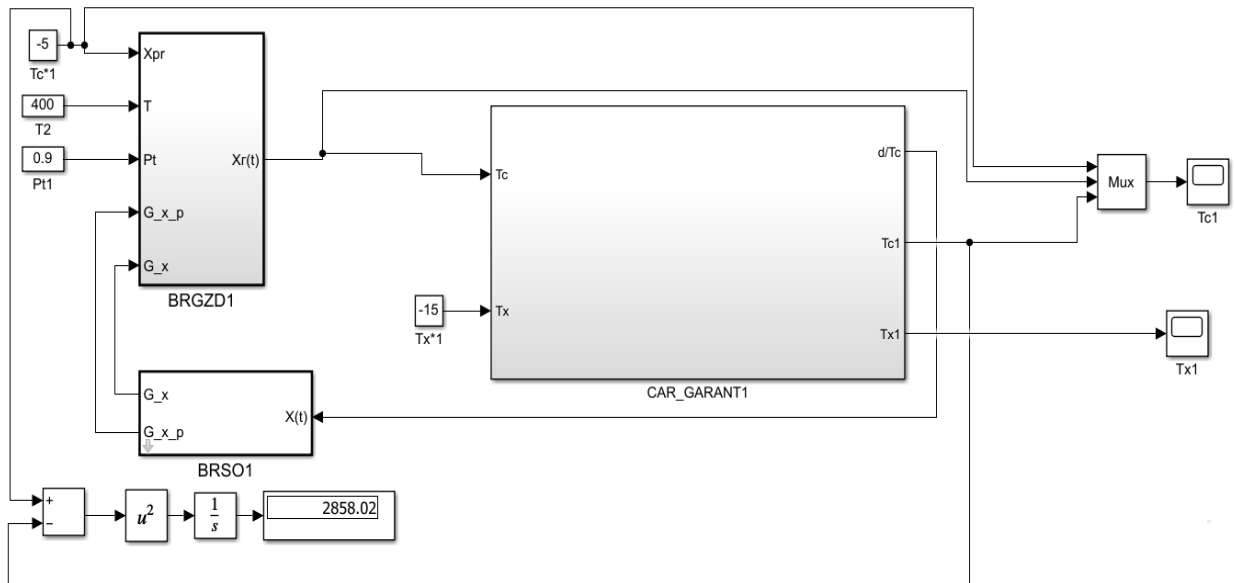


Рис. 5.7 – Схема моделювання САК процесом охолодження виноматеріалу з цифровими алгоритмами керування, які підготовлені до конвертації.

На рис. 5.8 – 5.10 наведені схеми моделювання алгоритмів гарантуючого керування та моделі САР.

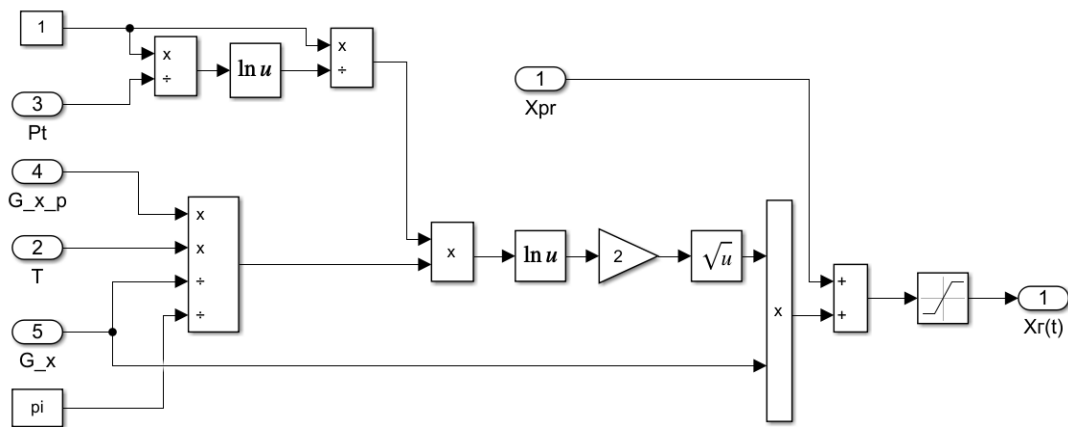


Рис. 5.8. Схема блока BRGZD (БРГЗД – блок розрахунку, гарантуючого заданого значення)

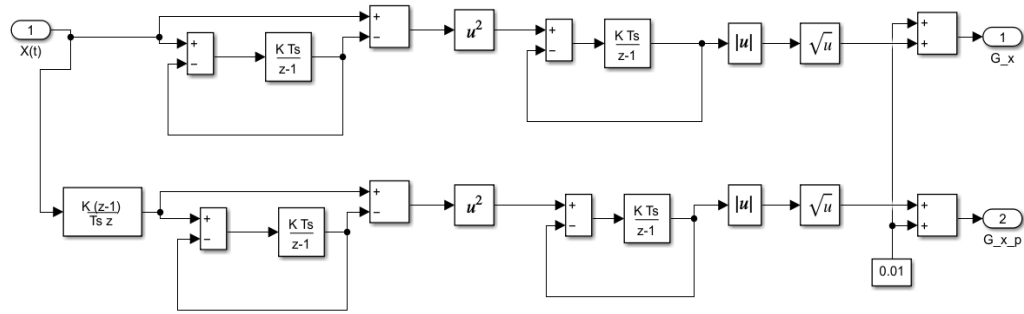


Рис. 5.9. Схема блока BRSO (БРСО – блок розрахунку статистичних оцінок на ковзаючому інтервалі часу).

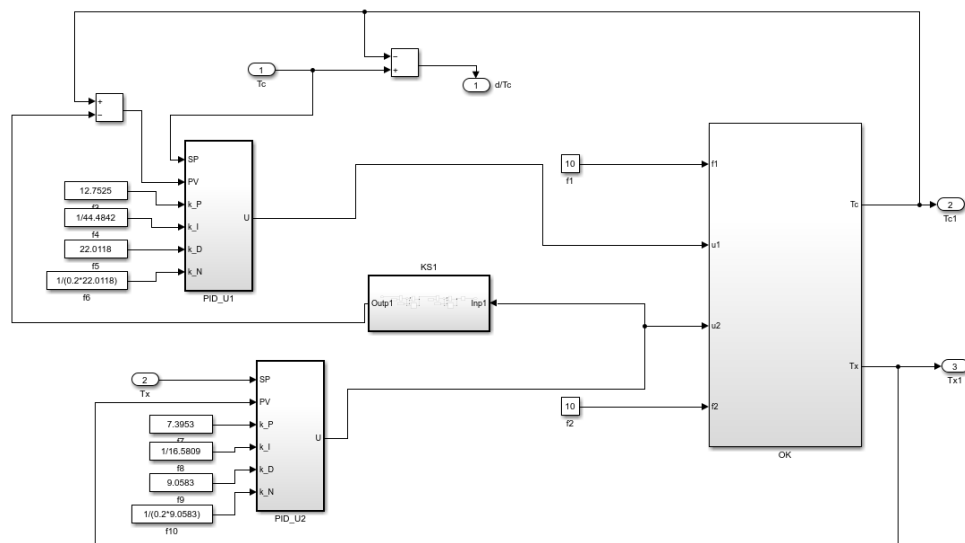


Рис. 5.10. Схема блока CAR_GARANT1.

На рис. 5.11 та 5.12 наведено схеми моделювання коригуючого зв'язку та ПІД регулятора.

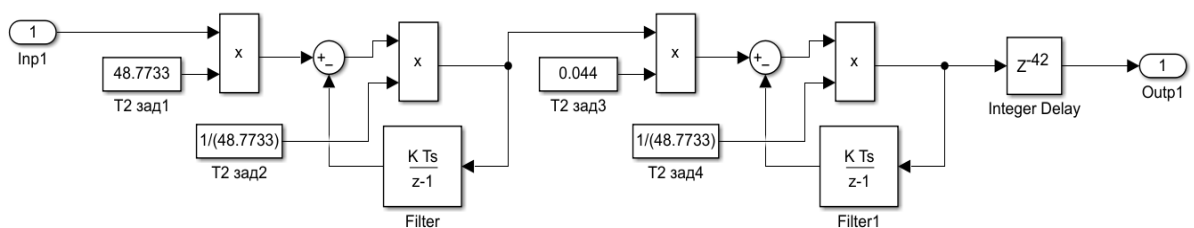


Рис. 5.11. Схема моделювання коригуючого зв'язку «KS1».

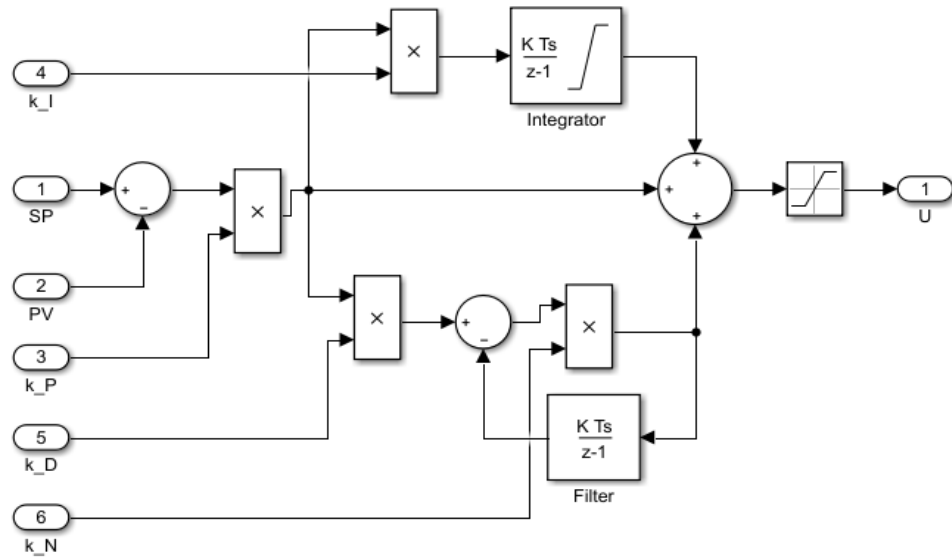


Рис. 5.12. Схема цифрового ПІД-регулятора.

