

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет

Кафедра _Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему **«Підвищення ефективності автоматичного керування**
(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

виробництвом пари»

Здобувача (ки) В.С. Малиш
(прізвище, ініціали)

II курсу Амз-20 групи

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

Консультанти: _____
(посада, прізвище та ініціали)

(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

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

Завідувач(ка) кафедри АТПіРС _____ І.М. Світий
(назва кафедри) (підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Одеса - 2023рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС.
В.А. Хобін

«_____» _____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Малиш Вікторії Сергіївни

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування виробництвом пари»

Затверджена наказом ОНТУ від 29.11.22 р. _____ наказ №877-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи _____

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

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

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

Розділ 1. Технологічний процес виробництвом пари, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП виробництвом пари.

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

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

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

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

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

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

7. Дата видачі завдання _____

Керівник

Левінський В.М.

Завдання прийняв до виконання

Малиш В.С.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач-дипломник Малиш В.С. Керівник роботи Левінський В.М.

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

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

Здобувач-дипломник Малиш В.С. _____
ПІБ Підпис

АНОТАЦІЯ

Малиш В.С. «Підвищення ефективності автоматичного керування виробництвом пари».

Кваліфікаційна робота магістра. – Одеса: ОНТУ 2023. – 141с.
Бібліогр.:_34_. Іл.:_121_. Табл._7_.

Основною метою роботи є підвищення ефективності процесу виробництва пари за рахунок вдосконалення існуючих алгоритмів автоматичного керування технологічним процесом. Удосконалення алгоритмів керування проводилося шляхом підвищення динамічної точності алгоритмів регулювання. В якості базового було використано пропорційно-інтегрально-диференційний алгоритм регулювання. В даній роботі розроблена САР тиску у топці котла з упереджувачем Сміта та інваріантністю відносно коливань витрат газу, що подається до топки. Надалі підвищення ефективності САР проводилося шляхом дослідження доцільності використання нечіткого алгоритму регулювання. Надалі розроблену систему керування було реалізовано у цифровому вигляді.

Аналіз працездатності САР проводився шляхом аналізу на дотримання гранично припустимих вимог та аналізу САР на грубість.

Ключові слова: виробництво пари, САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання, САР інваріантністю відносно контрольованих збурень, котел ДКВр- 10-13.

ЗМІСТ

	стор.
Перелік умовних позначень, символів і одиниць.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1 Технологічний процес виробництва пари і задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.....	13
1.1 Короткий опис технологічного процесу виробництва пари і основного обладнання	13
1.2 Аналіз впливу режимів ведення ТП і роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів і наслідків їх порушення	17
1.3 Аналіз існуючих САК технологічного процесу виробництва пари.....	20
1.4 Комплекс математичних моделей ТП виробництва пари як об'єкту регулювання, їх реалізація в формі імітаційних моделей і результати тестування моделей	21
1.5 Типові структури і алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, результати їх параметричної оптимізації і перевірка на робастність (грубість).....	23
1.6 Недоліки відомих САК ТП виробництва пари, обґрунтування напрямків удосконалення САК як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу	25
1.7 Висновки за розділом.....	27
Розділ 2 Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП виробництва пари.....	28
2.1 Специфічні особливості ОР і обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення їх динамічної точності	28
2.2 Доопрацювання математичної моделі ОР для розв'язання задачі додаткового застосування в САР принципу інваріантної до контрольованих збурень	28
2.3 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.....	30
2.4 Оптимальний параметричний синтез САР базової структури та аналіз результатів синтезу	34
2.5 Оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності та аналіз результатів синтезу	40
2.6 Висновки за розділом.....	43
Розділ 3 Вдосконалення алгоритмів, які реалізують функції регулювання САК технологічного процесу виробництва пари, на основі застосування логічного регулятора та штучних нейронних мереж	44
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління побудованих на базі апарата нечіткої логіки та штучної нейронної мережі для розглянутого об'єкта керування	44
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB/Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійними статичними характеристиками	45

	стор.
3.3 Синтез САР з нелінійною моделью ОК і традиційним ПІД-регулятором.....	47
3.4 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нечіткого регулятора.....	51
3.5 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нейронного регулятора.....	65
3.6 Аналіз результатів функціонування САУ з традиційним регулятором, з регулятором побудованим на базі апарату нечіткої логіки і з нейронним регулятором.....	83
3.7 Висновки за розділом.....	85
Розділ 4 Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи	87
4.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом виробництва пари і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок	87
4.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів управління	100
4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	113
4.4 Висновки за розділом.....	113
Висновки.....	115
Список використаної літератури.....	116
Додаток А.....	118

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

АК - алгоритм керування;

ВМ - виконавчий механізм;

ОК - об'єкт керування;

ОР - об'єкт регулювання;

ПЗО - пристрій зв'язку з об'єктом;

РО - регулюючий орган;

САК - система автоматичного керування;

САР – система автоматичного регулювання;

СКЗ - спрощений коригуючий зв'язок;

ТП - технологічний процес.

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних умовах теплоенергетика займає одне з провідних місць серед інших галузей виробництва, забезпечуючи теплотою їх виробничі об'єкти. Теплові електростанції характеризуються безперервністю технологічного процесу. При цьому виробництво теплоти та електрики повинно відповідати споживанню (навантаженню). Для забезпечення високої ефективності виробництва пари, цим процесом необхідно керувати. Лише автоматичне керування дозволяє одержувати теплоту та електрику з точним дотриманням регламенту. Тому, автоматизація процесу виробництва пари є вельми актуальною.

Технологічні процеси, швидкість протікання яких визначається інтенсивністю підведення або відведення теплоти, називаються тепловими. До них належать процеси нагрівання, охолодження, випаровування та конденсації. Теплові процеси широко розповсюджені в усіх галузях промисловості, зокрема, в харчовій та переробній промисловості. Джерелом теплоти часто виступає пара, яка виробляється в котельнях підприємств.

Виробництво пари – це процес перетворення технологічної хімічно очищеної води із використанням продуктів горіння палива при високій температурі в насичену пару з тиском, більшим за атмосферний та з подальшим використанням поза котлоагрегату.

На кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем одеського національного технологічного університету, в рамках випускної роботи магістра, з метою підвищення ефективності виробництва пари було вирішено задачу підвищення ефективності системи автоматичного регулювання (САР) параметрів виробництва пари шляхом підвищення інтелектуального рівню алгоритмів керування ключовими технологічними процесами за рахунок підвищення динамічної точності керування процесом.

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

Робота виконана в Одеському національному технологічному університеті (ОНТУ) та відповідає напрямку № 4 наукової діяльності ОНАПТ «Створення нового високоефективного обладнання, автоматизація виробничих процесів харчових та зернопереробних виробництв», а також держбюджетній науково-дослідній роботі: «Інтелектуальні системи з еволюційними властивостями для управління технологічними процесами переробних виробництв АПК», №ГР 0106U001440. Здобувач приймав участь у цій НДР як виконавець.

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу виробництва пари шляхом побудови високоефективної системи автоматичного керування.

Для досягнення цього необхідно вирішити наступні завдання:

- конкретизація завдання дотримання регламентів управління технологічним процесом виробництва пари, розробка та реалізація комплексу його моделей як об'єкта регулювання в імітаційній середовищі Matlab;
- розробка та параметрична оптимізація алгоритмів регулювання у середовищі Simatik Step 7, порівняльний аналіз САР;
- конкретизація задачі та розробка алгоритмів логічного керування технологічним процесом виробництва пари з використанням дуттьового вентилятора;
- вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізацію керуючих впливів;
- розробка контролерно-комп'ютерної мережі, програмування алгоритмів регулювання та логічного управління САК;
- розробка SCADA системи з використанням додатку WinCC flexible для автоматизованого робочого місця технолога та наладчика САК;
- розробка проектної документації технічного забезпечення САК, включаючи питання охорони праці;
- попереднє обґрунтування економічної доцільності реалізації розробки.

Об'єкт дослідження – керований технологічний процес виробництва пари.

Предмет дослідження – системи автоматичного управління технологічним процесом виробництва пари, включаючи моделі процесу об'єкта управління.

Методи дослідження:

- методи активного та пасивного експерименту;
- метод типової статистичної ідентифікації та інженерні методики ідентифікації моделей ОК;
- метод оптимального параметричного синтезу;
- метод компенсації запізнення в контурі регулювання з використанням упереджувача Смітта;
- метод системного аналізу систем автоматичного керування;
- метод імітаційного моделювання;
- планування та проведення натурних експериментів, обробки їх результатів та ідентифікації моделей ОУ.

– теорії автоматичного управління та її підрозділів – статистичної теорії автоматичних систем, теорії систем із запізненням, теорії систем гарантуючого управління, теорії цифрових систем управління.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше обґрунтовано:

- загальна концепція побудови ефективної САУ процесом виробництва пари, включаючи концептуальну модель ОУ та варіанти функціональної структури її керуючого пристрою, яка дозволяє розробляти такі САУ для парових котлів з різним набором доступних для безперервної зміни впливів керуючих і джерел безперервної інформації про показники якості пари;
- показники пари, що характеризують її якість побічно, але доступні для квазінеперервного виміру безпосередньо в ході процесу, які дозволяють у реальному часі автоматично стабілізувати значення основних показників якості пари в умовах інтенсивних неконтрольованих збурень.

вперше розроблено:

- імітаційна ММ процесу вироблення пари котлом типоряду ДКВр, що адекватно описує динаміку каналів регулювання, яка дозволяє при розробці САУ пари проводити комп'ютерні експерименти з налагодження та параметричної оптимізації алгоритмів управління та порівняльного аналізу її варіантів;

- спеціальні САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання систем автоматичного регулювання технологічних параметрів вироблення пари, що дозволяють підвищити швидкодію при регулюванні розрідження в топці котла, підвищити точність управління;

- розробка алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК, на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж;

- підсистема гарантуючого управління розрідження в топці котла, яка дозволяє вести процес при максимально допустимій продуктивності та мінімальні питомі енерговитрати, гарантуючи при цьому відсутність виходу розрідження за гранично допустимі значення;

- отримав подальший розвиток алгоритм регулювання розрядження в топці котла в напрямку підвищення динамічної точності управління, який дозволяє забезпечити стійке ведення процесу виробництва пари.

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

- підвищенні продуктивності та енергетичної ефективності процесів виробництва пари, підвищенні та стабілізації якості пари, гарантованому запобіганні аварійним ситуаціям, пов'язаним з порушенням обмежень на регламентовані змінні;

- можливості застосування розроблених підходів до створення САУ, включаючи їх функціональний склад, структури та алгоритми підсистем, для підвищення енергетичної ефективності на основі керуючого іншими типами парових котлів;

– застосування розробленої імітаційної моделі для подальшого вдосконалення САУ парового котла, а також технології та досвіду розробки цієї моделі для створення моделей котлів інших типів.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем вищої освіти зроблено наступне: сформульовані найбільш загальні особливості процесу виробництва пари як ОУ, її структура та завдання управління; обґрунтовано набір функцій АРМ дослідника процесу виробництва пари; розроблено програмно-технічне забезпечення АРМ; визначено концептуальну структуру процесу виробництва пари як ОУ, виявлено взаємозв'язки між змінними процесами; описані на якісному рівні якості його каналів; обґрунтовано процедуру ідентифікації моделі процесу; модель реалізована серед імітаційного моделювання; обґрунтовано її адекватність; - обґрунтовано функціональну організацію САУ, алгоритми управління; обґрунтовано склад інформативних змінних, що побічно характеризують якість виробництва пари; розроблено принципи побудови та програмно-технічне забезпечення для реалізації каналу вимірювання.

Апробація результатів випускної роботи магістра. Основні положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти ОНТУ (2023).

Публікації. Підготовлено комплект документів для подачі патенту на корисну модель на тему «Спосіб автоматичного керування виробництвом пари».

Структура і обсяг роботи. Випускна робота магістра складається з вступу, основної частини, що включає 4 розділи, висновків, списку використаних джерел і додатків.

РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА ПАРИ І ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Короткий опис технологічного процесу виробництва пари і основного обладнання

Технологічний процес – це впорядкована послідовність взаємопов'язаних дій, що виконуються з моменту виникнення вихідних даних із затраченими матеріальних і енергетичних потоків до отримання необхідного результату. Для перетворення хімічної енергії палива в теплову існує комплекс пристроїв, званих котельні установкою. Суттю ТП виробництва пари є перетворення технологічної хімічно очищеної води із використанням продуктів горіння палива за високою температурою в насичену пару, із тиском більшою за атмосферну, із подальшим використанням поза котлоагрегату.

Технологічна схема процесу наведена на рис. 1.1.

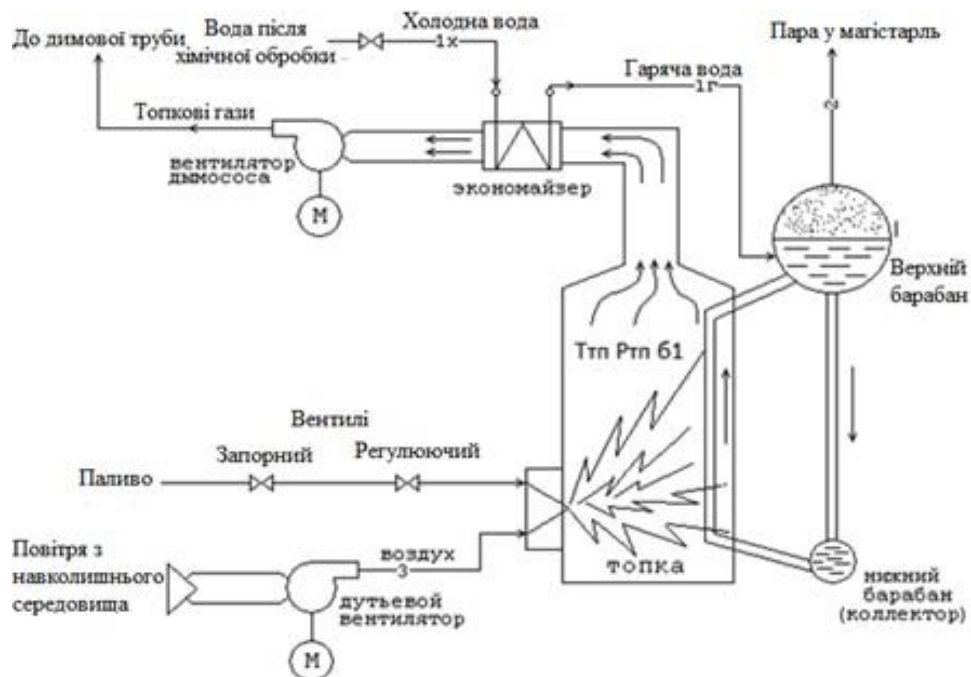


Рис. 1.1 – Технологічна схема процесу виробництва пари

Паливо (газ) надходить до пальників топки, змішується з повітрям, що подається дут'євим вентилятором (ДВ) і згоряє у виді факелу. Топкові гази з температурою до 1800 °С віддають тепло екранним поверхням, охолоджуються до 160 °С і відсмоктуються вентилятором димососу. Хімічищена живильна вода, що підігрівається до 90 °С в економайзері, надходить у верхній барабан, нагрівається в трубах топки до паротворення. Насичена пара збирається у верхньому барабані і направляється в колектор пари (магістраль). Навантаження котлу характеризується витратою пари. Показником балансу «вода-пара» служить рівень води в барабані. Економічність горіння визначається співвідношенням «паливо-повітря» і розрідженням у топці. Невідповідність теплового і матеріального балансів значно порушує номінальний режим і створює небезпеку аварії.

Котел ДКВр- 10-13 ГМ(ДКВр – двух-барабанный котел водотрубный реконструированный, 10 – паро-продуктивность, 13 - тиски пари, ГМ - газовый або мазутный) використовується для отримання перегрітої пари промисловими підприємствами. Котел ДКВр- 10-13 відноситься до двух-барабанных, вертикально-водотрубним котлам з не примусовою циркуляцією води в системі. Циркуляція води в котлі здійснюється за рахунок різниці тиску у барабанах. Утворення пари робиться у верхньому барабані.

Котел ДКВр- 10-13 має топку з газовим пальником, в якому відбувається процес згорання палива і камеру догорання, яка служить для кращої передачі теплової енергії, що підвищує ККД котла ДКВр- 10-13 до 92%. Котли ДКВр після монтажу в котельній на спеціальний майданчик обмуровуються вогнетривкою цеглиною. У результаті такі котли не піддаються зовнішнім кліматичним умовам, що подовжує термін експлуатації до 25 років при постійному обслуговуванні агрегату. Цей паровий котел відрізняється простотою конструкції, що дозволяє переводити паровий котел у водогрійний режим без великих змін в конструкції.

Технічні характеристики:

Номінальна паро- продуктивність – 10т/г;

Температура пари – 194°C;

Робочий тиск пари – 13МПа;

Паливо – газ;

Витрати газу – 740м³/г;

ККД – 91%;

Котел ДКВр- 10-13 ГМ зображений на рис.1.2.