Отримання z-передатних функцій проводилось у системі Matlab. Приклад отримання z-передатної функції наведено на рис. 5.13.

```

Command Window
>> plclib
>> sys=tf([30.77 0],[25.53 1])

sys =

    30.77 s
    -----
   25.53 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> sysd=c2d(sys,0.5,'zoh')
Error using DynamicSystem/c2d (line 53)
The second input argument of the "c2d" command must be a positive scalar.

>> sysd=c2d(sys,0.5,'zoh')

sysd =

    1.205 z - 1.205
    -----
           z - 0.9806

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.

>> sys=tf([1],[25.53 1])

sys =

    1
    -----
   25.53 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> sysd=c2d(sys,0.5,'zoh')

sysd =

    0.01939
    -----
           z - 0.9806

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.

fx >>

```

Рис. 5.13. Приклад отримання z-передатної функції з її неперервного аналогу.

Коригуючий зв'язок між регуляторами температури холодоагенту на вході в теплообмінник та температури вина в охолоджувальному резервуарі

приведений до цифрового вигляду. На рис. 5.14 наведена схема моделювання для оцінювання результатів роботи цифрового та неперервного варіантів коригуючого зв'язку. На рис. 5.15 та 5.16 наведено внутрішню структуру цифрового варіанта коригуючого зв'язку та результати моделювання, за якими видно що відмінності між цифровим та неперервним варіантами майже немає.

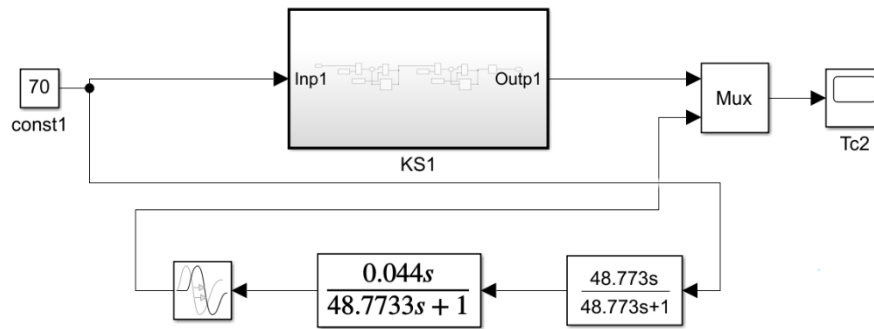


Рис. 5.14. Схема моделювання для оцінювання результатів роботи цифрового та неперервного варіантів коригуючого зв'язку.

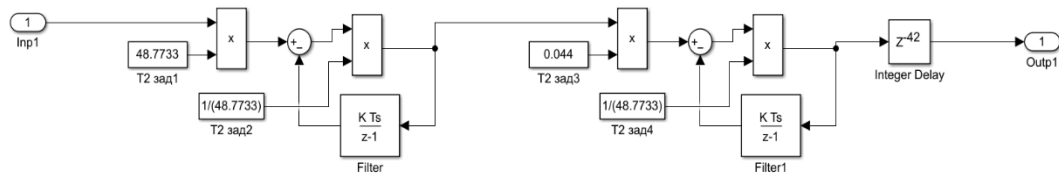


Рис. 5.15. Внутрішня структура цифрового варіанта коригуючого зв'язку.

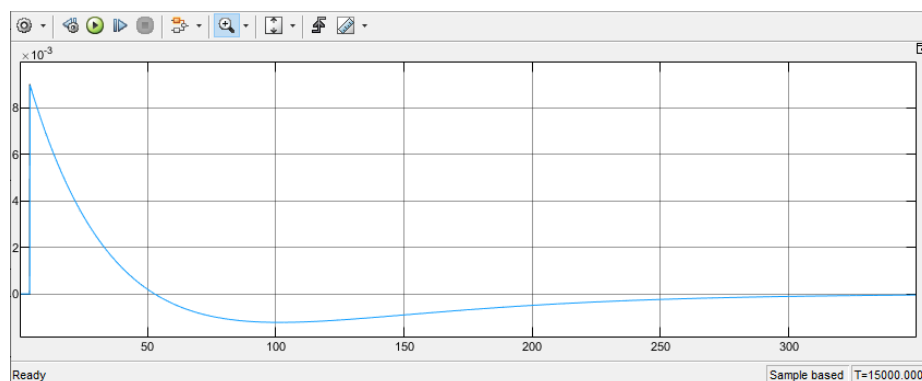


Рис. 5.16. Результати роботи цифрового та неперервного варіантів коригуючого зв'язку.

На рис. 5.17 наведена схема моделювання об'єкта керування.

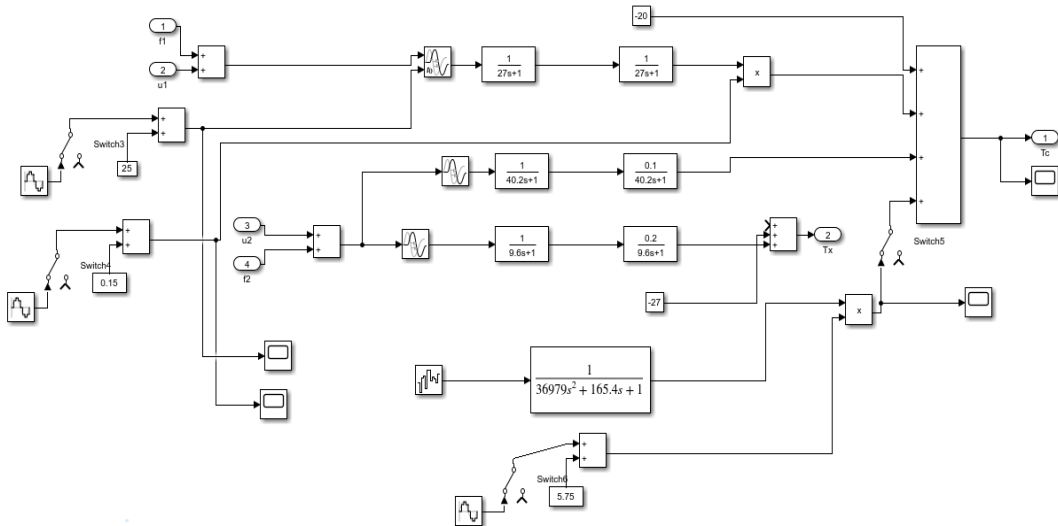


Рис. 5.17. Схема моделювання фрагменту об'єкта керування.

Результати моделювання системи керування при використанні цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис.5.18.

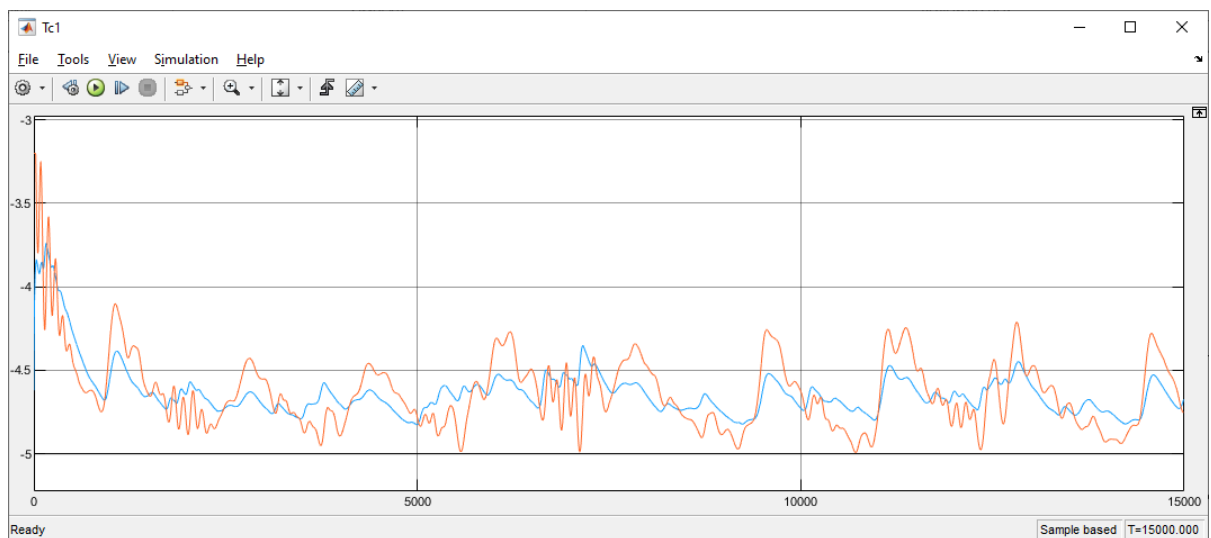


Рис. 5.18. Результати моделювання системи гарантуючого керування за каналом регулювання температури вина в охолоджувальному резервуарі.