Рис.1.2 – Зовнішній вигляд котла ДКВр- 10-13 ГМ

Мета процесу - отримання продуктів із заданими показниками якості. При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдане тільки тоді, коли виконується цілий ряд вимог до технологічного процесу. Вимоги до технологічного процесу виробництва пари, що найчастіше вимагаються:

- кількість виробляемого в одиницю часу продукту не має бути нижчим встановленої норми;
- втрати сировини не повинні перевищувати нормативних значень;
- питомі витрати енергії на процес, тобто на одиницю продукції, не повинні перевищувати нормативних значень;
- режими роботи технологічного устаткування не повинні виходити за гранично допустимі значення;
- шкідлива дія технологічного процесу на людину і природне середовище не повинна перевищувати нормативних значень;
- порушення режимів ведення технологічного процесу і роботи устаткування, що призводять до аварійних ситуацій, переростання яких в аварію призводить до істотних економічних втрат або навіть до катастрофічних наслідків, мають бути дуже рідкісними подіями і мають бути передбачені заходи по запобіганню переростання аварійних ситуацій в аварію.

Представимо розглянутий технологічний процес виробництва пари у вигляді параметризованої схеми (рис. 1.3).

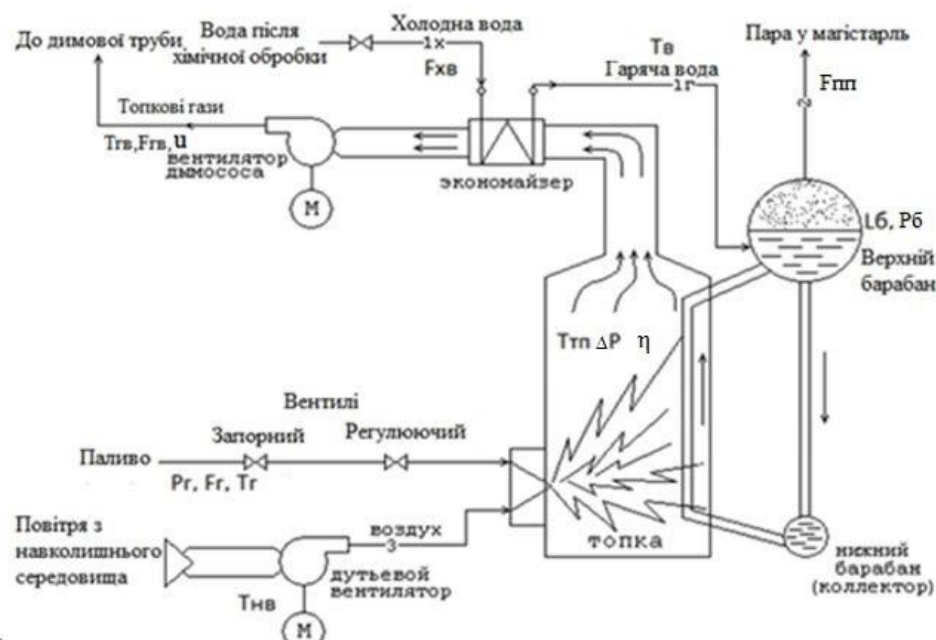


Рис. 1.3 – Параметризована технологічна схема процесу виробництва пари

Позначення на параметризованій технологічній схемі:

- T_v – температура гарячої води;
- F_{xv} – витрата холодної води;
- P_g – тиск газу на пальник;
- F_g – витрати газу;
- T_g – температура газу;
- T_{nv} – температура повітря;
- F_{pp} – витрати перегрітої пари;
- L_b – рівень води в барабані;
- P_b – тиск в барабані
- T_{tp} – температура в топці;
- ΔP – тиск в топці котла;
- T_{gv} – температура відпрацьованих газів;
- F_{gv} – витрати відпрацьованих газів;
- u – положення регулюючого органу, що керує потоком димових газів;
- η – ККД котлоагрегату.

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

Основу нормативів складають три основних регламенти.

Технологічний регламент – визначає умови, при яких у результаті процесу виробництва пари виходить продукт із заданими властивостями. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналів технологічних параметрів (змінних ТП). Для процесу, що розглядається, такими змінними є: ΔP – тиск у топці котла.

Експлуатаційний регламент – визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного встаткування. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від експлуатаційних параметрів даного

технологічного об'єкта. До них відносяться: L_b – рівень в барабані, G_{pp} – витрата перегрітої пари, T_g - температура димових газів.

Техніко-економічний і екологічний регламент – визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір номінальних або гранично-припустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів. До них відносяться: η - ККД котлоагрегату

При відхиленні параметрів процесу виробництва пари від регламентованих значень, обумовлених зміною параметрів, що характеризують умови ведення процесу, навіть при досить ефективному керуванні ним, можуть перевищувати припустимі значення. Однак при виході за допуски технологічних регламентів технологічний процес не зупиняється, а вихід за допуски ліквідується із часом.

Наслідком виходу технологічних параметрів за допуски є зниження якості пари і збільшення браку.

Допуски на відхилення поточних значень регламентованих параметрів діляться на тривалі та короточасні. Припустимі відхилення визначають зону незначних відхилень, середнє значення параметру якої можна вважати близьким до нормативного, тому ці відхилення не ліквідують. Короточасні припустимі відхилення параметрів перевищують зону незначних відхилень і призводять до зниження ефективності процесу, тому вони припустимі тільки протягом обмеженого часу, що задається й входить у регламент. Вихід параметрів за зону короточасно припустимих відхилень свідчить про відхилення технологічного процесу або експлуатації обладнання, що можуть призвести до аварії.

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

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

№	Найменування параметрів	Позначення	Одиниця вимірювання	Ном. значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
					Тривалі ($t \rightarrow \infty$)	Короткочасні ($0 < t < \infty$)	
					Велич.	Велич.	t, сек
1	Тиск в топці котла	ΔP	Па	-30	± 1	± 2	10с

На етапах розробки САК, в якості одного з головних критеріїв, що характеризують доцільність її створення і ефективність її застосування, є оцінка якості виконання поставленого перед САК завдання, зокрема, для задач регулювання, підтримка параметрів технологічного процесу на заданих значеннях (в заданих діапазонах зміни). На практиці, в якості показника якості САР, найбільш часто використовують інтегральні критерії; причому, чим меншим буде відхилення поточного значення регульованої змінної від заданого, тим показник якості буде кращим.

Відповідно до нормативів ведення технологічного процесу тиск в топці котла має підтримуватися на рівні -30 Па з точністю ± 1 Па. За цим параметром припустимі короткочасні відхилення до ± 2 Па протягом часу не більше 10 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис. 1.4.

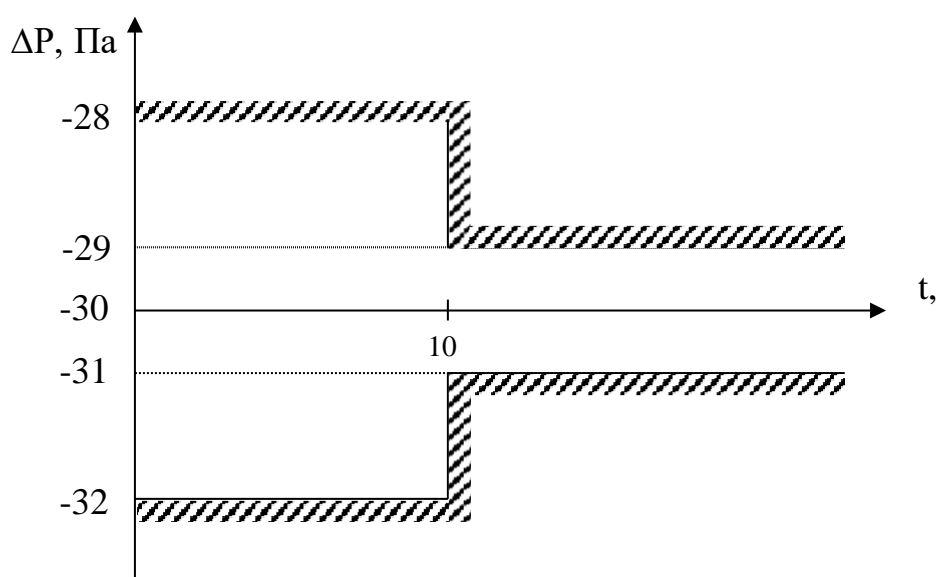


Рис. 1.4 – Регламентна зона для тиску в топці котла

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

Тому ефективність роботи САР процесу виробництва пари і підвищення її динамічної точності доцільно вести за таким критерієм:

$$J = \int_0^{t_M} [(\Delta\Delta P(t))^2] dt$$

де t_M – час моделювання;

$\Delta\Delta P(t)$ – відхилення тиску в топці котла від заданого значення (помилка регулювання).

1.3 Аналіз існуючих САК технологічного процесу виробництва пари

Оскільки автоматизація технологічного процесу виробництва пари є актуальною задачею, багато дослідників займалися цим питанням. Так В.К. Войтович запропонував конструкцію котла, який складається з двох концентричних циліндрів, вставлених один в одний, а в просторі між ними розміщена водяна сорочка, яка у верхній частині видозмінена у парозбірник, у внутрішньому циліндрі розташовано топку з конвективною поверхнею, виконаною з декількох пучків труб [20]. Також відомий спосіб, який запропонував Я.Я. Шепель, даний водогрійний котел має порожнистий суцільнозварний корпус, в топковій камері якого встановлена решітка, а бокові поверхні виконані у вигляді водоохолоджуваної оболонки, з приладною у її порожнині розширюваною уверх перфорованою обичайкою, прилеглою меншою основою до колосникової решітки, а кінцем більшої основи - до оболонки [21]. В.Л. Маменко запропонував водогрійний

опалювальний котел, призначений для опалення та подачі гарячої води, що містить топку, встановлений над нею секційний водоохолоджуваний теплообмінник, виконаний у вигляді розташованих із зазором, з'єднаних між собою круглими отворами для циркуляції води секцій, причому нижні кінці крайніх секцій теплообмінника заведені в топку [22].

1.4 Комплекс математичних моделей ТП виробництва пари як об'єкту регулювання, їх реалізація в формі імітаційних моделей і результати тестування моделей

Для процесу виробництва пари в якості регульованих координат доцільно обрати тиск в топці котла ΔP . Всі інші входні дії, крім управляючої дії і контрольованого збурення, віднесемо до неконтрольованих збурень f . Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до управляючих дій.

Структурна схема ОК (рис. 1.5) є останнім етапом формалізації представлення ТА як ОК. Вона є найбільш загальною (концептуальною) моделлю ТА як ОК. Внутрішня частина структури ОК указує на те, що канали перетворення змінних мають певну самостійність по відношенню до його зовнішньої структури.

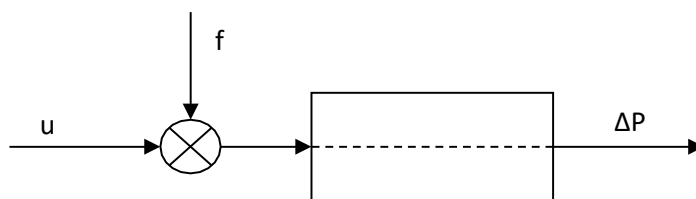


Рис. 1.5 – Координатна схема ОК

ΔP – тиск в топці котла, Па;

u – положення регулюючого органу зміни частоти електроприводу вентилятору, %;

f_1 – неконтрольоване збурення.

В пакеті Simulink середовища Matlab для каналу «u1 – ΔP» ОК були розроблені схеми моделювання моделі ОК.

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК має вигляд:

$$W_o(p) = \frac{-0,4 * e^{-2,6p}}{2,5p + 1}$$

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

$$W_o(p) = \frac{-0,4 * e^{-0,325p}}{(1,78p + 1)^2}$$

Моделі повинні мати один вхід, вихід моделей виводиться на графік в одній системі координат. У цю ж систему координат зводяться експериментальні дані. Для додавання в схему експериментальних даних попередньо готують експериментальні дані в табличному виді і реалізують їх у компоненті Look-Up-Table.

Для реалізації повної моделі ОК об'єднаємо моделі динаміки каналів ОК. Схема моделювання в середовищі Matlab, що відображує модель ОК, наведена на рис. 1.6, а результати моделювання – на рис. 1.7.

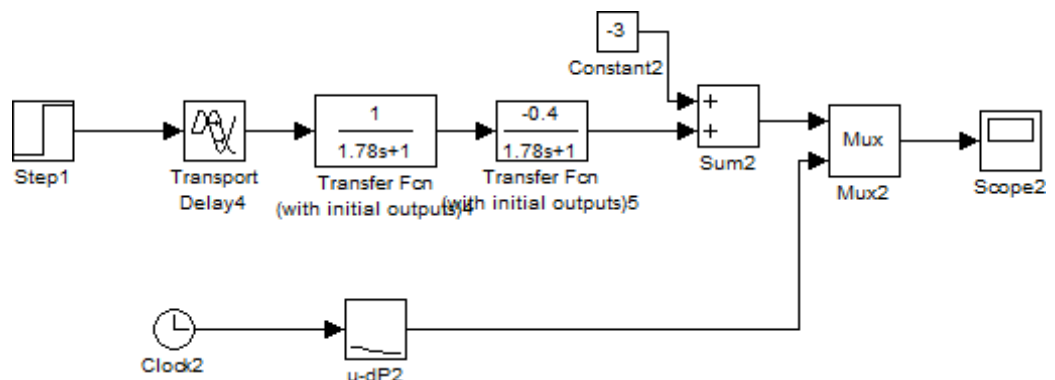


Рис. 1.6 – Схема моделювання моделі ОК

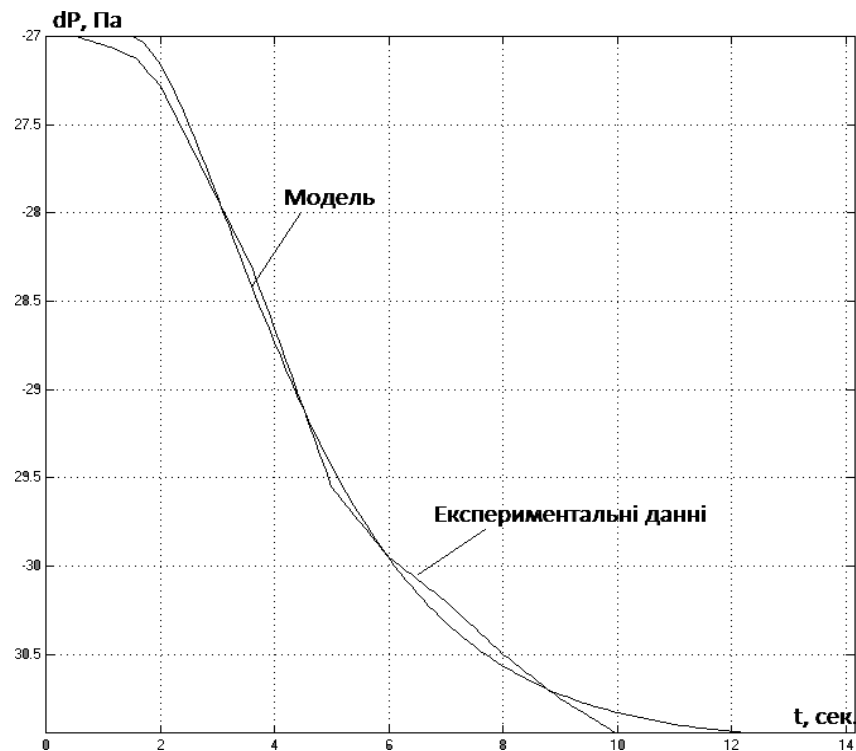


Рис. 1.7 – Результати реалізації повної моделі ОК в середовищі Matlab

Як видно з результатів моделювання, модель ОК достатньо точно відображує експериментальні дані. Це означає, що отримана модель ОК є адекватною.

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

Відповідно до координатної схеми процесу та до структурної схеми, що відповідає замкненому принципу керування, структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 1.8.

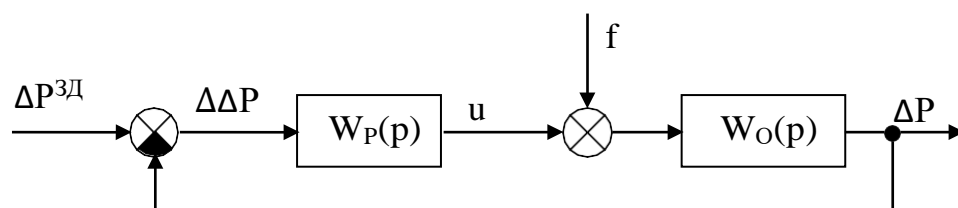


Рис. 1.8 – Структурна схема САР тиску в топці котла базової структури

Позначення на схемі САР базової структури:

u_1 – положення регулюючого органу зміни частоти електроприводу
вентилятора вилучення продуктів згорання з топки;

ΔP – тиск в топці котла;

f – вектор неконтрольованих збурень;

$W_P(p)$ – передаточна функція регулятора тиску в топці котла;

$W_O(p)$ – передаточна функція ОК;

$\Delta P^{зд}$ – задане значення регульованої координати;

$\Delta \Delta P$ – помилка регулювання.