Результати моделювання системи керування при використанні цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис.5.18. Вони повністю відповідають попереднім результатам і підтверджують

правильність цифрової реалізації алгоритмів регулювання при підготовці до конвертування.

Для кожної підсистеми яка буде конвертуватися у мову ST середовища CoDeSys 3.5 проведемо налаштування рис 5.19.

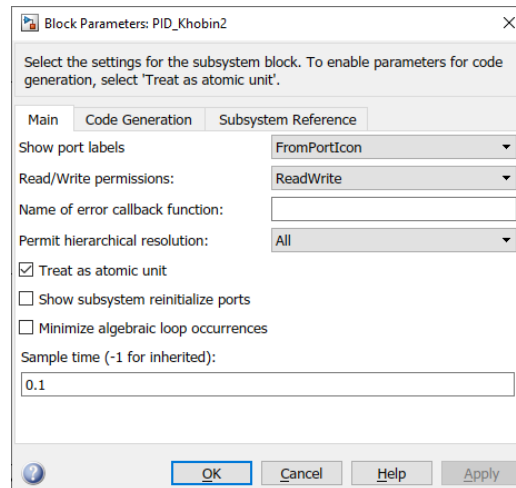


Рис. 5.19. Вікно налаштування підсистем для їх конвертації.

Пакет Simulink PLC Coder налаштуємо для компіляції коду для середовища 3S CoDeSys 3.5 (рис. 5.20).

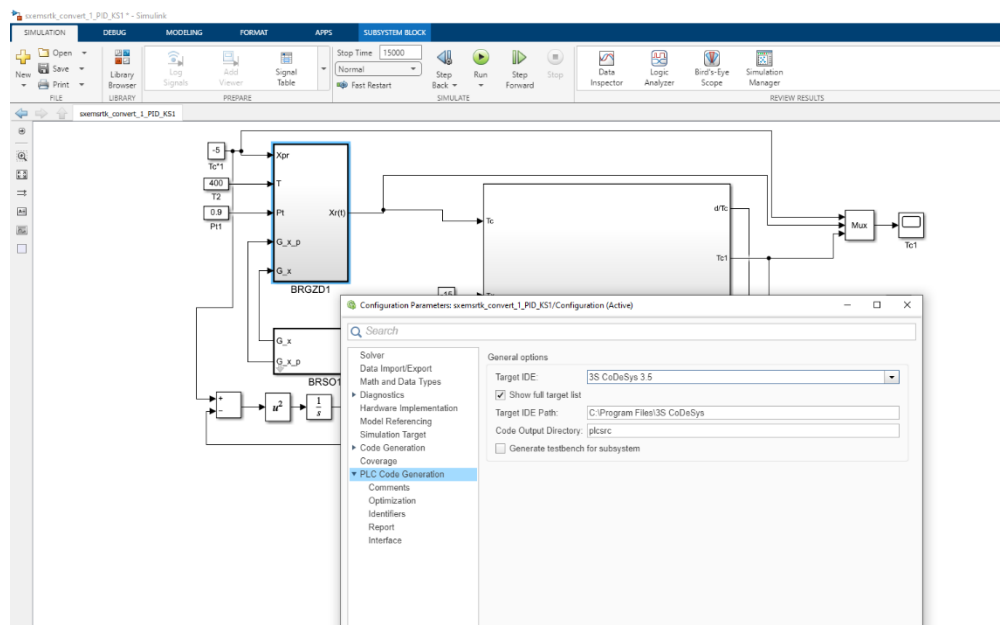


Рис. 5.20. Вікно налаштування пакету Simulink PLC Coder.

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для блоку BRGZD, BRSO та блоків коригуючих зв'язку та регуляторів. На рис. 5.21 та 5.22 наведена процедура генерації коду для BRGZD.

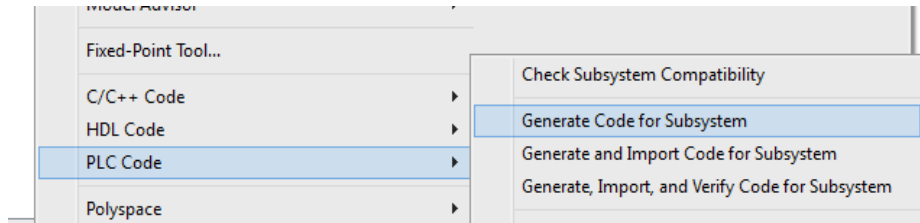


Рис 5.21 – Компіляція коду.

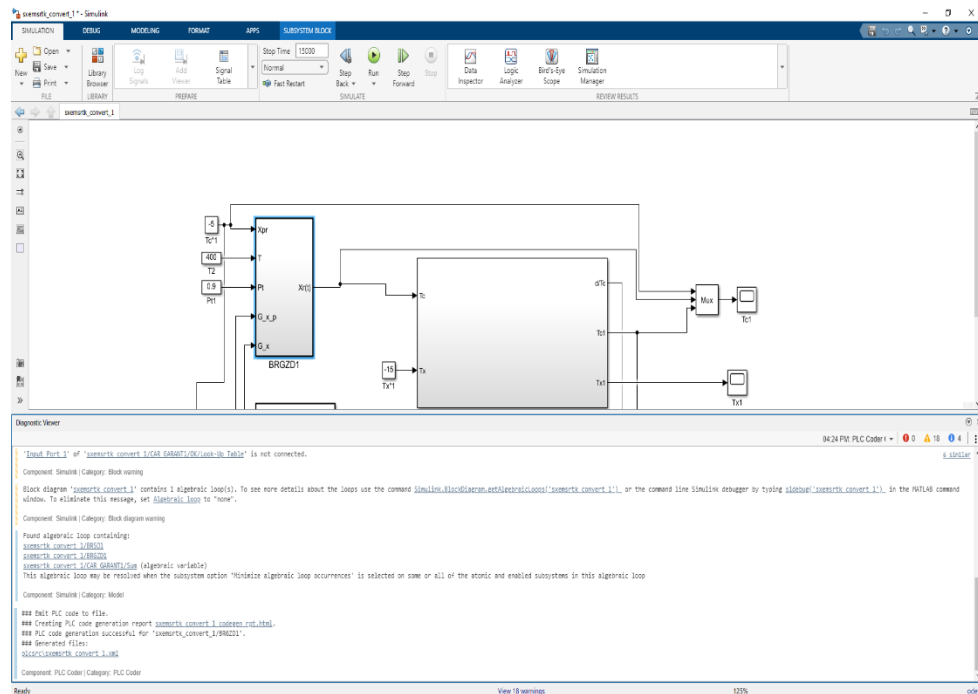


Рис. 5.22. Результати успішної генерації коду BRGZD для середовища 3S CoDeSys 3.5.

На рис. 5.23 наведено вихідний генерований код мовою ST для блоку BRGZD.

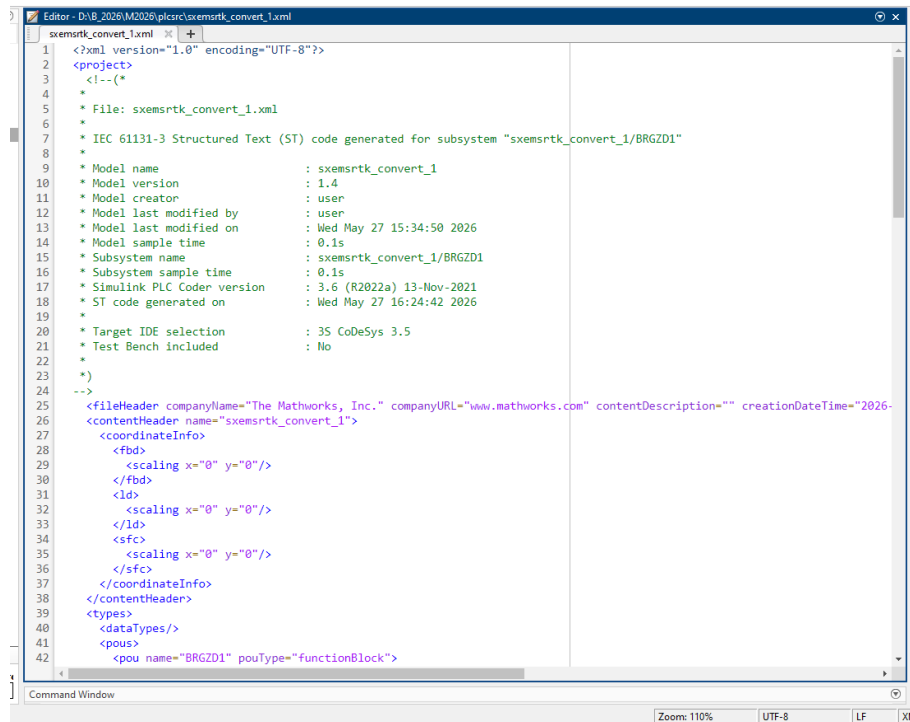


Рис. 5.23. Вихідний генерований код мовою ST блоку BRGZD для середовища програмування 3S CoDeSys 3.5.

Програмну реалізацію алгоритмів керування на базі нейронних мереж проводимо аналогічним чином. На рис. 5.24 наведена схема моделювання САР з нейронною мережею. А схема моделювання алгоритму на основі нейронної мережі наведена на рис. 5.25.

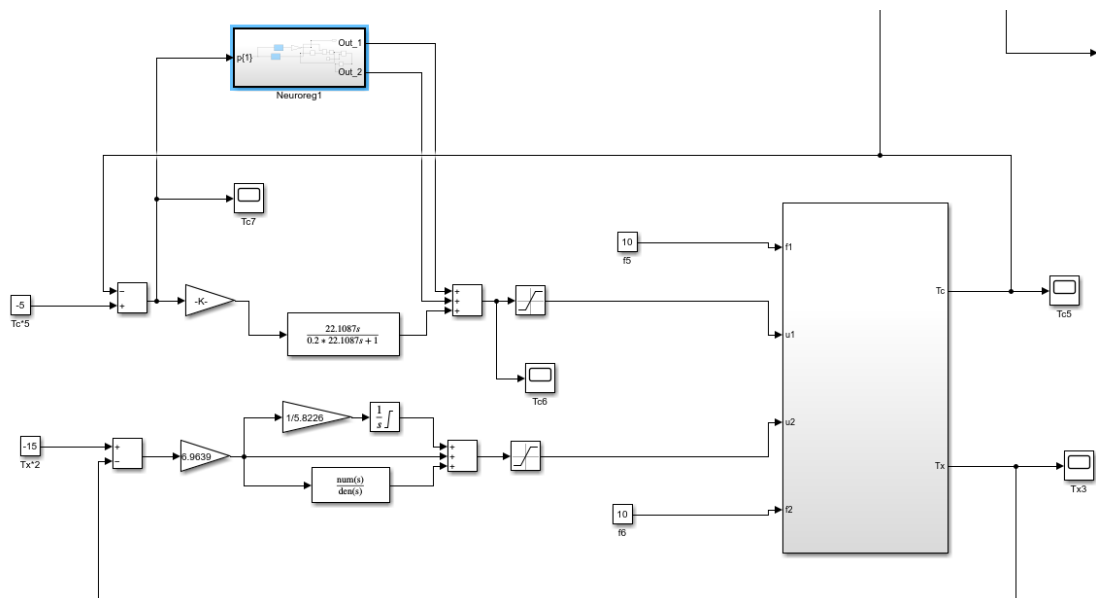


Рис. 5.24. Схема САР з нейронною мережею.

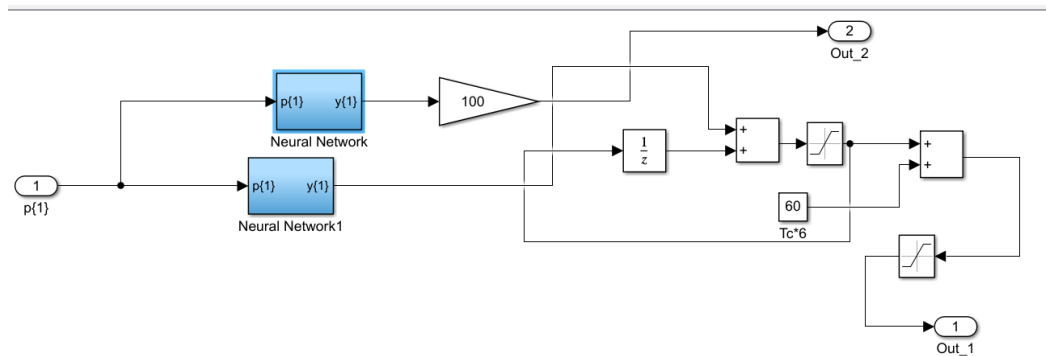


Рис. 5.25. Схема нейронної мережі для регулятора.

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для середовища 3S CoDeSys 3.5. На рис. 5.26 наведено вихідний генерований код мовою ST для блоку нейронної мережі.

```

1 CAP_combinPID_22cxemNepod_conv.xml
2 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
3 <project>
4   <!--(*)
5   * File: CAP_combinPID_22cxemNepod_conv.xml
6   *
7   * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem "CAP_combinPID_22cxemNepod_conv/Neuroreg1"
8   *
9   * Model name          : CAP_combinPID_22cxemNepod_conv
10  * Model version       : 1.1
11  * Model creator      : user
12  * Model last modified by : user
13  * Model last modified on : Thu May 28 12:45:33 2026
14  * Model sample time   : 0.1s
15  * Subsystem name     : CAP_combinPID_22cxemNepod_conv/Neuroreg1
16  * Subsystem sample time : 0.1s
17  * Simulink PLC Code version : 3.6 (R2022a) 13-Nov-2021
18  * ST code generated on : Thu May 28 14:10:10 2026
19  *
20  * Target IDE selection : 3S CoDeSys 3.5
21  * Test Bench included : No
22  *)
23  -->
24  -->
25  <fileHeader companyName="The Mathworks, Inc." companyURL="www.mathworks.com" contentDescription="" creationDateTime="2026-
26  <contentHeader name="CAP_combinPID_22cxemNepod_conv">
27    <coordinateInfo>
28      <fbid>
29        <scaling x="0" y="0"/>
30      </fbid>
31      <ld>
32        <scaling x="0" y="0"/>
33      </ld>
34      <sfsc>
35        <scaling x="0" y="0"/>
36      </sfsc>
37    </coordinateInfo>
38  </contentHeader>
39  <types>
40    <dataTypes/>
41    <pous>

```

Рис. 5.26 – Вихідний генерований код мовою ST блоку нейронної мережі для середовища програмування 3S CoDeSys 3.5.

Після генерації коду в середовищі MATLAB додаємо отриманий код у існуючий проект у середовищі 3S CoDeSys 3.5. Процес інтеграції програмних модулів у проект 3S CoDeSys 3.5 наведено на рис. 5.27, а на рис 5.28 приклад імпортованого генерованого коду ПД-регулятора.

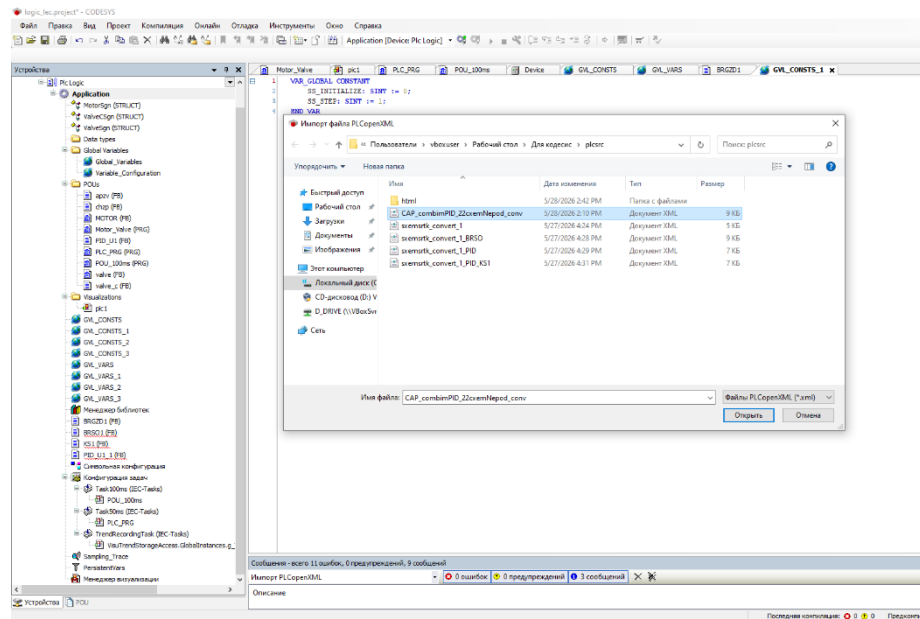


Рис. 5.27 – Процедура імпорту генерованого коду в середовище програмування 3S CoDeSys 3.5 і створення відповідних функціональних блоків.

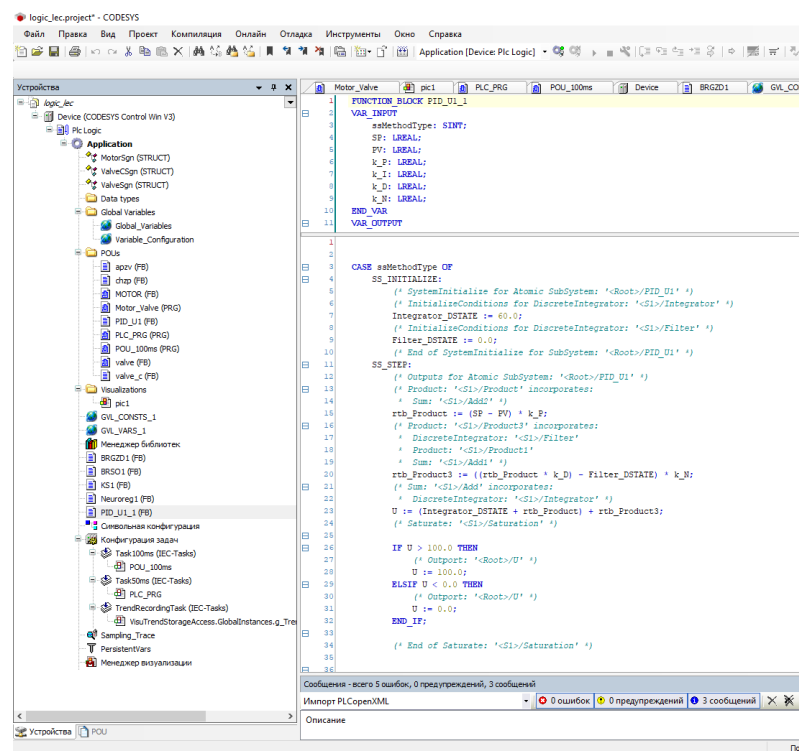


Рис. 5.28 – Приклад імпортованого генерованого коду ПД-регулятора в середовищі 3S CoDeSys 3.5.