В якості алгоритму регулювання обираємо пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритм регулювання.

Передаточна функція ПІД-регулятора:

$$W_P(p) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{ИЗ} p} + \frac{T_{ПР} p}{0,2 \cdot T_{ПР} p + 1} \right)$$

Для оптимального параметричного синтезу САР з ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рис. 1.9. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рис. 1.10. Показники якості системи заведено в таблицю 1.2.

Вибір початкових наближень настроювальних параметрів регулятора здійснимо на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.

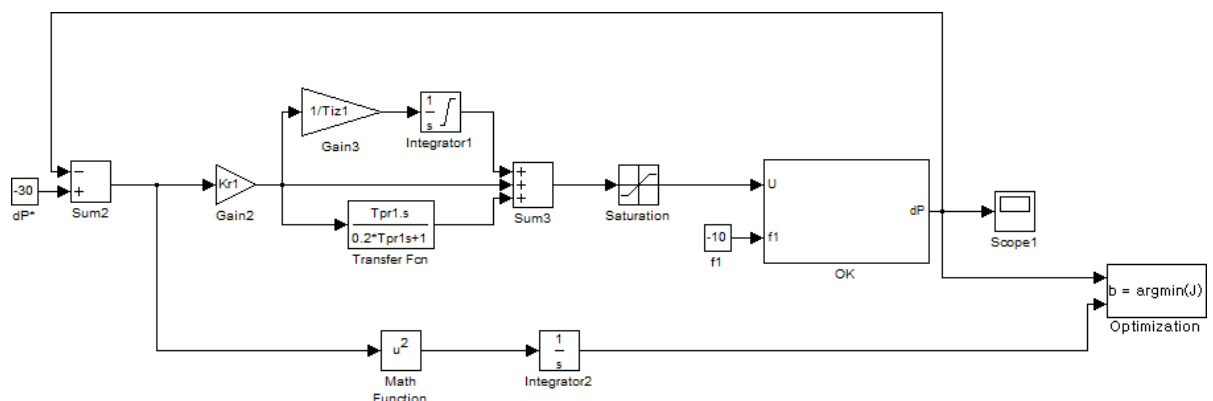
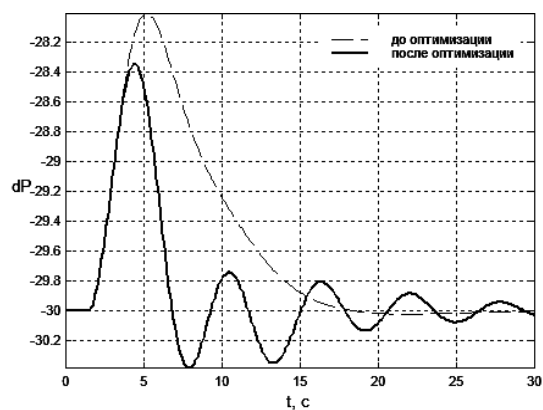


Рис. 1.9 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr1	-5.9767	-30	-2.88	0	до - 17.0754
Ti21	2.4705	0.1	3.64	200	после - оптимизации. 6.6259
Tr1	1.276	0.1	1.3	50	Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 88

Рис. 1.10 – Результати оптимізації параметрів ПІД-регулятора у складі
CAP

Таблица 1.2 – Показники якості CAP з ПІД-регулятором

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta P^{\text{МАКС}}$, Па	$T_{пп}$, с	
ПІД	1,65	5,6	6,6

В процесі роботи котлоагрегату може змінюватися час запізнення в каналі ОК та коефіцієнт передачі. Слід відзначити, що внаслідок нелінійності, параметри каналів можуть варіювати в межах до $\pm 20\%$. При цьому дослідження CAP на грубість слід проводити в умовах дії детермінованих ступінчастих неконтрольованих збурень $10\%x.p.o.$

У даній курсовій роботі грубість проводилась при варіації часу запізнення ОК. Найсприятливішими параметрами для ОК є $0,8 \cdot \tau$. Найнесприятливішими параметрами для ОК є $1,2 \cdot \tau$.

Результати аналізу CAP з ПІД-регулятором на грубість показані на рис. 1.11.

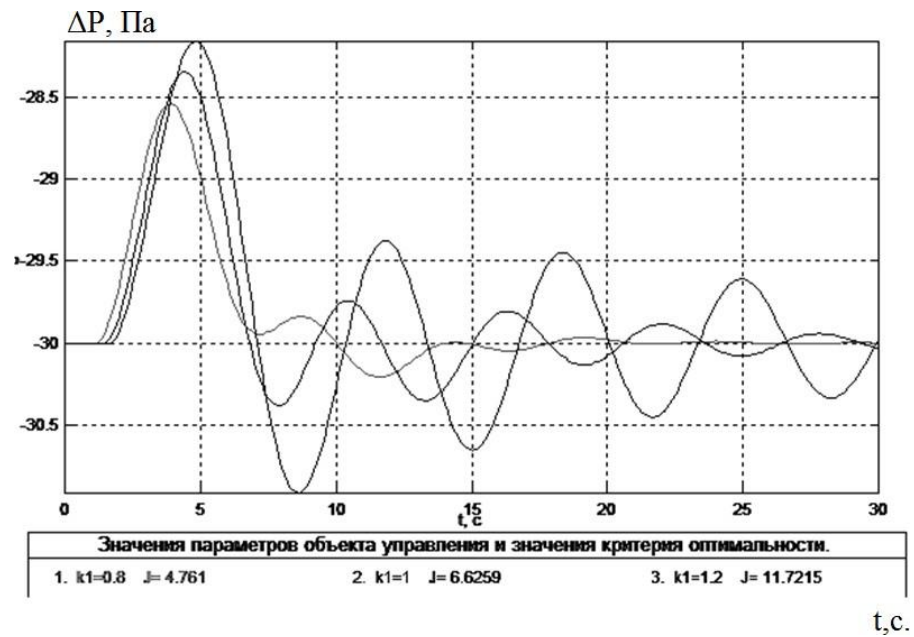


Рис. 1.11 – Результати перевірки САР з ПІД-регулятором на грубість

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

1.6 Недоліки відомих САК ТП виробництва пари, обґрунтування напрямків удосконалення САК як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу

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 τ_o/T_o , взаємний вплив каналів у багатовимірній САР).

Розглянуті вище системи регулювання забезпечують досить високу статичну та динамічну точність та забезпечують запас стійкості, але ні в моделях ОК, ні в алгоритмах керування не враховуються зміна витрат газу, що подається до топки. Зміна витрат газу досить сильно змінює розрідження у топці та погіршує динамічну точність САР розрідженням. Віднесення цих змін витрат газу до контрольованих збурень та побудова САР розрідженням у топці котла інваріантною до цих збурень може підвищити динамічну точність САР.

1.7 Висновки за розділом

Виходячи з вищевказаних обґрунтувань доцільно доопрацювати математичну модель ОК та розробити інваріантну систему.

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП ВИРОБНИЦТВА ПАРИ

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

Детально проаналізувавши вибраний об'єкт регулювання, можна зробити висновок, що на розрядження в топці котла має значний вплив витрати газу що подається у топку. Цей перехресний зв'язок в ОК знижує динамічну точність САР. Основним шляхом підвищення динамічної точності даної САР являється побудова САР інваріантної до цих збурень. У основу підвищення динамічної точності САР буде покладений принцип двоканальності Петрова, суть якого у введенні додаткового каналу дії « $\Delta F_{\Gamma} - \Delta P$ » через корегуючий зв'язок. А це потребує доробки моделі ОР.

2.2 Доопрацювання математичної моделі ОР для розв'язання задачі додаткового застосування в САР принципу інваріантної до контрольованих збурень

Для побудови САР інваріантної до витрат газу, що подається до топки доповнюємо розроблену модель ОК моделлю каналу дії контрольованого збурення " $\Delta F_{\Gamma} - \Delta P$ ". Для цього на основі експериментальної перехідної характеристики отримуємо математичну модель цього каналу.

Проведемо параметричну ідентифікацію моделі ОУ для каналу « $\Delta F_{\Gamma} - \Delta P$ ». Перехідна характеристика наведена на рис. 2.1.

Коефіцієнт передачі ОУ визначають по формулі:

$$K_o = \frac{\Delta \Delta P}{\Delta F_{\Gamma}} = \frac{-35 - (-30)}{0.1 - 0.11} = 500 \frac{\text{Па}}{\text{м}^3/\text{с}}$$

Для ідентифікації постійної часу і часу запізнювання як для моделі 1-го порядку, так і для моделі 2-го порядку доцільно використати методики "двох загальних точок".

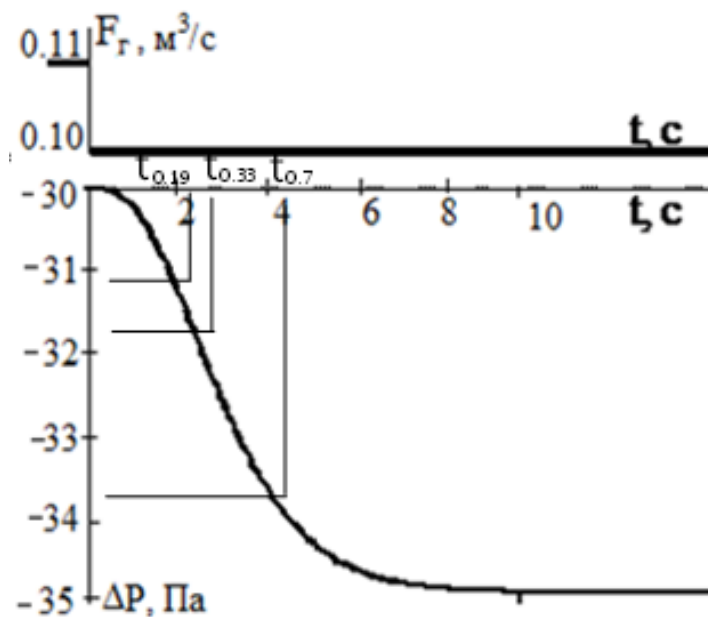


Рис. 2.1 – Параметрична ідентифікація моделі ОК для каналу
« $\Delta F_{\Gamma} - \Delta P$ »

Для моделі 1-го порядку.

Проводимо графічні побудови (рис. 2.1), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$:

$$t_{0,33} = 2.3 \text{ с};$$

$$t_{0,7} = 3.9 \text{ с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 * (3 * t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 * (3 * 2,3 - 3.9) = 1.5 \text{ с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (3.9 - 1.5) / 1,2 = 2 \text{ с}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОУ матиме вигляд:

$$W(p)_o = \frac{500 \cdot e^{-1.5p}}{2p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку.

Проводимо графічні побудови (рисунк 2.2), знаходимо $t_{0,19}$:

$$t_{0,19} = 1.75 \text{ с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 * (3 * t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 * (3 * 1,75 - 3,9) = 0,68 \text{ c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 2,4 = (3,9 - 0,68) / 2,4 = 1,34 \text{ c}$$

Передатна функція моделі 2-го порядку ОУ матиме вигляд:

$$W(p)_o = \frac{500 \cdot e^{-0.68p}}{(1.34p + 1)^2}$$

Схема моделювання повної моделі ОК прийме наступний вигляд (рис. 2.2).

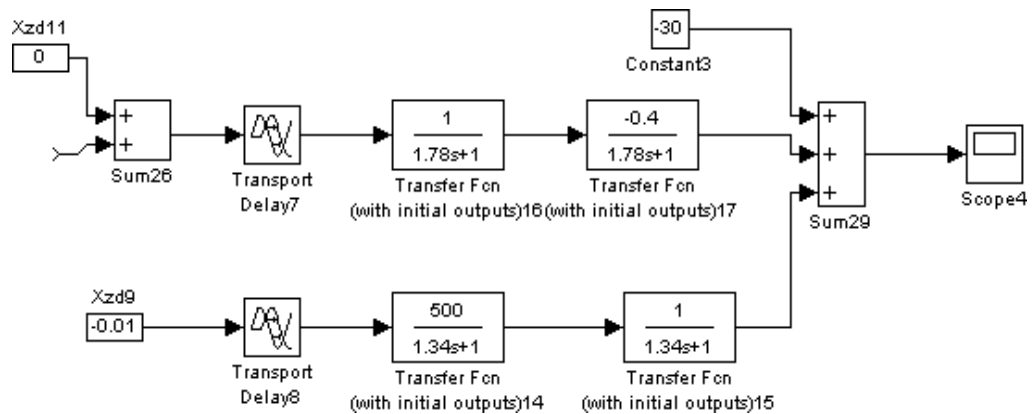


Рис. 2.2 – Схема моделювання повної моделі каналів ОК

2.3 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності

Для реалізації інваріантної системи в якості базової будемо використовувати раніше розроблену систему з компенсацією запізнення у власному русі.

В основу підвищення динамічної точності САР буде покладено принцип двоканальний Петрова, сутність якого у введенні додаткового каналу впливу « $\Delta F_{\Gamma} - \Delta P$ » через коригувальний зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема САР, інваріантної до дії контрольованого обурення матиме вигляд, наведений на рис. 2.3.

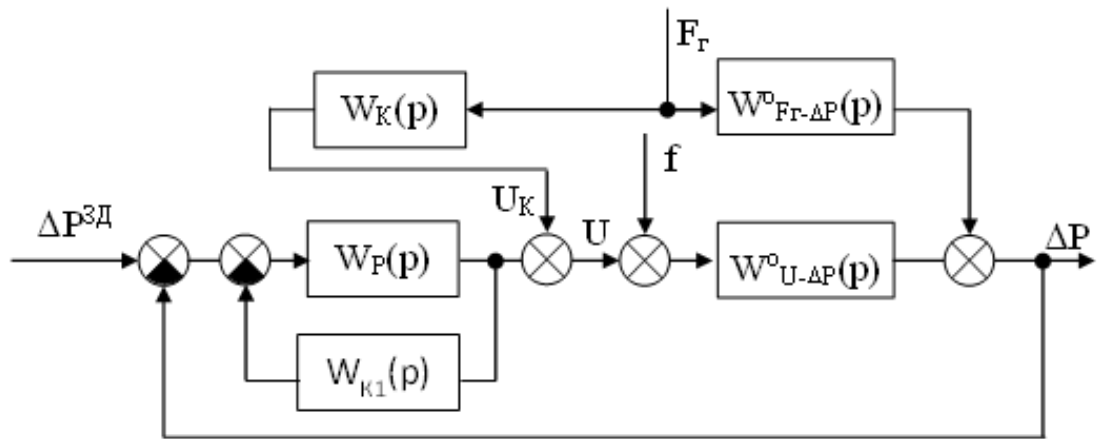


Рис. 2.3 – Структурна схема САР з компенсацією запізнення у власному русі та інваріантної до дії контрольованих збурень

На схемі:

$W_K(p)$ – передаточна функція коригуючого зв'язку;

$W_{K1}(p)$ – передаточна функція коригуючого зв'язку;

$W_P(p)$ – передаточна функція регулятора розрідження в топці котла;

$W^o_{U-\Delta P}(p)$ – передаточна функція ОК за каналом керування;

$W^o_{F\Gamma-\Delta P}(p)$ – передаточна функція ОК за каналом контрольованого збурення;

ΔP – тиск в топці котла, Па;

f – вектор неконтрольованих збурень.

$\Delta P^{3Д}$ – задане значення регульованої координати;

F_Γ – витрата газу, що подається до топки (контрольоване збурення);

U – положення регулюючого органу зміни частоти електроприводу вентилятору, % х.р.о.;

U_K – коригуюча дія.

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткового каналу передачі контрольованого збурення, а для нашої САР є така можливість. Достатньою умовою реалізації САР є фізична реалізуємось передатної функції коригуючого зв'язку.

Отримання передавальних функцій коригувальних зв'язків, аналіз їх структури з умов фізичної можливості бути реалізованим, приведення до вигляду що фізично реалізуємий, подання до формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідних характеристик.