Загальний вигляд розробленого проекту керування процесом охолодження виноматеріалу в середовищі 3S CoDeSys 3.5 з доданими новими блоками наведено на рис.5.29.

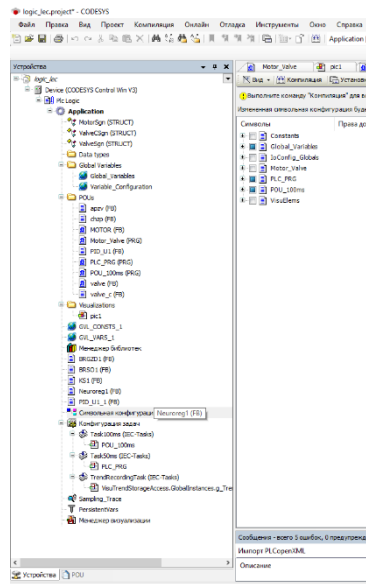


Рис. 5.29 – Загальний вид вікна проекту в середовищі 3S CoDeSys 3.5.

Алгоритми регулювання температури розсолу та температури вина у баку та алгоритм гарантуючого керування реалізовані у програмі POU_100ms. Фрагмент коду програми наведено на рис. 5.30.

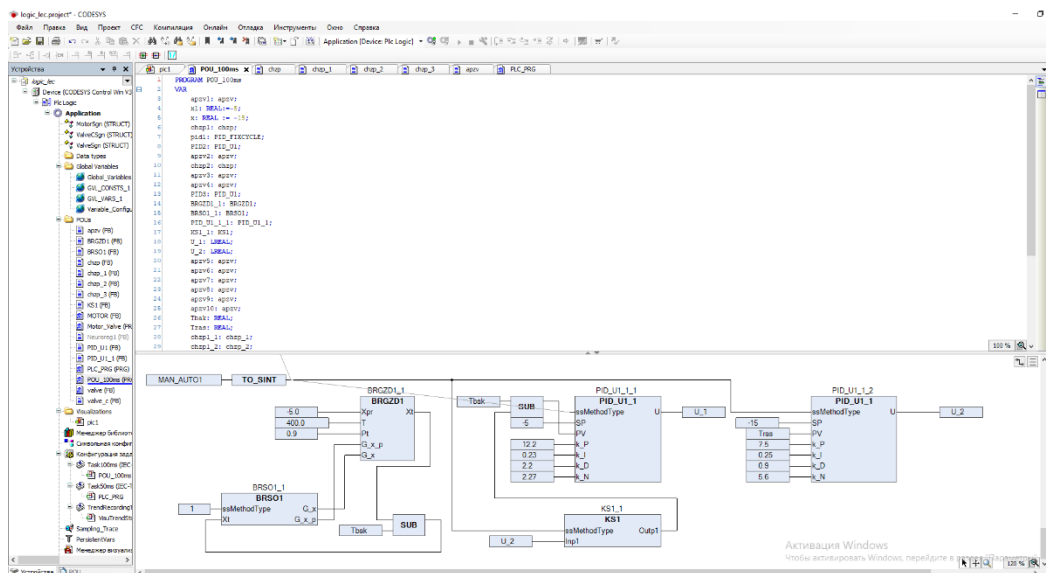


Рис. 5.30. Фрагмент коду у програмі POU_100ms яка реалізує розрахунок регуляторів температури та алгоритм гарантуючого керування.

Провести тестування програми гарантуючого керування в режимі емуляції контролера досить складно, тому зупинимося на тестуванні програми SAP з ПІД-регуляторами та коригуючим зв'язком. Проведемо тестування

програми в режимі емуляції контролеру. Для цього доповнимо програму регулювання моделлю об'єкта керування і запусимо розрахунок моделі САР. Фрагмент програми моделі ОК наведено на рис. 5.31. А результати тестування САР температури розсолу та температури виноматеріалу наведені на рис. 5.32 - 5.33. Графіки наведено у вікнах АРМ оператора SCADA – системи WinCC 8.0.

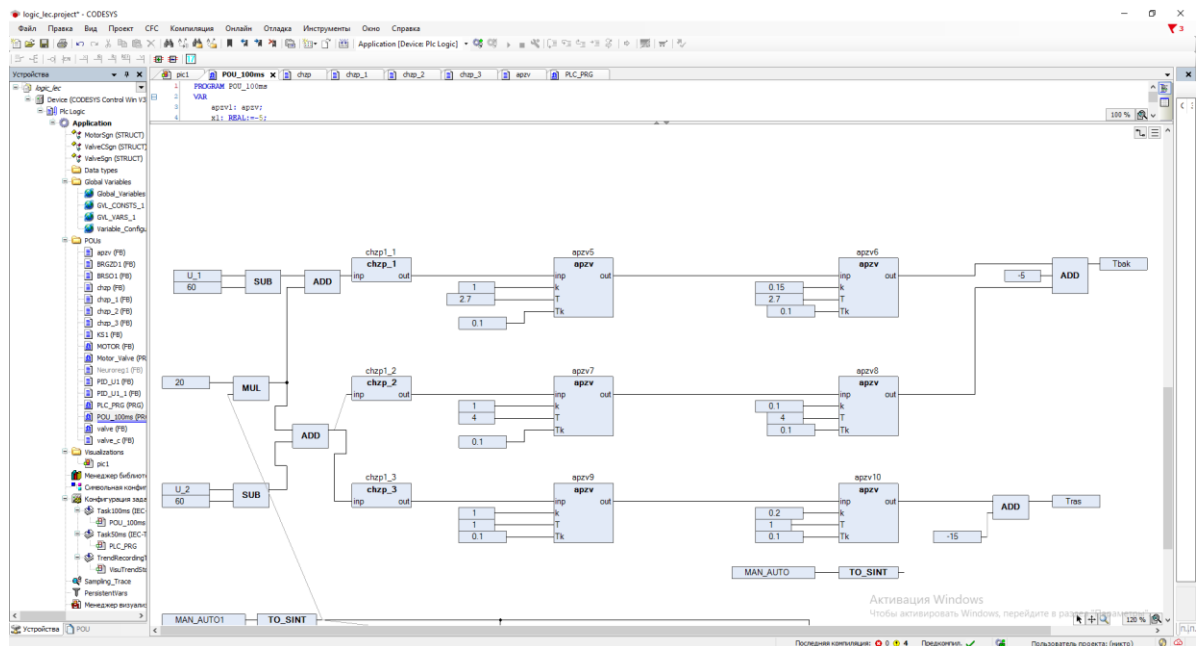


Рис. 5.31. Фрагмент програми яка реалізує розрахунок моделі ОК.

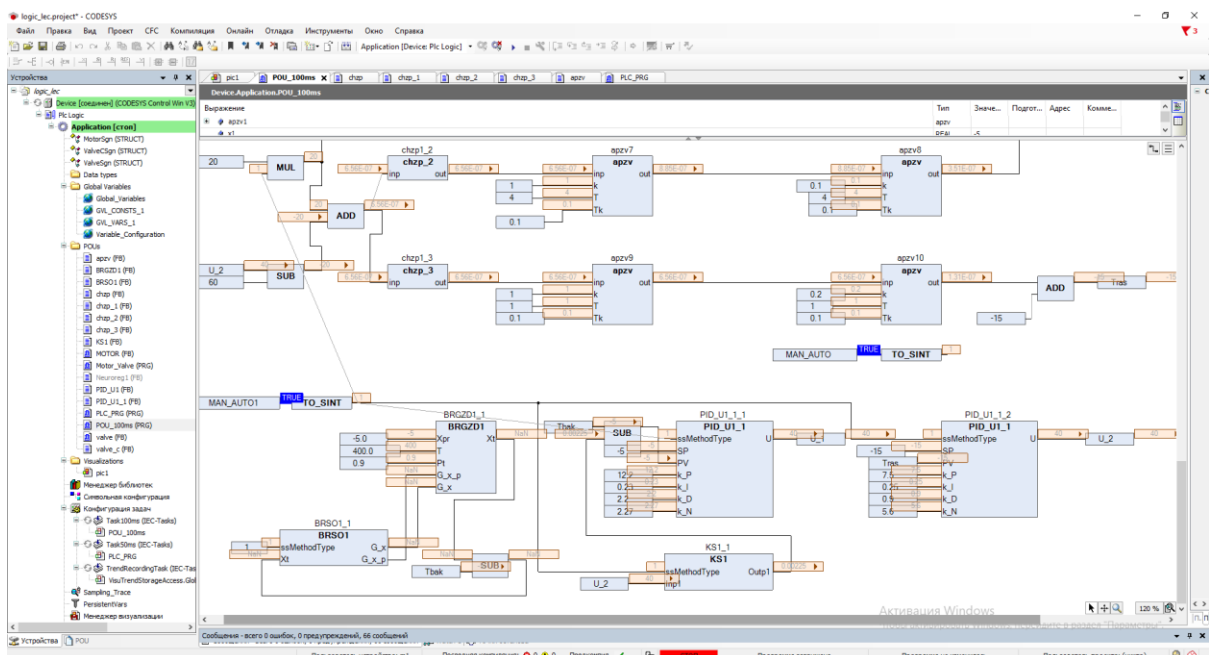


Рис. 5.32. Фрагмент програми алгоритмів регулювання у режимі відладки.

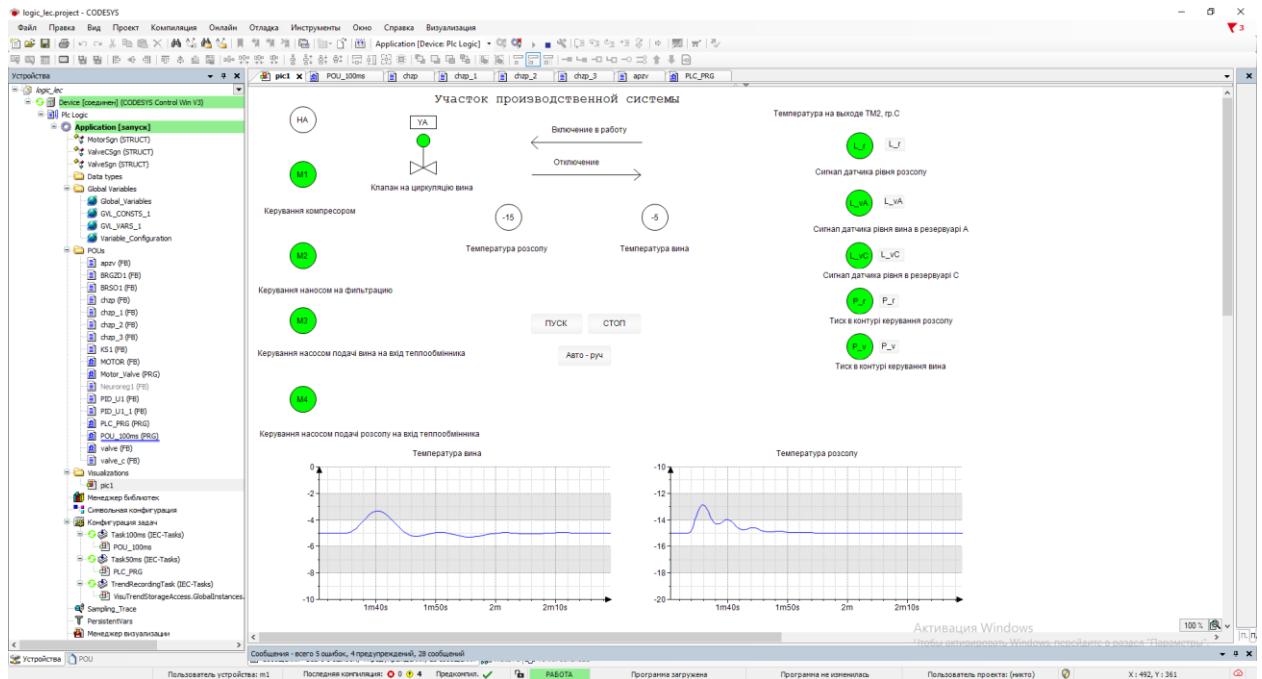


Рис. 5.33. Результати тестування CAP температури розсолу та температури виноматеріалу (вікно APM 3S CoDeSys 3.5).

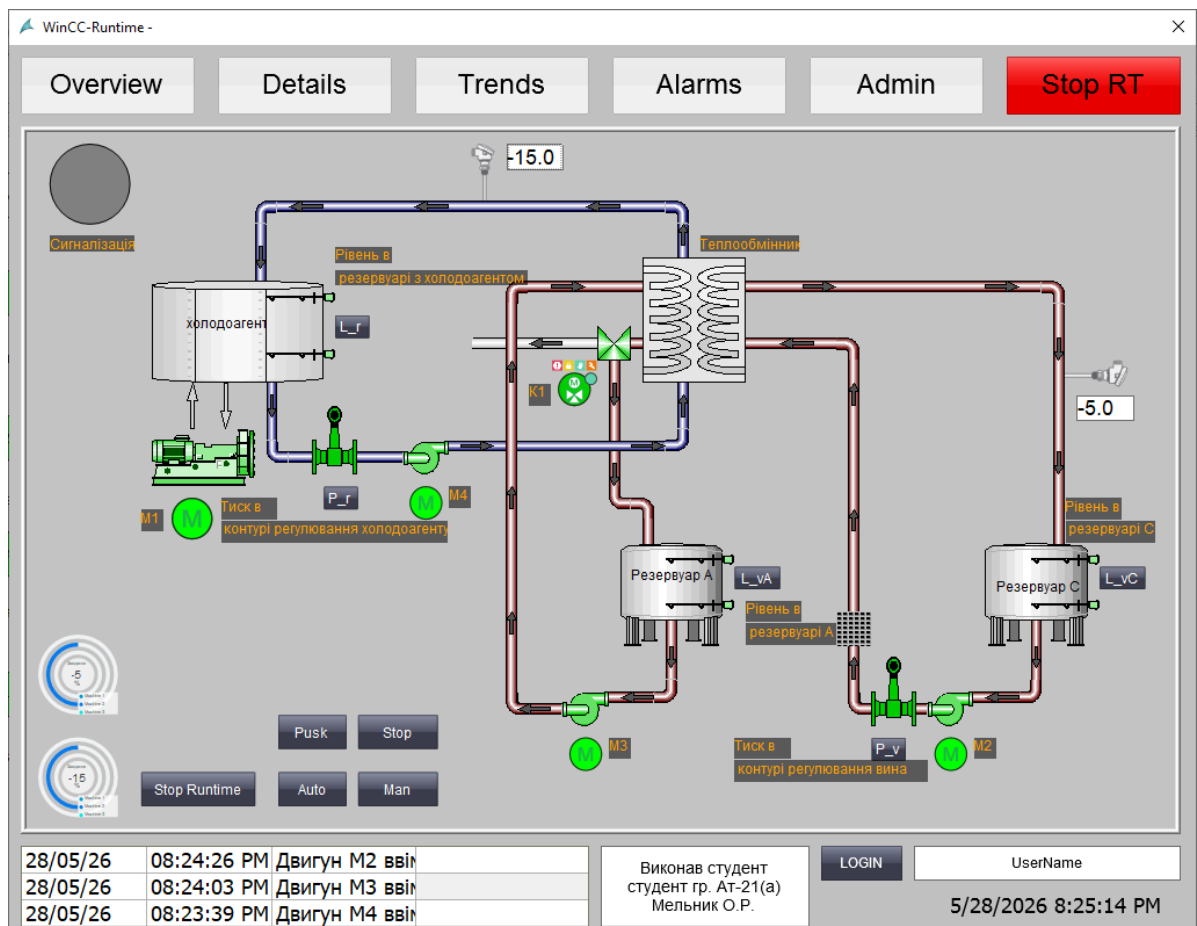


Рис. 5.34. Результати тестування CAP (головне вікно SCADA).

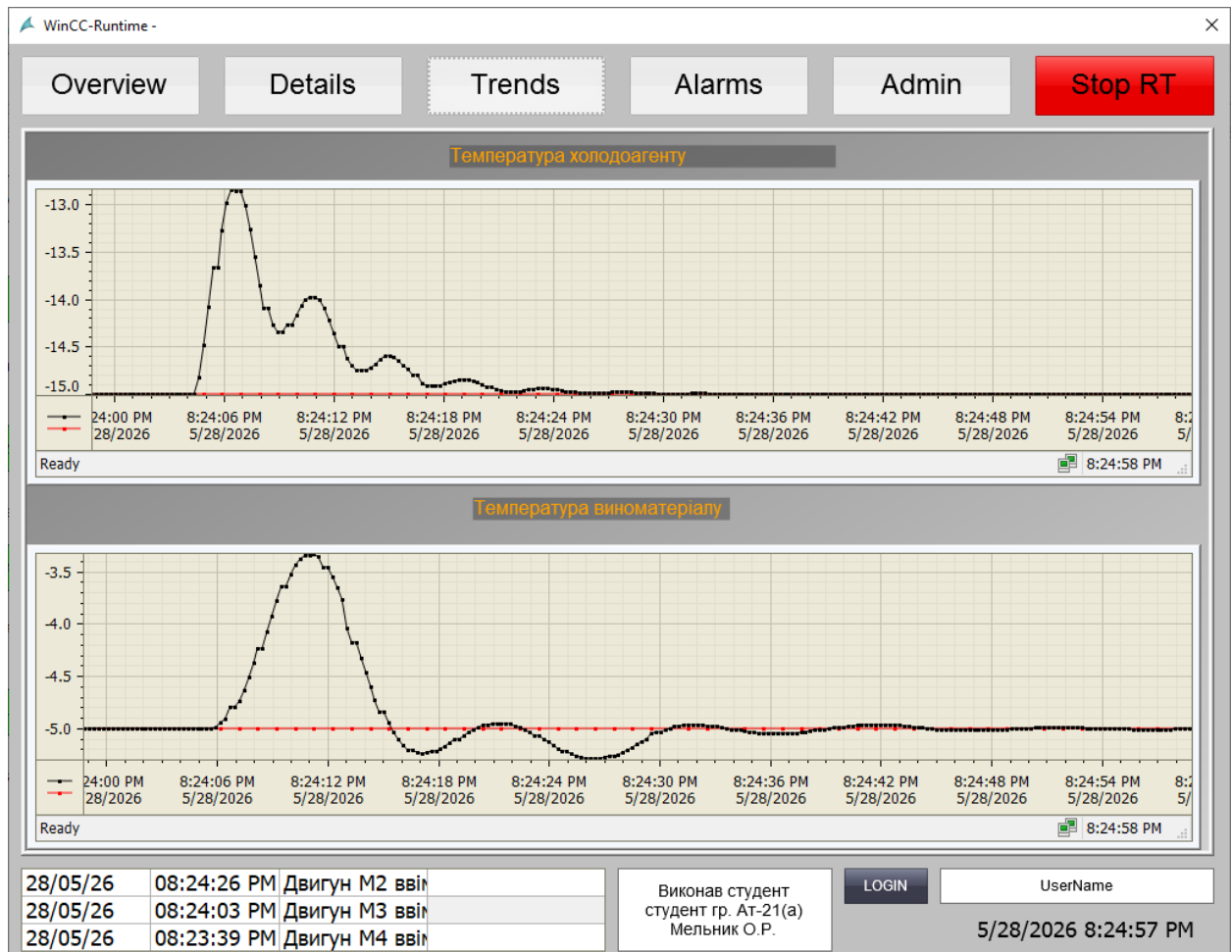


Рис. 5.35. Результати тестування САР температури розсолу та температури виноматеріалу (вікно трендів SCADA).