Для забезпечення інваріантності до дії контрольованого обурення САР повинна забезпечити помилку стабілізації рівною нулю::

$$\Delta\Delta P_{\text{стаб}} = 0$$

Звісно, що

$$\Delta\Delta P_{\text{Встаб}} = W_{F_r-\Delta P}^C(p) \cdot F_r = 0$$

Якщо $F_r \neq 0$, то

$$W_{F_r-\Delta P}^C(p) = \frac{W_{F_r-\Delta P}^o(p) \cdot F_r = 0}{1 + W_P(p)W_{U-\Delta P}^o(p)} + \frac{W_K(p) \cdot W_P(p) \cdot W_{U-\Delta P}^o(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_{U-\Delta P}^o(p)} = 0$$

Звідси

$$W_K(p) = - \frac{W_{F_r-\Delta P}^o(p)}{W_P(p)W_{U-\Delta P}^o(p)}$$

Якщо коригуюча дія приведена до керуючої тоді передатна функція коригуючого зв'язку буде мати наступний вид:

$$W_K(p) = - \frac{W_{F_r-\Delta P}^o(p)}{W_{U-\Delta P}^o(p)}$$

Якщо

$$W_{U-\Delta P}^o(p) = \frac{-0,4}{(1,78p+1)^2} \cdot e^{-1,32p}, \quad W_{F_r-\Delta P}^o(p) = \frac{500}{(1,34p+1)^2} \cdot e^{-0,68p}$$

Тоді

$$W_K(p) = - \frac{\frac{500}{(1,34p+1)^2} \cdot e^{-0,68p}}{\frac{-0,4}{(1,78p+1)^2} \cdot e^{-1,32p}} = - \frac{500}{-0,4} \cdot e^{(-0,68+1,32)p} \times$$

$$\times \frac{\frac{1}{(1,34p+1)^2}}{\frac{1}{(1,78p+1)^2}} = 1250 \cdot e^{0,64p} \cdot \frac{1,8p^2 + 2,68p + 1}{3,17p^2 + 3,56p + 1} =$$

$$= 1250 \cdot e^{0,64p} \cdot \frac{3.17p^2 + 3.56p + 1}{1.8p^2 + 2.68p + 1}$$

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку є фізично не реалізуємою і має складний вид для реалізації. Спростимо її зберігаючи властивості та приведемо до з'єднання типових динамічних ланок:

$$W_K(p) = 1250 \cdot \frac{3.56p + 1}{1.8p^2 + 2.68p + 1}$$

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку приймемо наступні значення параметрів: $K_{K1} = 1250$; $T_{K1} = 3.56$; $T_{K2} = 1.34$. Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку потрібно провести моделювання. При проведенні налаштування САР параметри коригуючих зв'язку можливо оптимізувати окремо так як коригуючий зв'язок не входить до оператора власного руху системи. Але спочатку доцільно провести оптимальний параметричний синтез базової САР тому що структура моделі ОК була змінена і додатково введено перехресний зв'язок. Як видно з регламентів на САР для процесу виробництва пари особливо жорсткі вимоги пред'являються до тривалих відхилень, оскільки саме недотримання цих регламентів може привести до браку готової продукції і істотних економічних збитків. Тому в якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний квадратичний критерій, що сильно штрафує великі відхилення. Тому ефективність роботи САР розрідження і підвищення її динамічної точності доцільно оцінювати за наступним критерієм:

$$J = \int_0^{t_M} [(\Delta P(t))^2] \cdot dt$$

де t_M – час моделювання;

$\Delta P(t)$ – відхилення тиску в топці котла від заданого значення.

2.4 Оптимальний параметричний синтез САР базової структури та аналіз результатів синтезу

На першому етапі проведемо оптимізацію параметрів регулятора в умовах параметричної невизначеності параметрів моделі ОК. Тобто при варіації параметрів ОК у межах 20%. Для оптимального параметричного синтезу САР тиску у топці котла з ПІД-регуляторами використовуватимемо структурну схему моделювання, приведену на рис. 2.4. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів наведені на рис. 2.5.

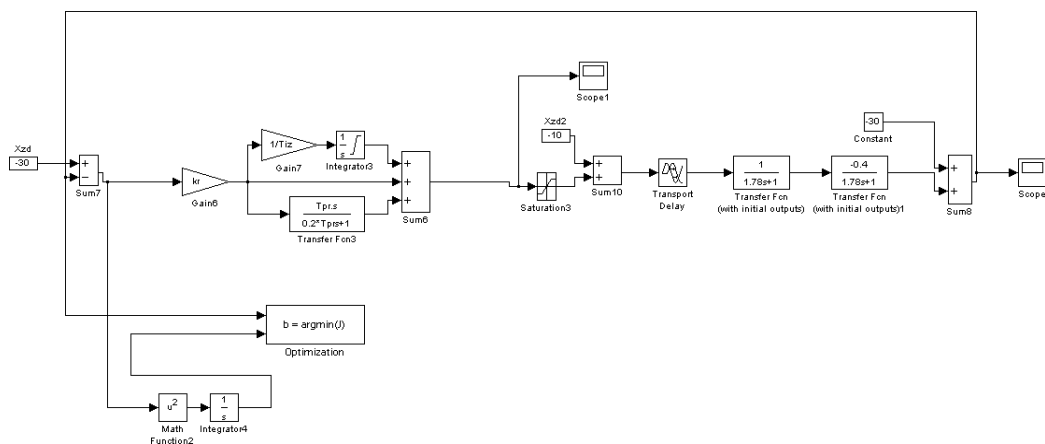


Рис. 2.4 – Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

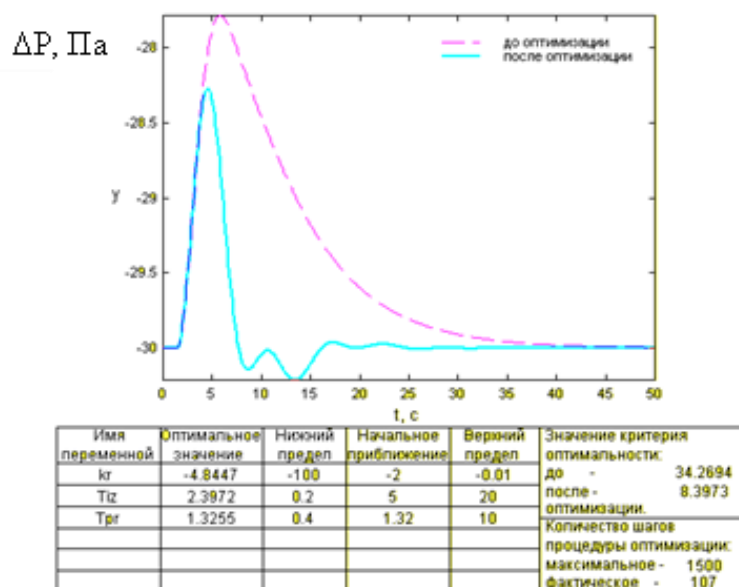


Рис. 2.5 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

Проведемо аналіз грубості САР до варіацій параметрів ОК. В процесі роботи котла може змінюватися час запізнення та коефіцієнт передачі в каналах ОК. Слід зазначити, що внаслідок нелінійності, запізнення каналів можуть варіювати в межах до $\pm 20\%$. При цьому дослідження САР на грубість проводитимемо в умовах дії детермінованих ступінчастих неконтрольованих збурень 10% х.р.о.

Результати оцінки САР з ПД-регуляторами на грубість наведені на рис. 2.6. Як видно з рис. 2.6, САР з ПД-регуляторами є грубою.

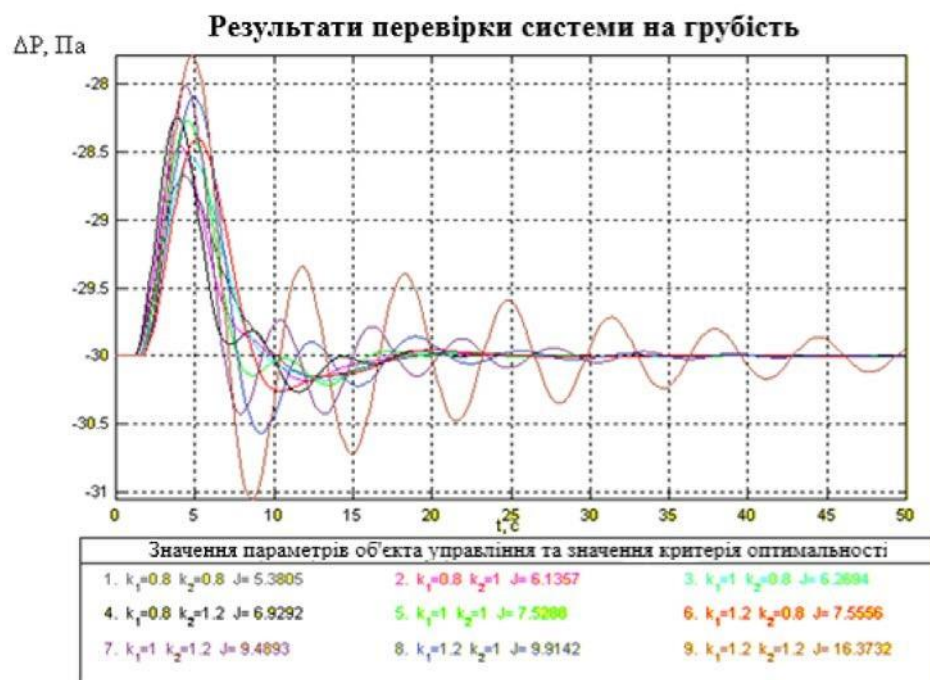


Рис. 2.6 – Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором

На наступному кроці проведемо моделювання САР з ПД-регулятором та упереджувачем Сміта без оптимізації (САР ПДТ1). Схема моделювання наведена на рис.2.7. Результати моделювання наведено на рис. 2.8. Результати перевірки САР з ПД-регулятором та випереджувачем Сміта на грубість наведено на рис. 2.8. Я видно з рисунків запас стійкості системи збільшився.

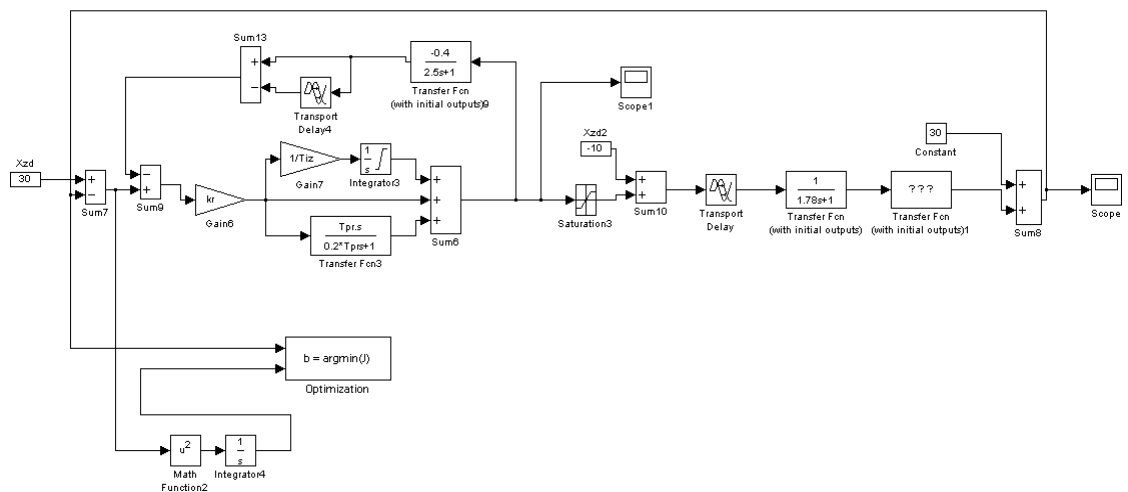
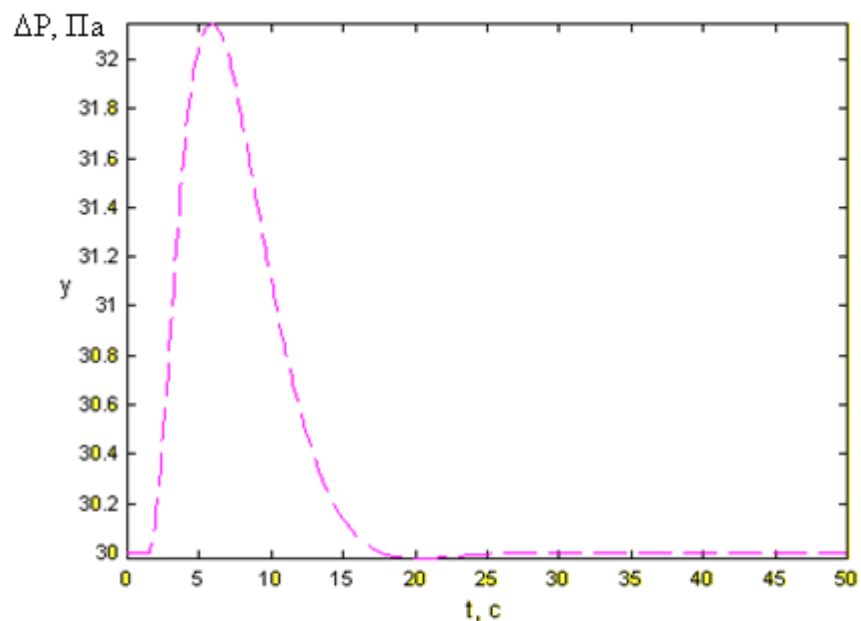


Рис. 2.7 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором та упереджувачем Сміта



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kr	-4.85	-10	-4.85	-0.01	до - 23.9556
Tiz	2.4	0.2	2.4	20	после - 23.9556
Tpr	1.32	0.4	1.32	10	оптимизации.
					Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1500
					фактическое - 1

Рис. 2.8 – Результаты моделювання САР з ПІД-регулятором і упереджувачем Сміта

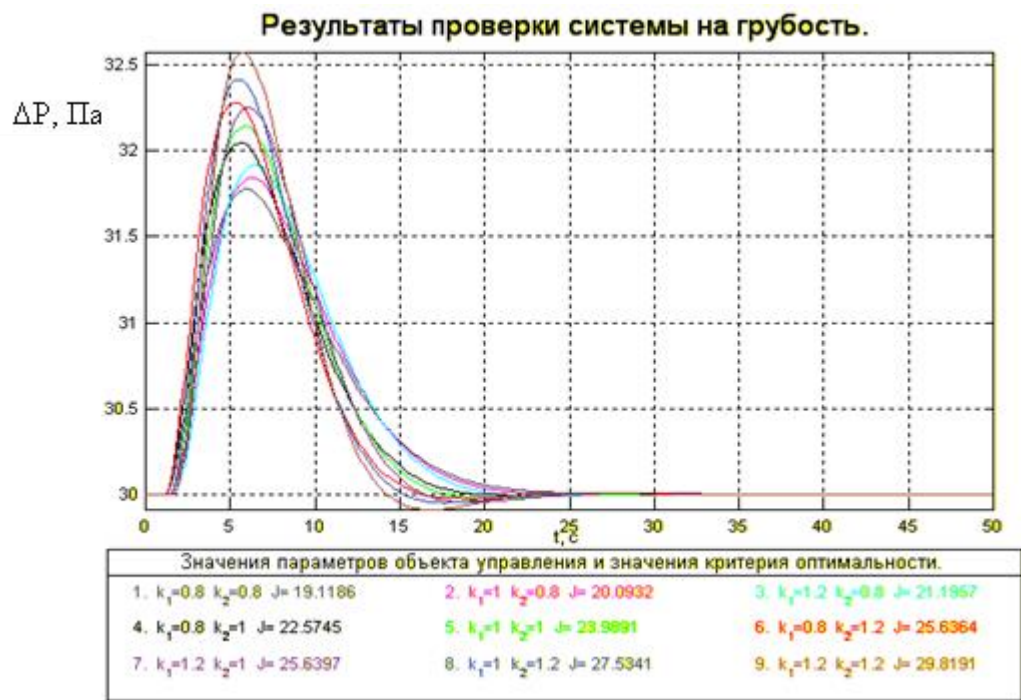


Рис. 2.9 – Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором і упереджувачем Сміта

Для забезпечення більш високої динамічної точності САР з упереджувачем Сміта проведемо оптимальний параметричний синтез ПД – регулятору і параметрів коригуючого зв'язку (САР ПДТ2). Результати оптимізації налаштувань ПД-регуляторів наведені на рис. 2.10. А результати перевірки на грубість на рис.2.11.