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

5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

Застосування в системі керування процесом охолодження виноматеріалу алгоритмів гарантуючого керування температурою виноматеріалу в охолоджувальному резервуарі дозволить підтримувати температуру виноматеріалу ближче до нижньої границі -5°C не порушуючи регламенту і не переохолоджуючи виноматеріал. Це дозволить забезпечити зниження питомих витрат енергії холоду на охолодження приблизно до 3%, при збереженні якості вина.

5.4 Висновки за розділом.

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

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

3. Вдосконалення системи керування забезпечить більш якісне керування процесом охолодження виноматеріалу.

Висновки

В кваліфікаційній роботі магістра був проведений опис ділянки технологічного процесу швидкого охолодження виноматеріалу, його агрегатів. Проведення параметризація схеми ділянки ТП, розроблена параметрична схема ТП виявлені фізичні, біологічні та інші параметри середовищ ТП, які змінюються в ході процесу, оцінено існуючий рівень реалізації функцій логічного (логікопрограмного) керування, обрано кінцеві економічні цілі.

Був проведений структурний та оптимально параметричний синтез САР базової структури з ПД – регулятором, та САР підвищеної динамічної точності.

Була розроблена модель САР з нечітким регулятором. Було встановлено, що за якістю регулювання дана САР функціонує трохи гірше, ніж САР з традиційним ПД-регулятором, коли об'єкт управління має нелінійну статичну характеристику в каналі регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САР було виконано тренування штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Також була розроблена модель САР з регулятором, представленим штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація цієї системи була проведена за тими ж умовами, що й для САР з традиційним ПД-регулятором.

У результаті моделювання різних САР було встановлено, що за якістю регулювання САР з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САР, за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 0,12 при САР з нейрорегулятором і 0,139 при САР з традиційним ПД-регулятором.

Була модернізована САР базової структури в СГК процесу швидкого охолодження виноматеріалу, проведені порівняльні експерименти САР ПДТ та СГК які підтвердили ефективність її застосування. СГК досить непогано

виконує свою функцію, завдяки чому забезпечується зниження браку готової продукції та питомих енерговитрат за рахунок підтримки температури близької до межі регламенту без його порушення. У всіх експериментах в умовах дії збурень та зміни ймовірності виходу за граничну межу СГК є кращою, ніж САР базової структури, і тому подальше її використання є доцільним.

Також у КРМ було розроблено алгоритми логікопрограмного керування технологічним процесом, які в подальшому використовувалися для розробки технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом швидкого охолодження виноматеріалу, здійснений вибір промислового контролера та його блоків вводу/виводу, в середовищі CoDeSys розроблені програми, які реалізують алгоритми логічного керування та регулювання, проведена їх перевірка, яка засвідчила роботоспроможність програм та їх відповідність алгоритмам керування, а також в середовищі SCADA - системи WinCC розроблено програмне забезпечення АРМ оператора і наладчика САК процесу керування швидким охолодженням виноматеріалу. АРМ дозволяє контролювати хід технологічного процесу, задавати режими роботи, здійснювати перемикання режимів управління обладнанням (АВТ / РУЧ) і управляти в ручному режимі окремим обладнанням.

Література

1. ДСТУ 3008:2015 Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Київ, ДП УкрНДНЦ, 2016. 31 с.
https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart_3008_2015.pdf
2. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу "Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів" [Електронний ресурс] : для студентів, які навчаються за спец. 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навчання / В. А. Хобін ; відп. за вип. В. А. Хобін ; Каф. автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем. — Одеса : ОНАХТ, 2016. — Електрон. текст. дан.: 96 с.
<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ-cnv.BibRecord.157312>
3. Хобін В.А., Світий І.М. Теорія автоматичного керування: Посібник до виконання комплексної курсової роботи. Одеська національна академія харчових технологій, 2020. – 277 с.
4. Муратов В. Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади [Текст] : навч. посіб./ В. Г. Муратов. — Вид. 2-ге, допов. — Київ : Освіта України, 2016. — 364 с.
<https://elc.library.onaft.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТcnv.BibRecord.155904>
4. Савицький, В. К. Технічні засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб. /В.К. Савицький, Р.М. Федоришин; Нац. ун-т "Львівська політехніка".— Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2018. - 292 с.
<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentSearchResult?jsessionid=6CD40B15F14DD9265BF7FD9A559C892C>
5. Левінський В. М. Конспект курсу лекцій з курсу "Технічні засоби автоматизації". Розділ "Виконавчі пристрої" [Електронний ресурс] : для студентів спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навчання / В. М. Левінський, М. В. Левінський ; відп. за вип. В. А. Хобін ; Каф. автоматизації технологічних процесів і робототехн. систем. — Одеса : ОНАХТ, 2018. — Електрон. текст. дані: 150 с.
<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ-cnv.BibRecord.162866>
6. Левінський В. М. Основи створення проектів автоматизації в середовищі ТІАPortal [Електронний ресурс] : електрон. навч. посіб. для підгот. студентів спец. "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / В. М. Левінський, М. В. Левінський ; Одес. нац. акад. харч. технологій. — Одеса : ОНАХТ, 2019. — Електрон. текст. дані: 177 с.
<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ-cnv.BibRecord.166190>
7. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці : конспект лекцій [Електронний ресурс]/ О. О. Фесенко, В. М. Лисюк, С. М. Неменуша, З. М. Сахарова ; Каф. безпеки життєдіяльності. — Одеса : ОНАХТ, 2021. — Електрон. текст. дані: 149 с.
<https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONAHТ.1739079>

8. Методичні вказівки до економічної складової кваліфікаційної роботи бакалаврів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» /Укладачі д.е.н., проф. Савенко І.І., к.е.н., доц. Корсікова Н.М., Одеса: ОНТУ, 2022. 10 с.

9. Національний стандарт України «Автоматизація технологічних процесів. зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах» ДСТУ Б А.2.4-16:2008.

<http://www.tsatu.edu.ua/ettp/wp-content/uploads/sites/25/11-dstu-b-a.2.4-16-2008.pdf>

10. <https://stream-energy.com.ua/ua/p1056237112-nasos-dlya-rassola.html>

11. <https://ugov.ua/ru/catalog/detail/rt-rele-tysku-dlia-zahalnoho-zastosuvannia/>

12. <https://ugov.ua/ru/catalog/detail/mbt-5252-datchyky-temperature/>

13. <https://panoramavent.com/avtomatika/chastotnye-preobrazovateli/chastotnik-danfoss/vlt-micro-drive-fc-51/preobrazovatel-chastoti-danfoss-fc-051p4k0-132f0026-dvigatel-4-kvt-9a-3x380v/>

14. <https://owen.ua/ru/datchiki/pdu-dvuhurovnevye-poplavykovye-datchiki/shemy-podkljucheniya>

15. <https://trigla.net.ua/ua/p14798948-elektromagnitnyj-rashodomer-promag.html>

16. Хобін В.А. - Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» - Одеса: НАХТ, 2000. - 16 с.

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

18. Хобін В.А. - Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Теорія Автоматичного Управління» - Одеса: ОНАХТ, 2000. - 16 с.

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

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

21. Установки обробки холодом в потоці Кристалстоп (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії Milesta. – URL: <https://milesta.ua/equipment-winemaking-crystalstop>.

22. Установка для пастеризації та охолодження вина, пива, квасу, медівниці (Електронний ресурс) / prom.ua. – URL: https://prom.ua/ua/p3901691-ustanovka-dlya_pasterizatsii.html?srsltid=AfmBOornN_aFHiV8hBxM7B0o8mgymzx1cvj6f6cyRYWJYly_hJOMgwJr6.

23. Охолоджувач вина проточний CWP 300 Green Line (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії MagnumBeer. – URL: <https://magnum-beer.com.ua/ua/p1480973746-ohladitel-vina-protchnyj.html>.

24. Охолоджувачі молока (танк-охолоджувач) для ферм і господарств / Офіційний сайт компанії «Холодкомплект». – URL: <https://holodkomplekt.com.ua/ua/a241314-ohladiteli-moloka-tank.html>.

25. Стабілізація виноградних вин - лінії обробки виноматеріалів у потоці (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії Vinograd.info. – URL: <https://vinograd.info/knigi/stabilizaciya-vinogradnyh-vin/linii-obrabotki-vinomaterialov-v-potoke.html>.

26. Стабілізація та методи лікування виноградних вин (Електронний ресурс) / Офіційний сайт Інтернет-магазину «Домашній виноградник» – URL: <https://garden-ua.com/stabilization-of-grape-wines/>.

27. Нагрівання, пастеризація та обробка холодом (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії Enogrup – URL: <https://enogrup.com/technologies/temperature-2/>.

28. Установка видалення винного каменю (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії Техно-Т – URL: <https://techno-t.net.ua/ru/product/ustanovka-udaleniya-vinnogo-kamnya/>.