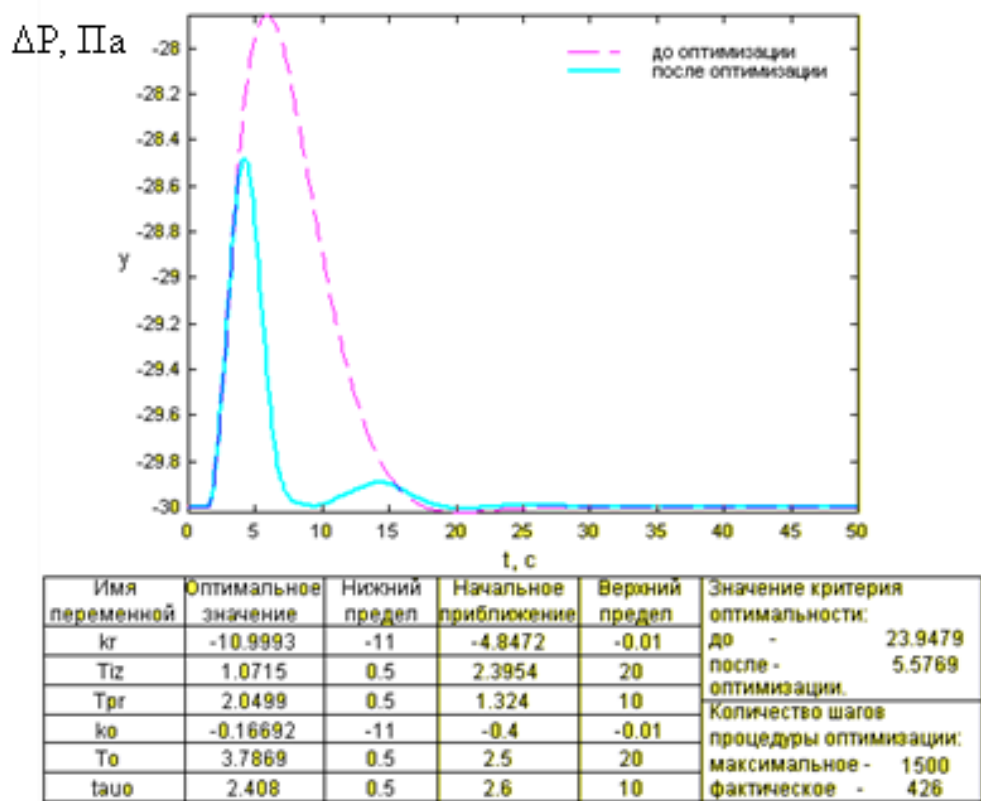


Рис. 2.10 – Результати оптимізації налаштувань ПД-регулятора

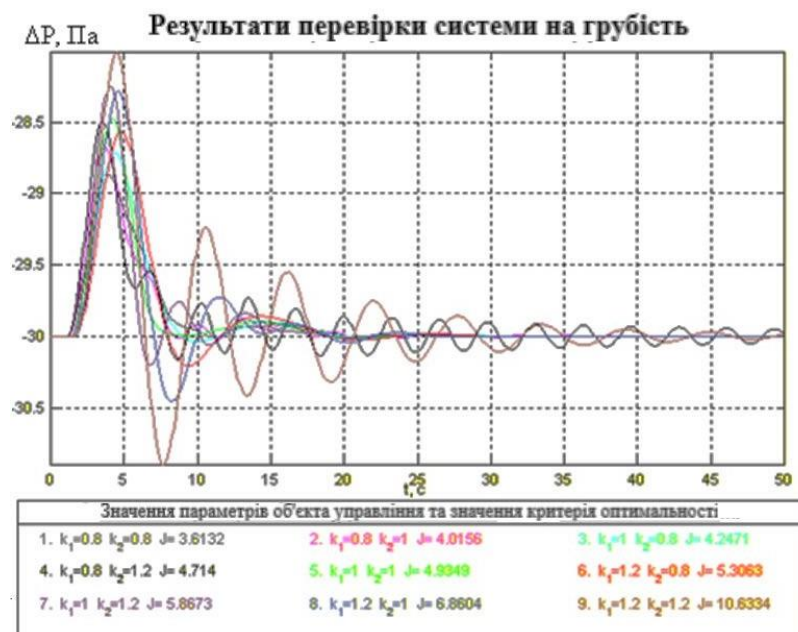


Рис. 2.11 – Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором і упереджувачем Сміта

Проведемо порівняльний аналіз роботи альтернативних варіантів САР. Схема моделювання наведена на рис.2.12 , а результати на рис. 2.13

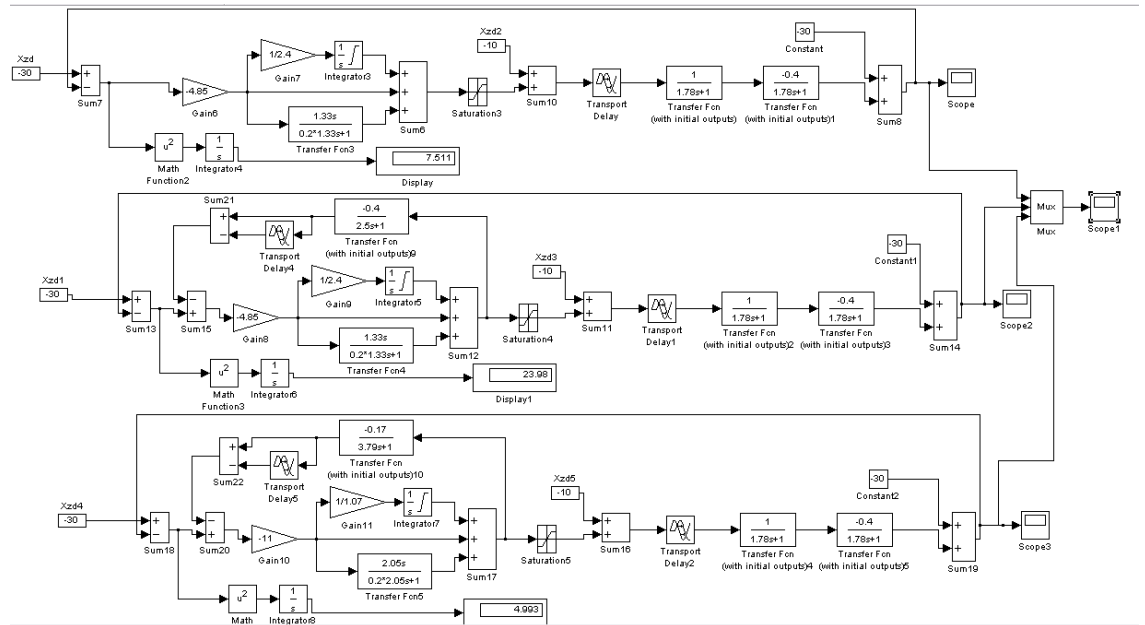


Рис. 2.12 – Структурна схема моделювання для порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

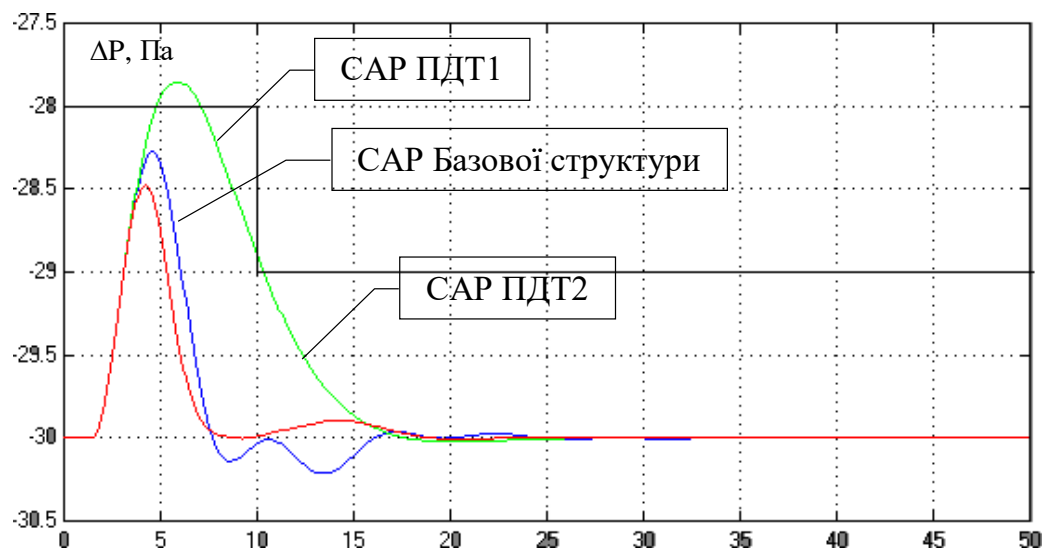


Рис. 2.13 – Перехідні процеси в САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

Таблиця 2.1 – Результати порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

Структура САР	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\Delta P_{\text{МАКС}}$	Тпп, с	
Базова	1,75	6.2	7,5
Підвищеної динамічної точності (САР ПДТ1)	2,2	10,5	24,0
Підвищеної динамічної точності (САР ПДТ2)	1,5	5.3	5.0

2.5 Оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності та аналіз результатів синтезу

Доповнимо схему моделювання каналом дії контрольованого збурення та коригуючим зв'язком який забезпечує інваріантність відносно контрольованих збурень. Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності інваріантної до контрольованих збурень для оптимального параметричного синтезу коригуючих зв'язків та параметрів ПД-регуляторів приведена на рис. 2.14, а результати оптимізації – на рис. 2.15.

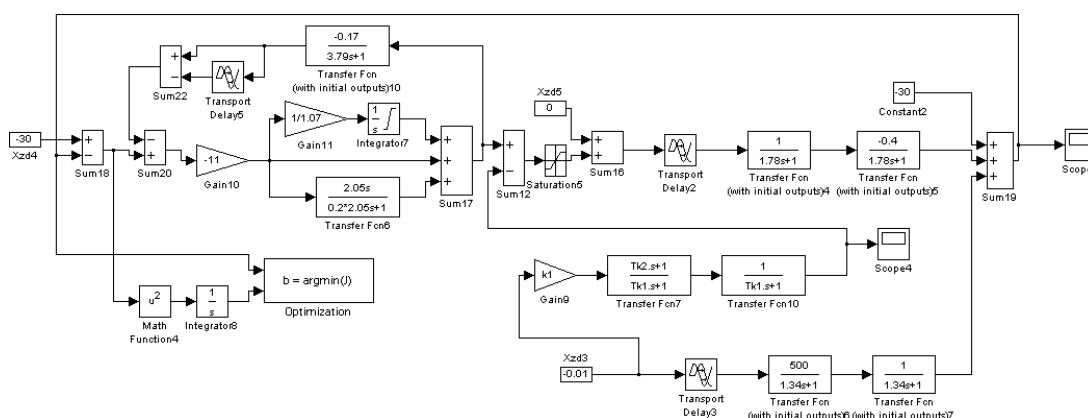


Рис. 2.14 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку

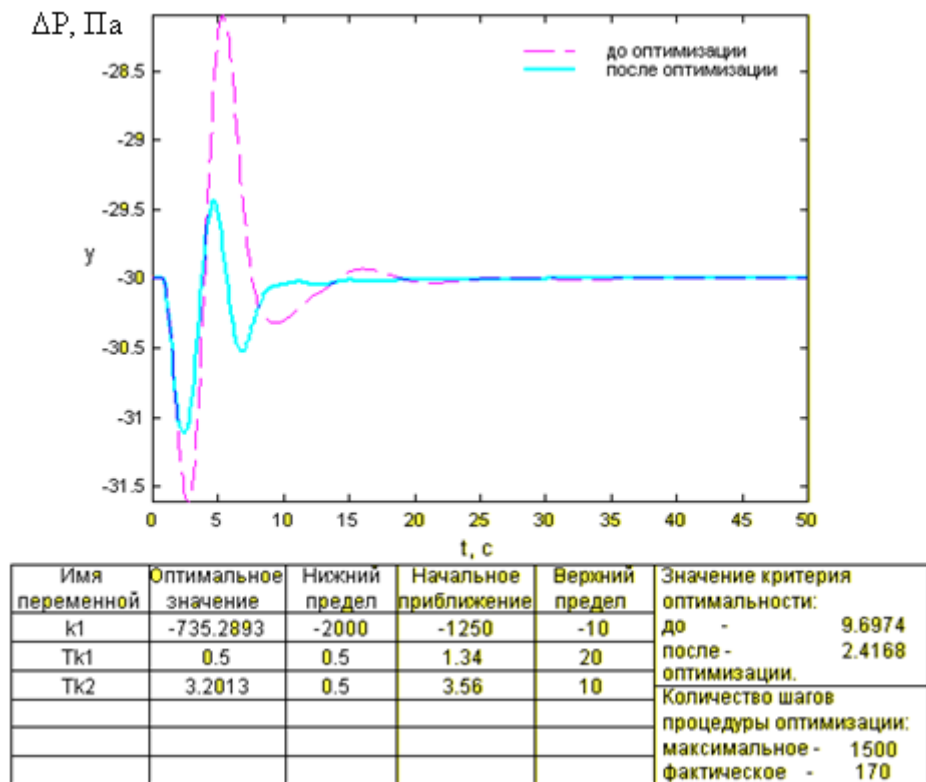


Рис. 2.15 – Результати оптимізації налаштувань коригуючого зв'язку

Перевіряти отриману САР на грубість не потрібно тому що коригуючий зв'язок не входить до власного оператору САР.

Проведемо порівняльний аналіз роботи альтернативних варіантів САР. Схема моделювання наведена на рис. 2.16, а результати на рис.3.17.

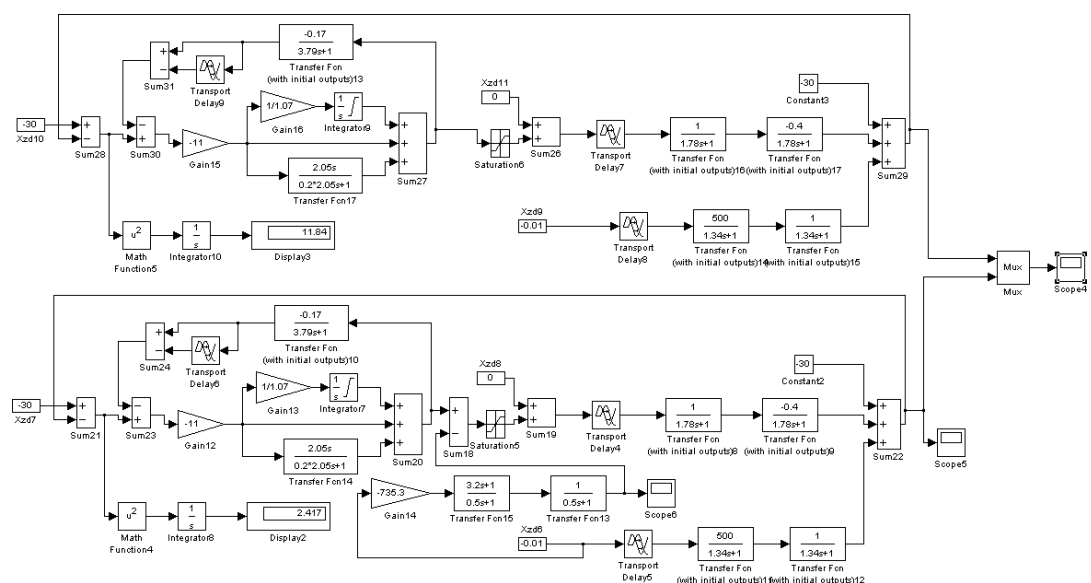


Рис. 2.16 – Структурна схема моделювання для порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

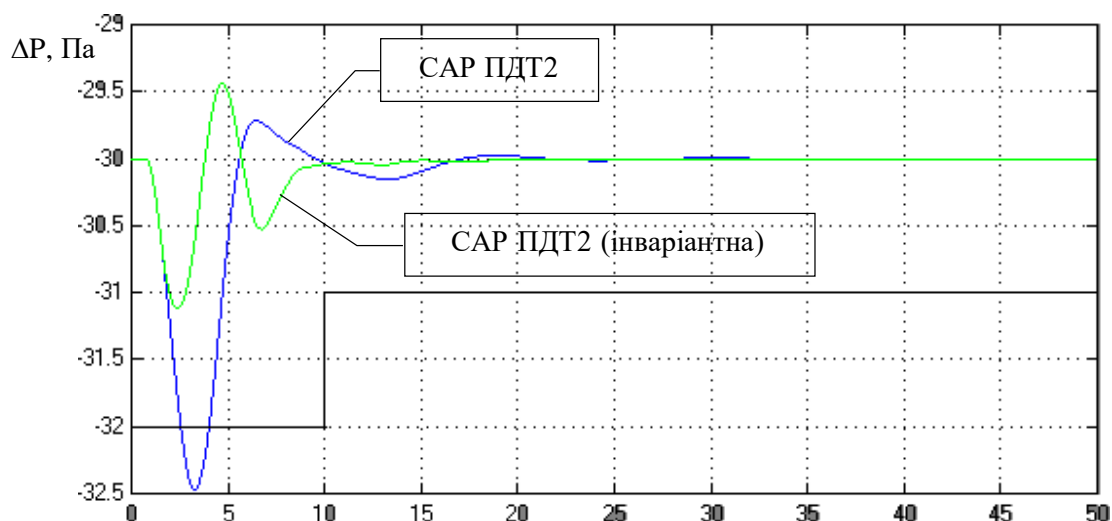


Рис. 2.17 – Перехідні процеси в САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

Таблиця 2.2 – Результати порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

Структура САР	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\Delta P^{\text{МАКС}}$	$T_{\text{пп}}, \text{с}$	
Підвищеної динамічної точності	2,5	4,7	11,8
Підвищеної динамічної точності (інваріантна)	1,1	3.0	2.4

Підвищення динамічної точності САР з ПД-регулятором дало зменшення інтегрального показника якості та прямих показників якості перехідних процесів.

Для технічної реалізації доцільно використовувати САР підвищеної динамічної точності, що забезпечує інваріантність відносно коливань витрат газу що подається до топки F_T .

2.6 Висновки за розділом

В даній роботі розроблена САР тиску у топці котла з упереджувачем Сміта та інваріантністю відносно коливань витрат газу що подається до топки F_T . Результати моделювання показують що введення коригуючих зв'язків дозволило істотно зменшити прямі та інтегральні показники якості, тобто підвищилась динамічна точність САР.

РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАРИ, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГІЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління побудованих на базі апарата нечіткої логіки та штучної нейронної мережі для розглянутого об'єкта керування

Нечітке управління (управління на основі методів теорії нечітких множин) використовується при недостатньому знанні об'єкта управління, але при наявності досвіду управління ним, в нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка, а також у випадках, коли за умовами задачі необхідно використовувати знання експерта.

Для технічних систем з випадковим характером впливу, що збурює, складністю розробки динамічної моделі, її високим порядком, нелінійним характером можна говорити про проблему управління в умовах невизначеності. Використання нечітких регуляторів забезпечує грубість і стабільну збіжність процесів, тому такий підхід слід вважати доцільним. Основна перевага нечіткого підходу – можливість формування числа правил управління залежно від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурювань. Також особливою проблемою в сфері автоматизації є управління об'єктами, функції яких описуються нелінійними залежностями. При проектуванні систем управління для нелінійних об'єктів зазвичай використовуються такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація. Однак застосування цих методів у реальних технічних пристроях не завжди дозволяє досягнути бажаного ефекту. У цьому випадку для забезпечення збільшення ефективності можна використовувати систему управління з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Таким чином, в умовах наявності істотних невизначеностей у статичних і динамічних характеристиках топці котла як об'єкта управління представляються труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи управління. У зв'язку з цим доцільним (актуальним) є застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

У якості переваги нечіткого регулювання можна також відзначити наявність сучасних систем програмування контролерів з вбудованими бібліотеками нечіткого управління, що мають добрий графічний інтерфейс, у якому дуже легко і наочно представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку. Отже, спрощується і налаштування системи автоматичного регулювання.

3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB/Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійними статичними характеристиками

Для підтвердження актуальності застосування системи управління, побудованої на базі апарата нечіткої логіки, для розглянутого у даній роботі об'єкта управління, необхідно перейти до його нелінійної моделі. Таким чином, модель каналу регулювання розглянутого об'єкта управління повинна характеризуватися несуттєво нелінійною статичною характеристикою.

Для представлення нелінійної моделі об'єкта управління необхідно до відповідних моделей каналів регулювання додати відповідні нелінійні ланки. Нелінійність необхідно реалізувати за допомогою включення блоку Look up Table у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта управління з додатковими блоками Look up Table, які визначає нелінійність статичної характеристики, представлена на рисунку 3.1.

На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкту управління, яка є більш розширеною моделлю, розробка якої представлена в розділі 2 роботи. У блоці Look up Table у табличній формі задається нелінійний зв'язок

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

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

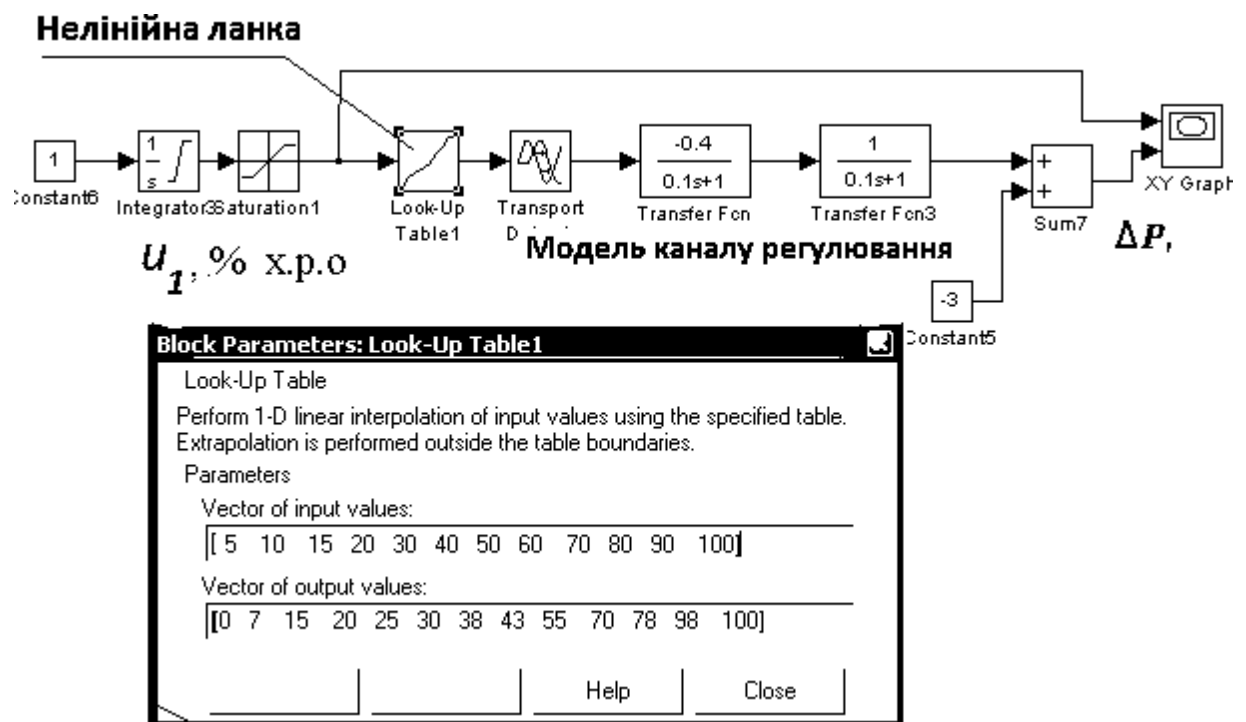


Рис. 3.1 – Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

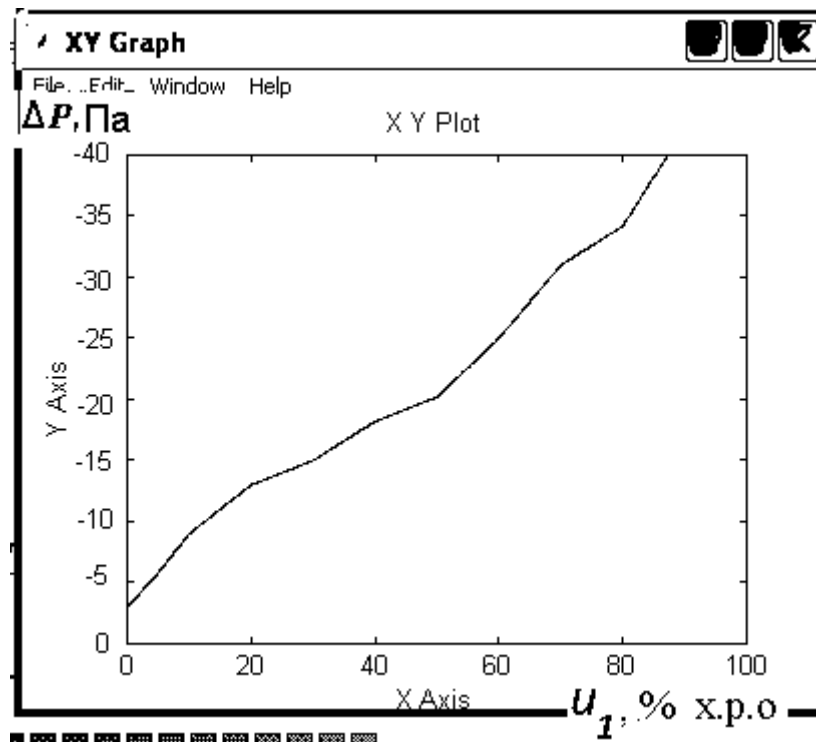


Рис. 3.2 – Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

3.3 Синтез САР з нелінійною моделлю ОК і традиційним ПД-регулятором

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

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

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

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

$$J = \int_0^{\infty} |e_1(t)| dt \rightarrow \min$$

$e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням тиску в топці котла ΔP_Z ;

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

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

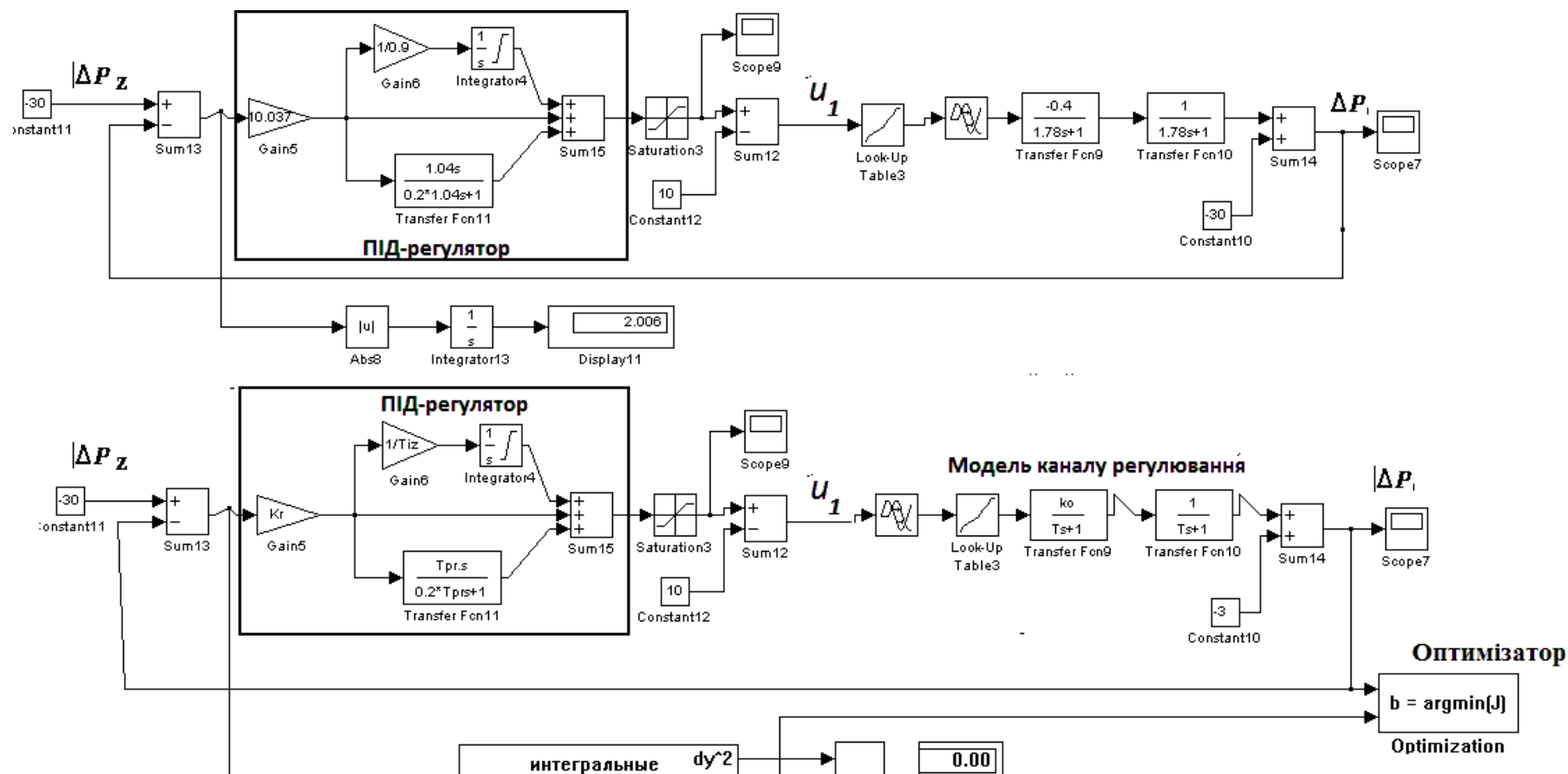


Рис. 3.3 – Структурна схема моделі САУ з традиційним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором, та структурна схема моделі оптимізованої САР що реалізована засобами MATLAB\Simulink

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів тиск в топці котла повинен підтримуватися на рівні 30 Па з точністю ± 1 Па. За цим параметром допустимі короточасні відхилення до $\pm 2,3$ Па протягом часу не більше 30 с. Всі ці дані відповідають перехідній характеристиці представленої після оптимізації.

Первісні значення параметрів настроювання регуляторів і відповідні оптимальні значення представлені на рисунках 3.4.1 та 3.4 у вікні результатів оптимізації. Також на рисунку 3.4 представлені відповідний графік перехідного процесу, отриманого після оптимізації системи. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання, за тиском газу, помітно покращилася після оптимізації САУ. Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи управління. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

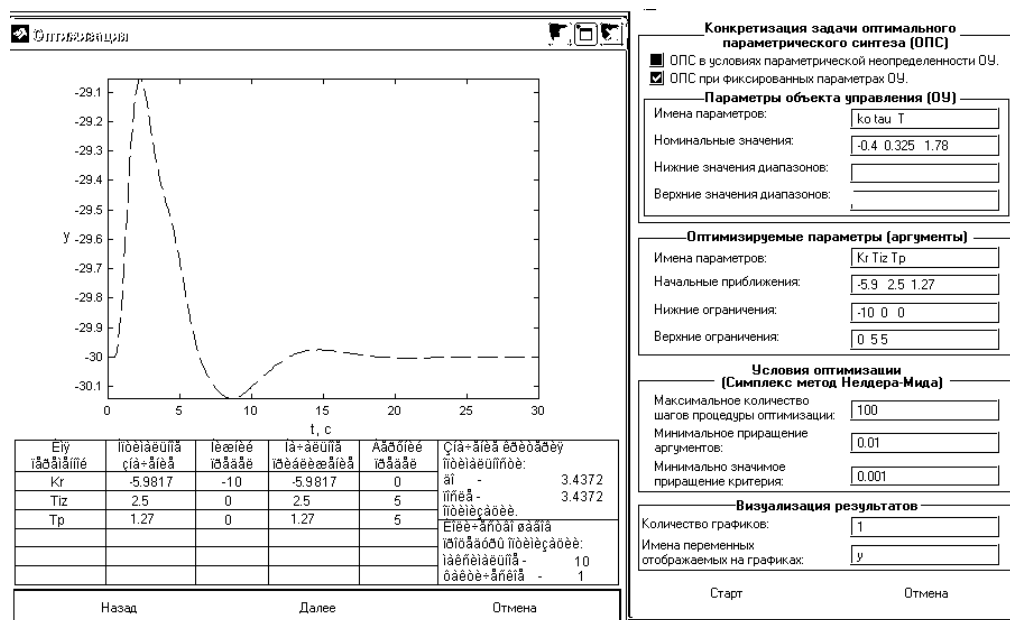


Рис. 3.4.1 – Початкові характеристики до параметричної оптимізації значень параметрів регулятора САУ з каналом регулювання, що характеризуються нелінійною статичною характеристикою

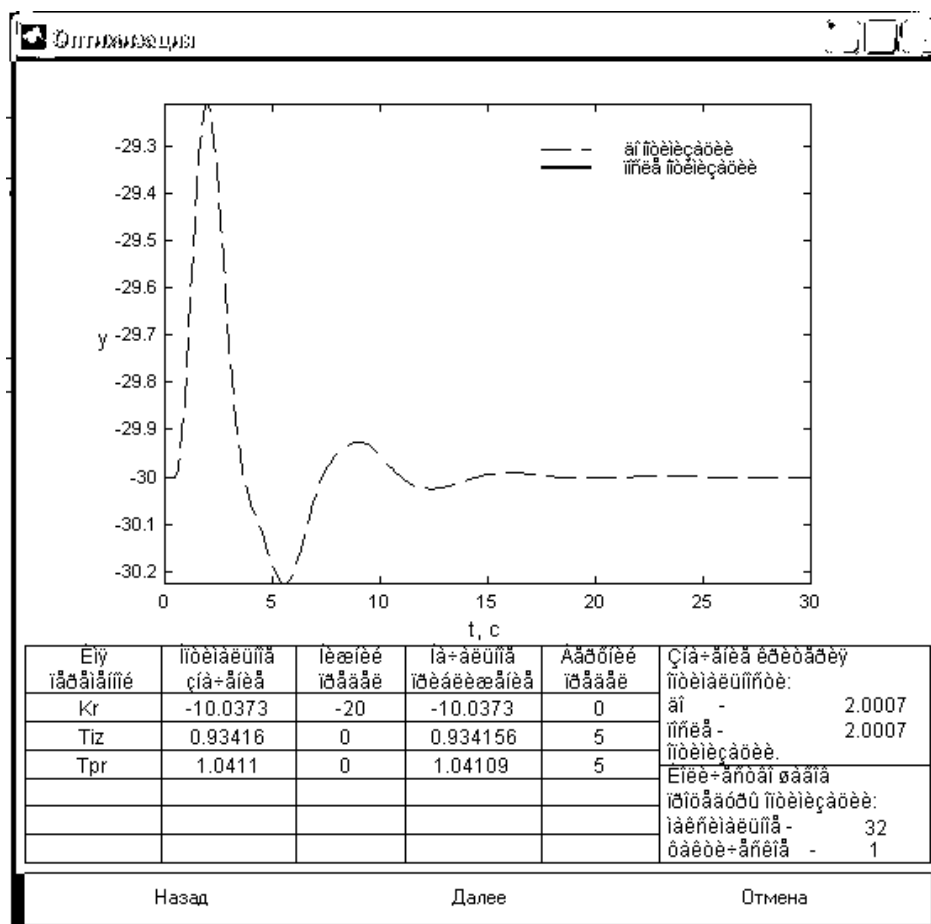


Рис. 3.4 – Результати параметричної оптимізації значень параметрів регуляторів САУ з каналом регулювання, що характеризуються нелінійною статичною характеристикою

3.4 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нечіткого регулятора

З урахуванням властивостей топки котла, як нелінійного об'єкта управління, доцільно застосувати в контурі регулювання тиску газу нечіткий логічний регулятор (НЛР), який має властивості нелінійного регулятора. Застосування нечіткого-логічного регулятора (Fuzzy – регулятора) обумовлено наявністю нелінійного об'єкта управління, а також складного опису його статичних режимів роботи.

Складність опису статичних режимів роботи об'єкта приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними.

Таким чином, у справжній роботі була реалізована модель САР із Fuzzy – нечітким регулятором.

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазіуправління: фазіфікація, логічного висновку і дефазіфікація. Спрощена структурна схема розроблюємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.5. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

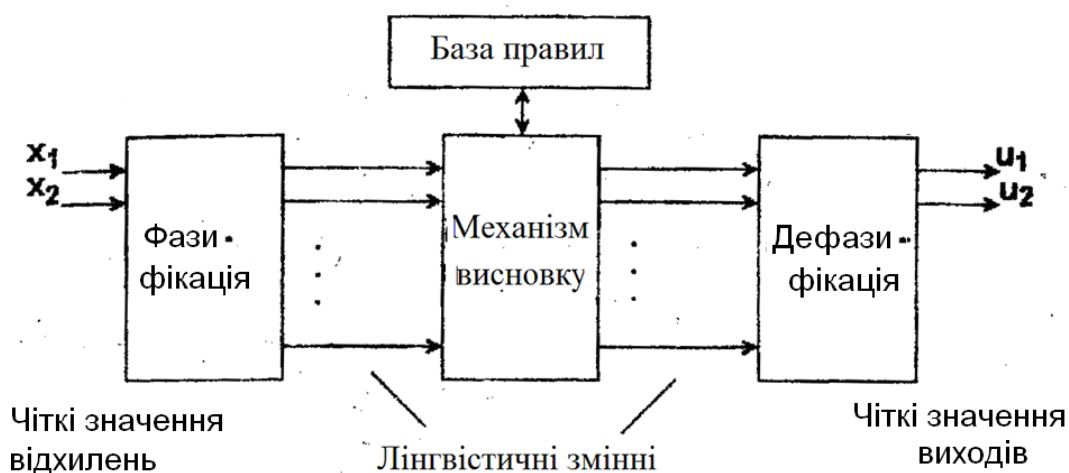


Рис. 3.5 – Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

Всі визначені блоки (фазіфікація, блок логічного розв'язку, дефазіфікація), що представлені на рисунку 3.5, редагуються у відповідному редакторі FIS Editor середовища MATLAB. Для запуску вікна fis-редактора в командному вікні MATLAB Window commander було прописано команду «Fuzzy». Після чого було вибрано алгоритм Sugeno та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рисунку 3.6 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора тиску газу з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

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

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

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

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

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

де x, y – вхідні змінні, A_i, B_i - нечіткі множини $z_i = f(x_1, \dots, x_n)$ - довільна чітка функція.

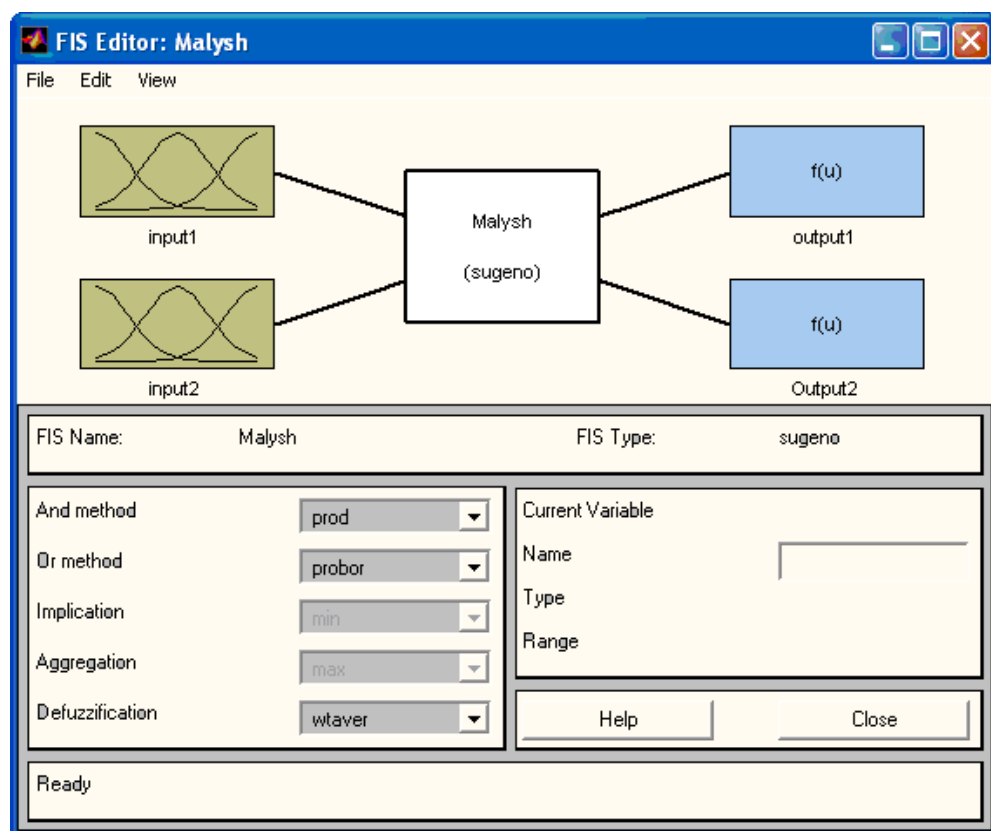


Рис. 3.6 – Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

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

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

ПРАВИЛО <2>: ЯКЩО $(x \in A_2 \text{ І } y \in B_2)$, ТО, $z_2 = C_2$, (1)

де C_1, C_2 - звичайні (чіткі) числа.

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

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

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

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

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

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

Відповідно вище представленим правилам складемо таблиці баз знань для НЛР тиску в топці котла.

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

застосовується. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

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

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

b - найбільш можливе значення змінної

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора тиску в топці котла

$e_1 \backslash \Delta e_1$	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = -250;$ $\Delta u_1 = -10;$	–
Z	$u_1 = -250;$ $\Delta u_1 = -10;$	$u_1 = 0;$ $\Delta u_1 = 0;$	$u_1 = 250;$ $\Delta u_1 = 10;$
PE	–	$u_1 = 240;$ $\Delta u_1 = 10;$	–

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.7 зображено вікно налаштування функцій приналежності mf1, mf2, mf3 до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна», «приблизно нульова», «велика позитивна» відповідно. Також були визначені функції приналежності mf1, mf2, mf3 до нечітких множин приріст похибки регулювання «великий негативний», «приблизно нульовий» та «великий позитивний», які представлені на рисунку 3.8.

Згідно з таблицею 1 бази правил функціонування регулятора, були прописані відповідні правила у вікні редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink. Це вікно з відповідними правилами зображено на рисунку 3.9.

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

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

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

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

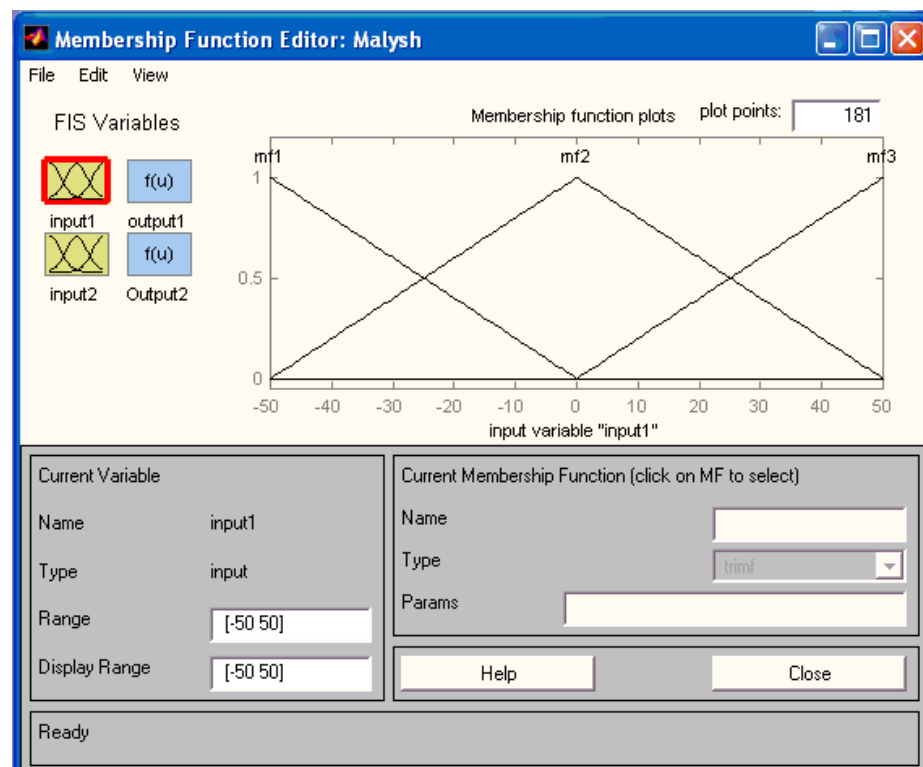


Рис. 3.7 – Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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

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

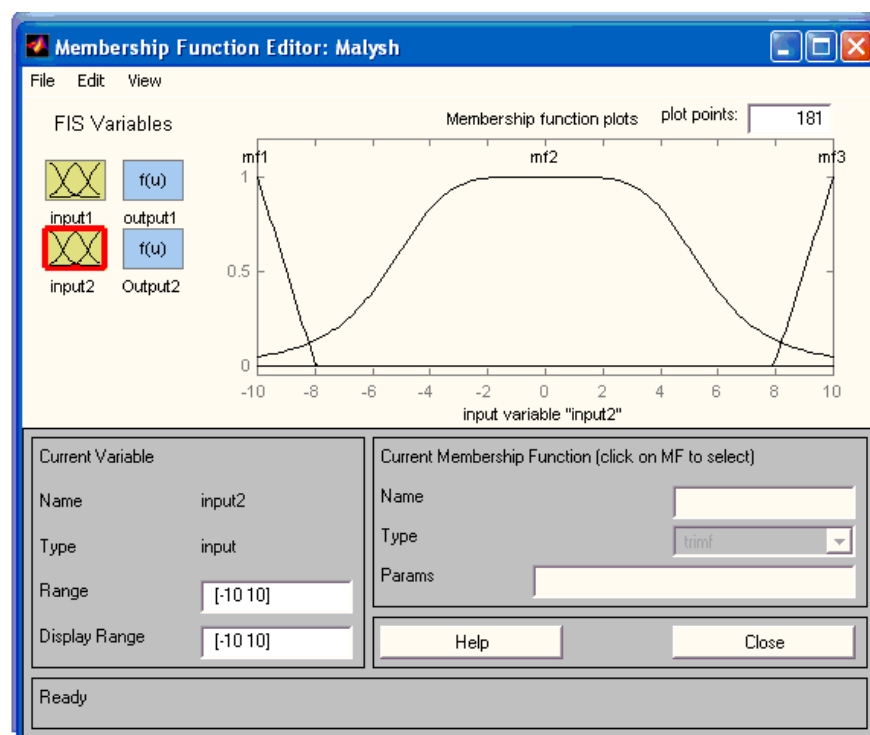


Рис. 3.8 – Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з нечітким регулятором, фрагмент якої представлений на рисунку 3.11. 3

рисунку 3.11 видно, що управляюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

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

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

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

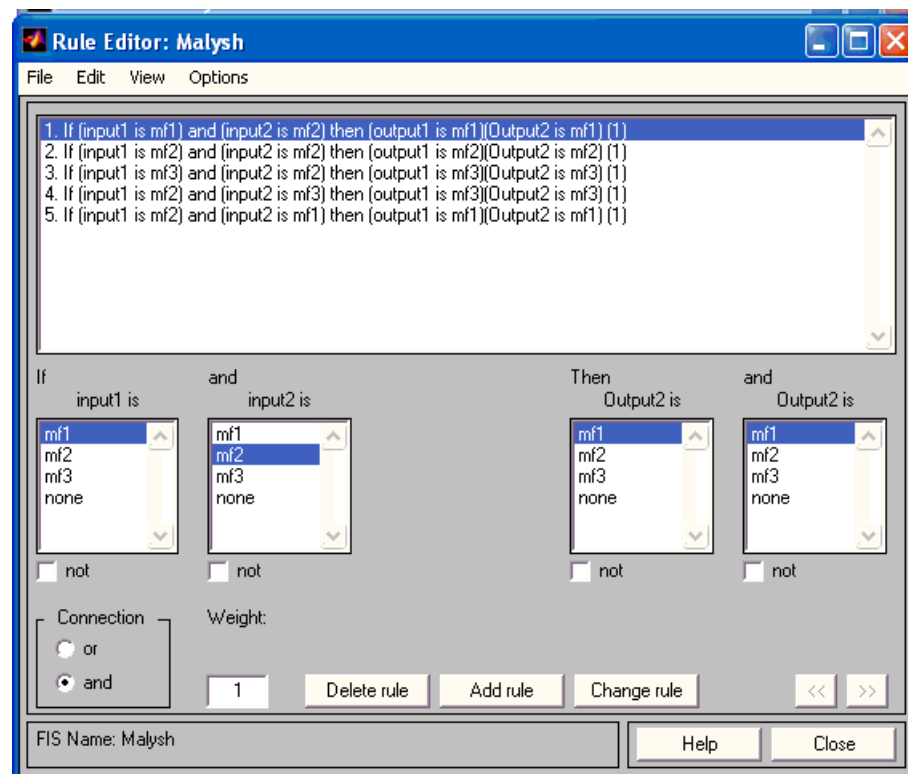


Рис. 3.9 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

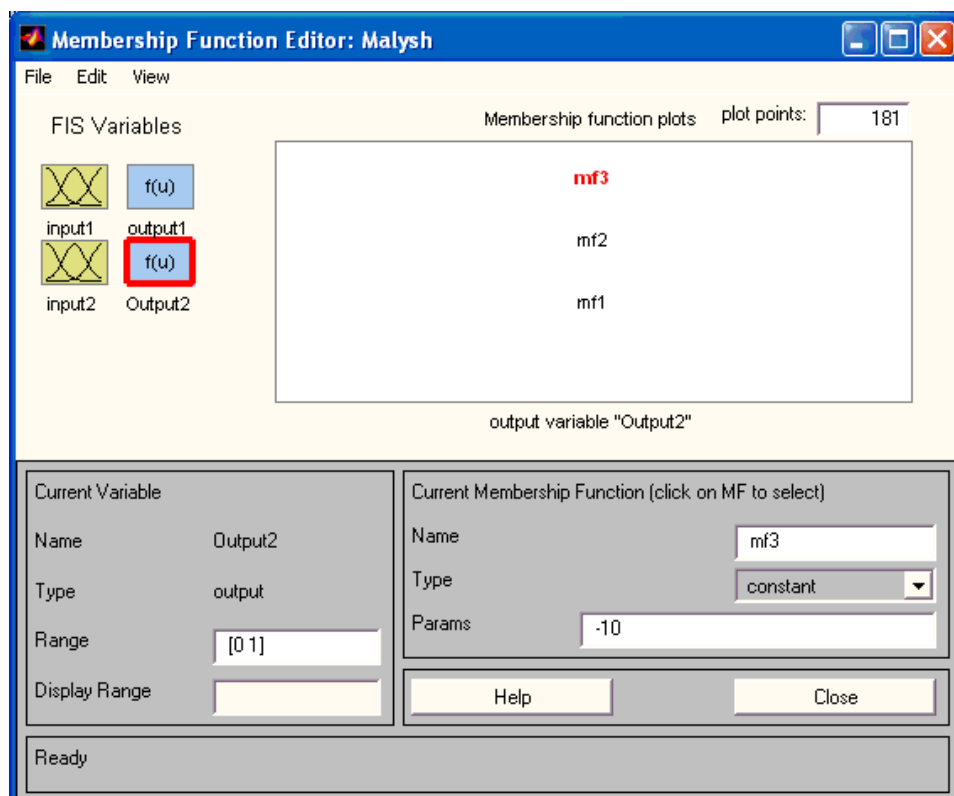


Рис. 3.10 – Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

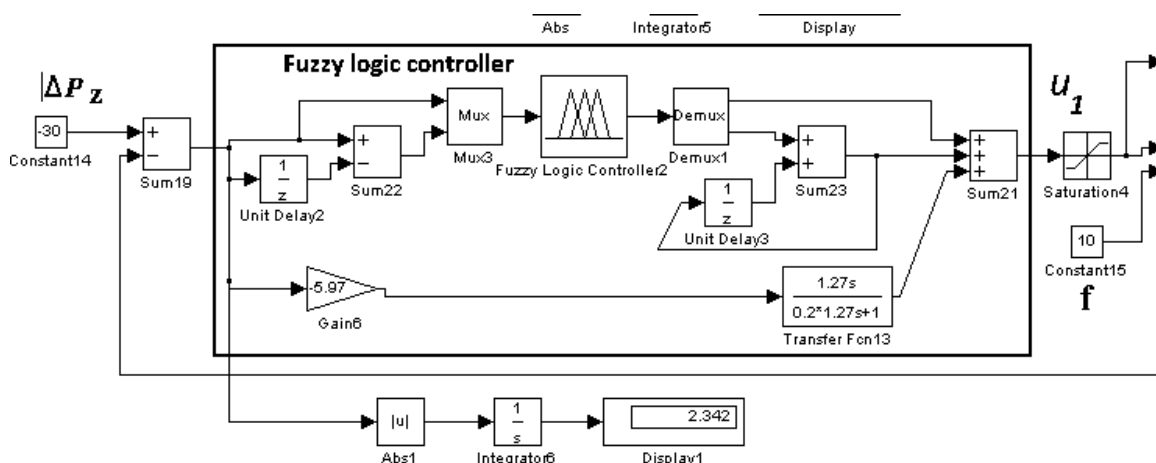


Рис. 3.11 – Фрагмент схеми моделювання САУ з нечітким логічним регулятором

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

правила функціонування були визначені з урахуванням правил функціонування нечітких регуляторів, представлених у відомих наукових роботах, одних із перших з Fuzzy управління.