29. Технологія та суть термовініфікації – виноробство червоним способом (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії Inprom – URL: <https://www.inprominox.com/tehnologiya-i-sut-termovinifikatsii-vinodelie-krasnym-sposobom>.

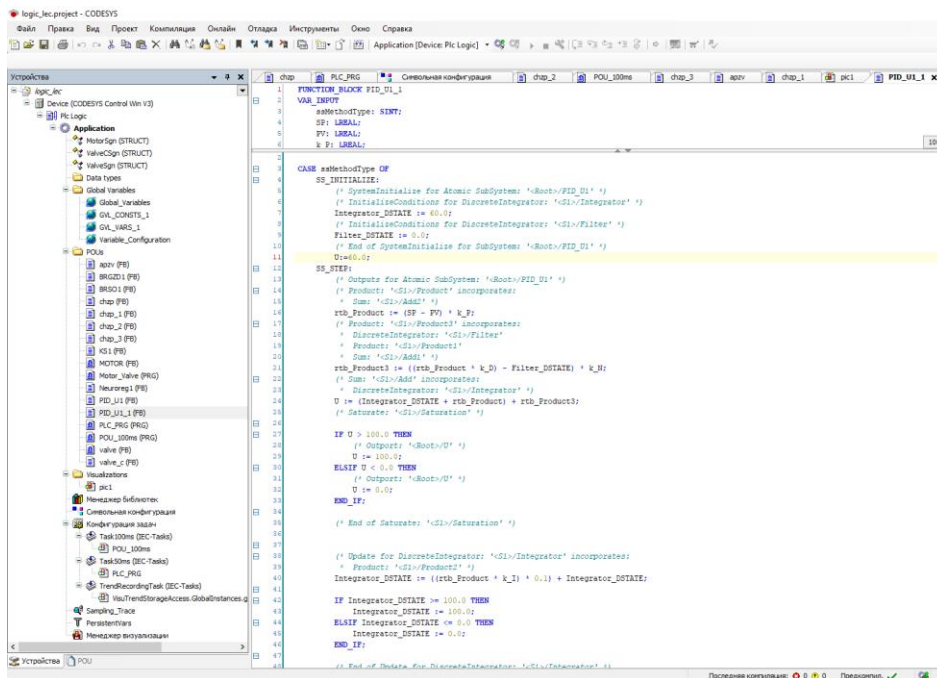
30. Нове технологічне обладнання для виноробної галузі (Електронний ресурс) / Офіційний сайт компанії Агровектор – URL: <https://agrovektor.com/art/870-novoe-tehnologicheskoe-oborudovanie-dlya-vinodelcheskoy-otrasli.html>.

31. Мельник О.Р. Автоматизація процесу керування швидким охолодженням виноматеріалу (рукопис).- Одеса: ОНТУ, 2024.- 207с.

Додатки

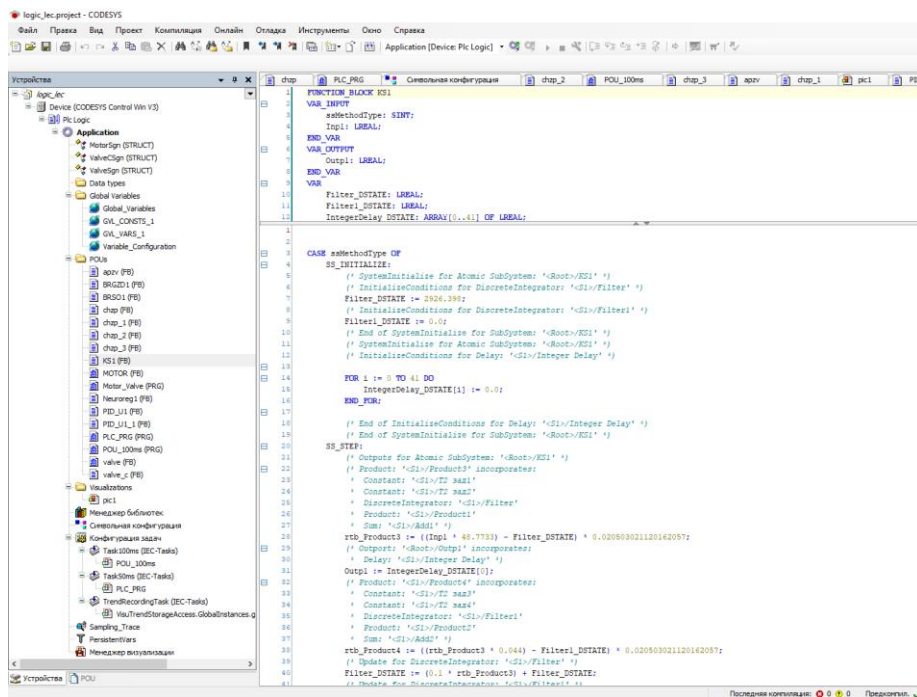
Додаток А

Вихідний текст модулю ПІД регулятора.



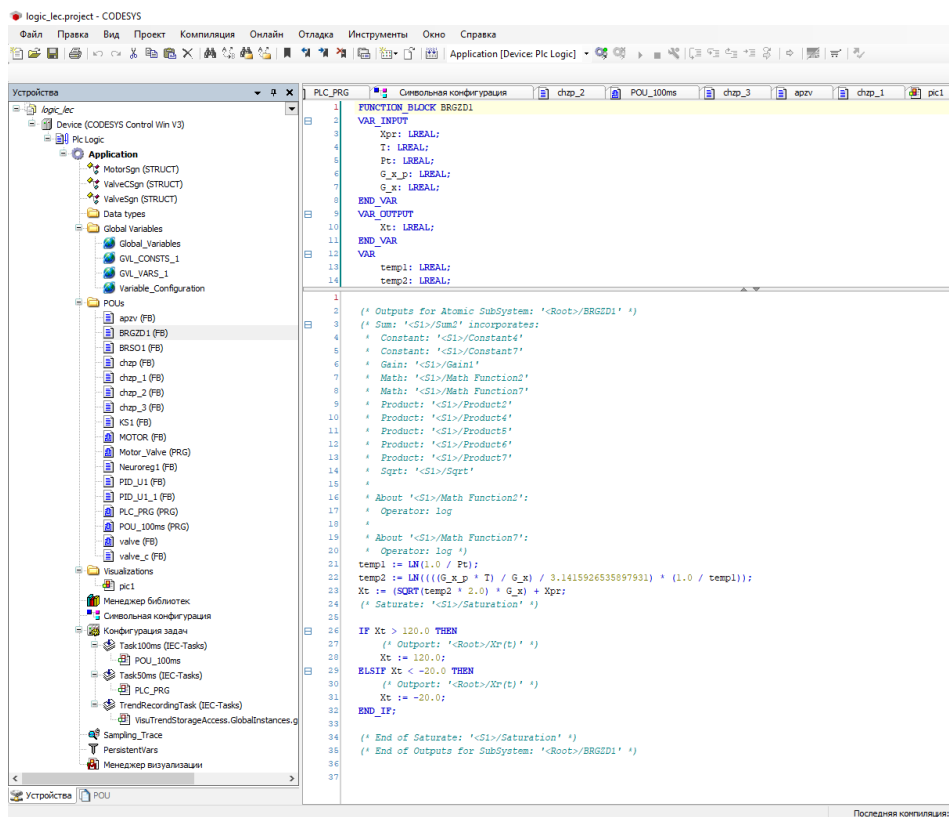
Додаток Б

Вихідний текст модулю коригуючої ланки.



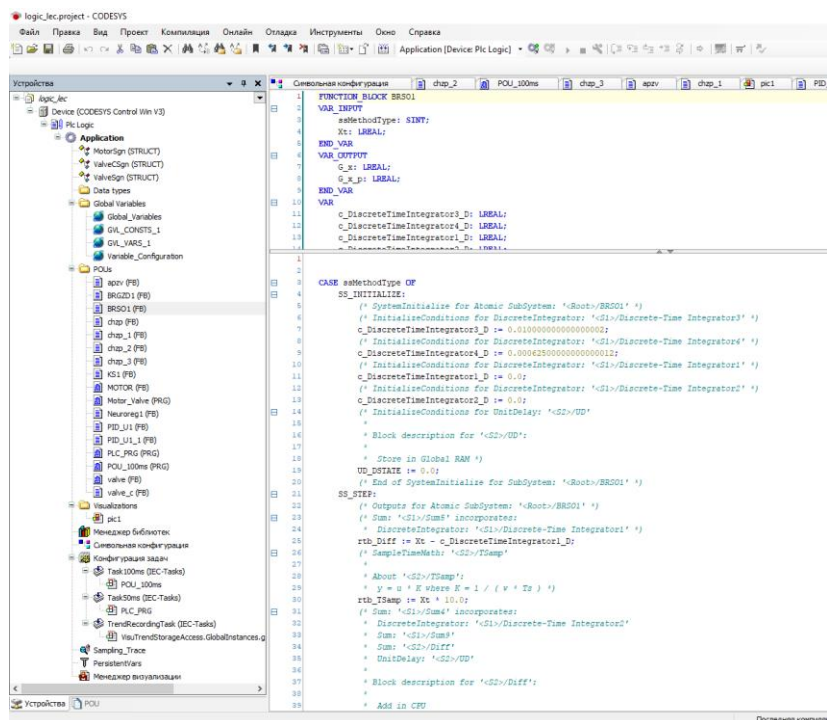
Додаток В

Вихідний текст модулю БРГЗД.



Додаток Г

Вихідний текст модулю БРСО.



Додаток Д

Вихідний текст модулю нейронної мережі.