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

Таким чином, на рисунку 3.12 представлені графіки перехідних процесів при детермінованому збурюванні.

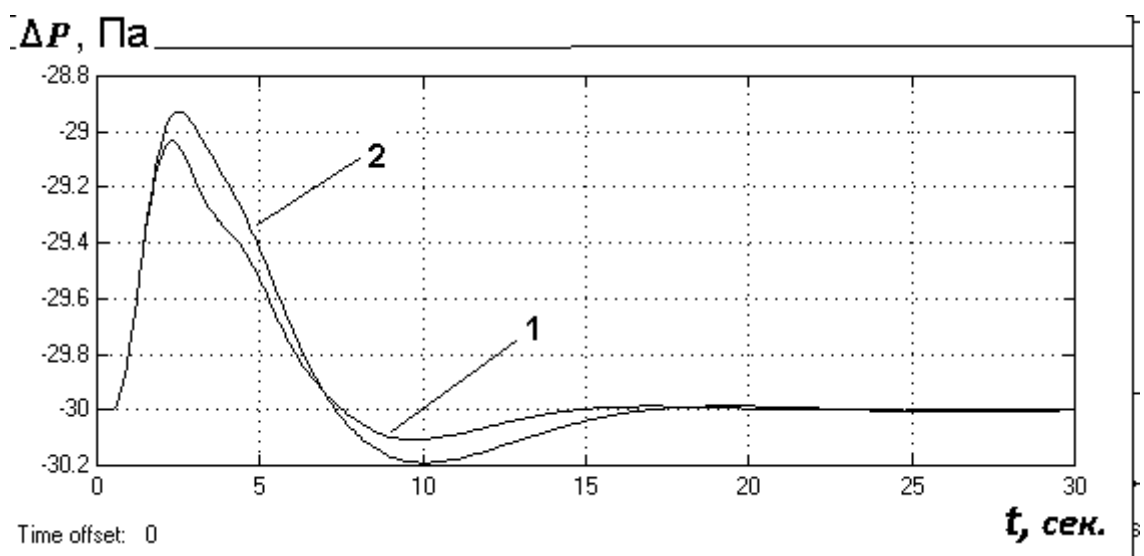


Рис. 3.12 – Графіки перехідних процесів, що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в неоптимізованій САУ з традиційним ПД – регулятором; графік 2 – перехідний процес в САУ з нечітким регулятором

З рисунків можна побачити, що за якістю регулювання різні САУ функціонують ідентично, як з традиційним, так і з нечітким регулятором. Графіки перехідних процесів різних САУ зливаються в один. Це отримано завдяки корегуванню параметрів нечіткого регулятора, а також завдяки

порівнянню функціонування САУ з нечітким регулятором і САУ з традиційним регулятором.

В справжній роботі також був синтезований нечіткий регулятор з висновком Мамдані. Виходячи з графіків перехідних процесів що представлені на рисунку 3.13 видно що за якістю регулювання САУ з нечітким регулятором з алгоритмом виведення Мамдані функціонує значно краще ніж САУ з нечітким регулятором з виведенням Сугено-0. Так, час регулювання, при східчастому впливу що збурює, зменшився десь у два рази і значно зменшалось максимальне динамічне відхилення.

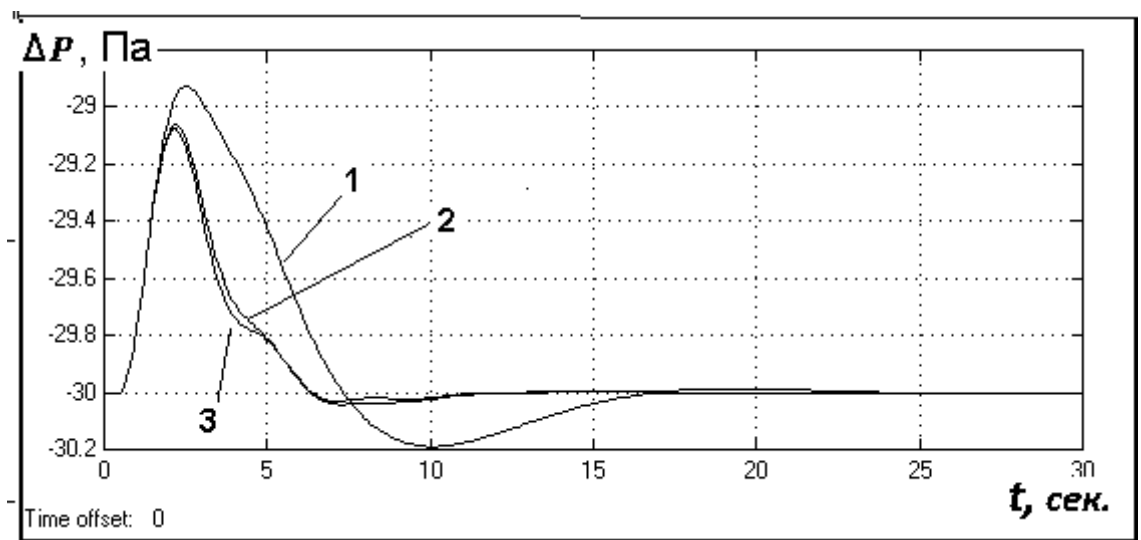


Рис. 3.13 – Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором з висновком Сугено -0; графік 2,3 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором який функціонує згідно з алгоритмом виведення Мамдані

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

П1: якщо $x \in A1$, тоді $z \in B1$,

П2: якщо $x \in A2$, тоді $z \in B2$,

.....

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

де x — вхідна змінна (ім'я для відомих значень даних), z — змінна виводу (ім'я для значення даних, яке буде обчислене). A_i та B_i — нечіткі множини, визначені на X та Z відповідно за допомогою функції приналежності та (z) .

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

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

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

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

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

де через \wedge позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

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

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

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

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

Таким чином, для переходу від Сугено 0-го порядку до алгоритму Мамдані необхідно визначити вихідні функції приналежності $C_1(z)$, $C_2(z)$, $C_3(z)$ замість відповідних значень W_2 , $-W_2$, та C_1 , C_2 . На рисунках 3.13.1 та 3.13.2 представлені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам

– «приріст управляючого впливі» великій (PE), «приріст управляючого впливі» приблизно нульовий (Z), «приріст управляючого впливі» від’ємний (NE).

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

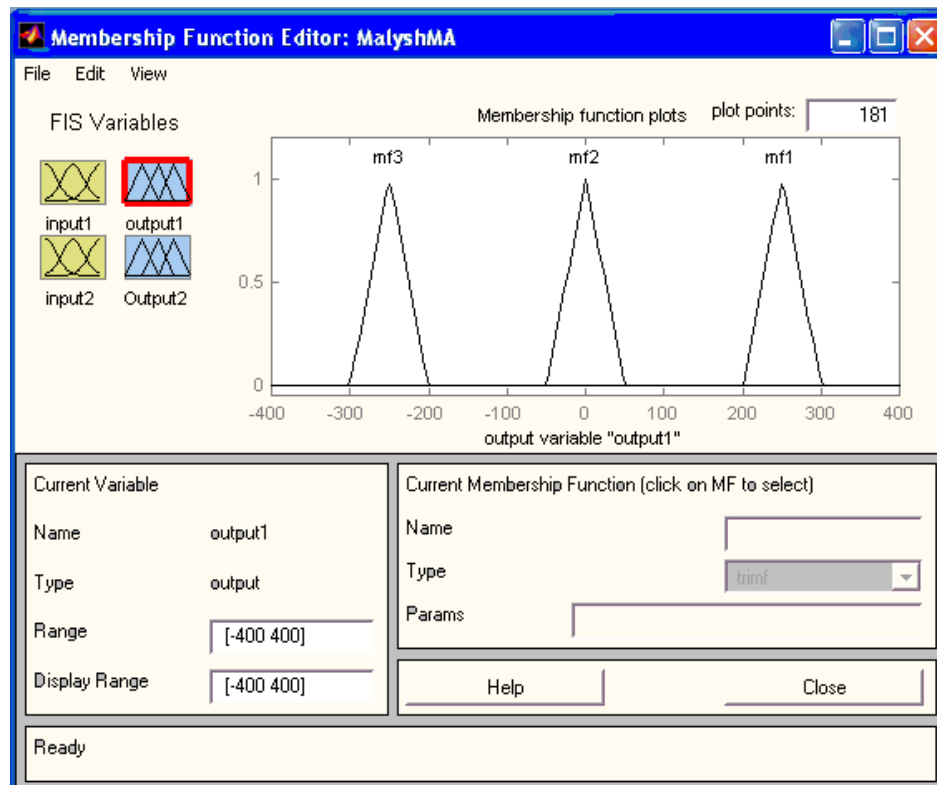


Рис. 3.13.1 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

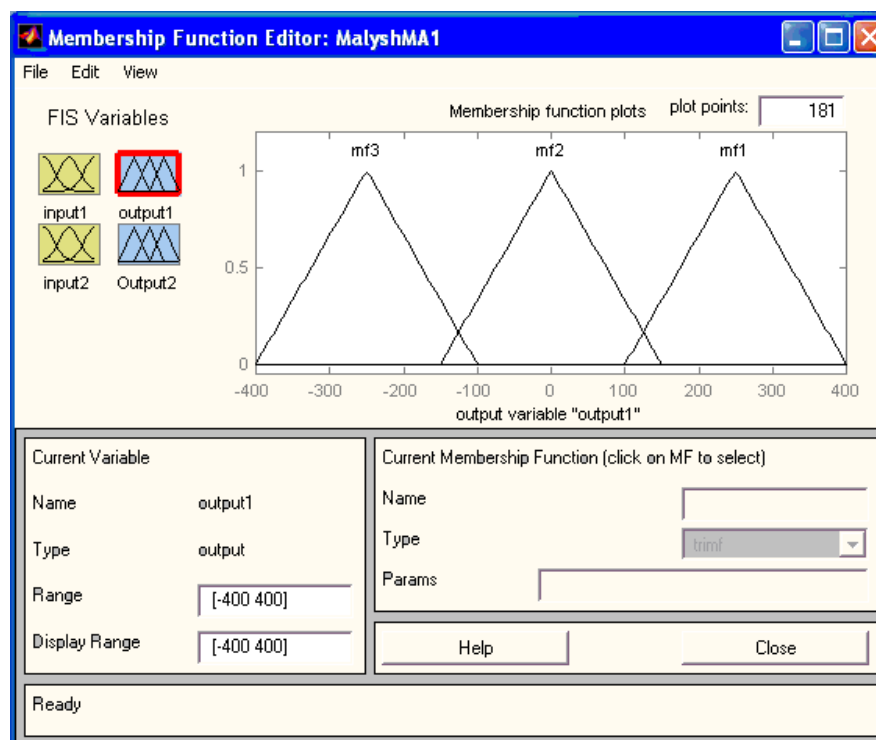


Рис. 3.13.2 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

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

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

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

При дефазифікації методом центру тяжіння звичайне (чітке) значення вихідної змінної дорівнює абсцисі центру ваги площі, обмеженою графіком кривої функції приналежності відповідної вихідної змінної.

3.5 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нейронного регулятора

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

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

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

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

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

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

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

на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі управління. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.15.

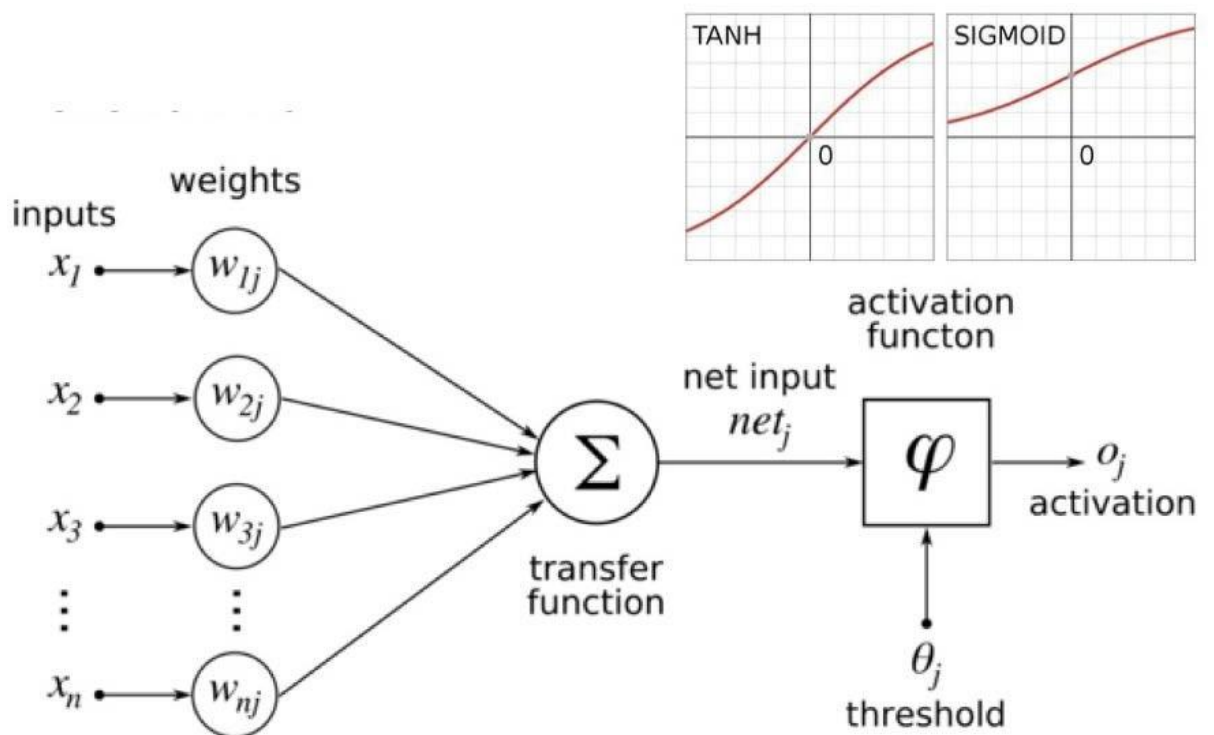


Рис. 3.14 – Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

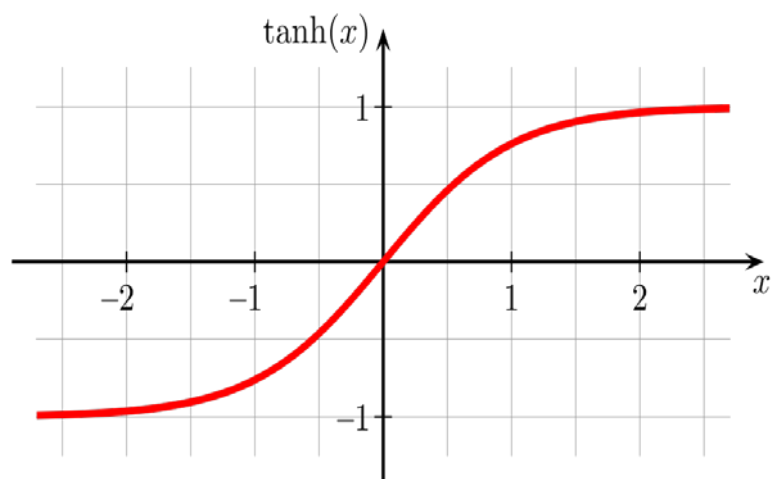


Рис. 3.15 – Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

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

Відомо, що одношарова нейронна мережа має обмежені можливості. Багатошарова чотирьох-шарова вже надлишкова для рішення різних задач. В даному випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.16.

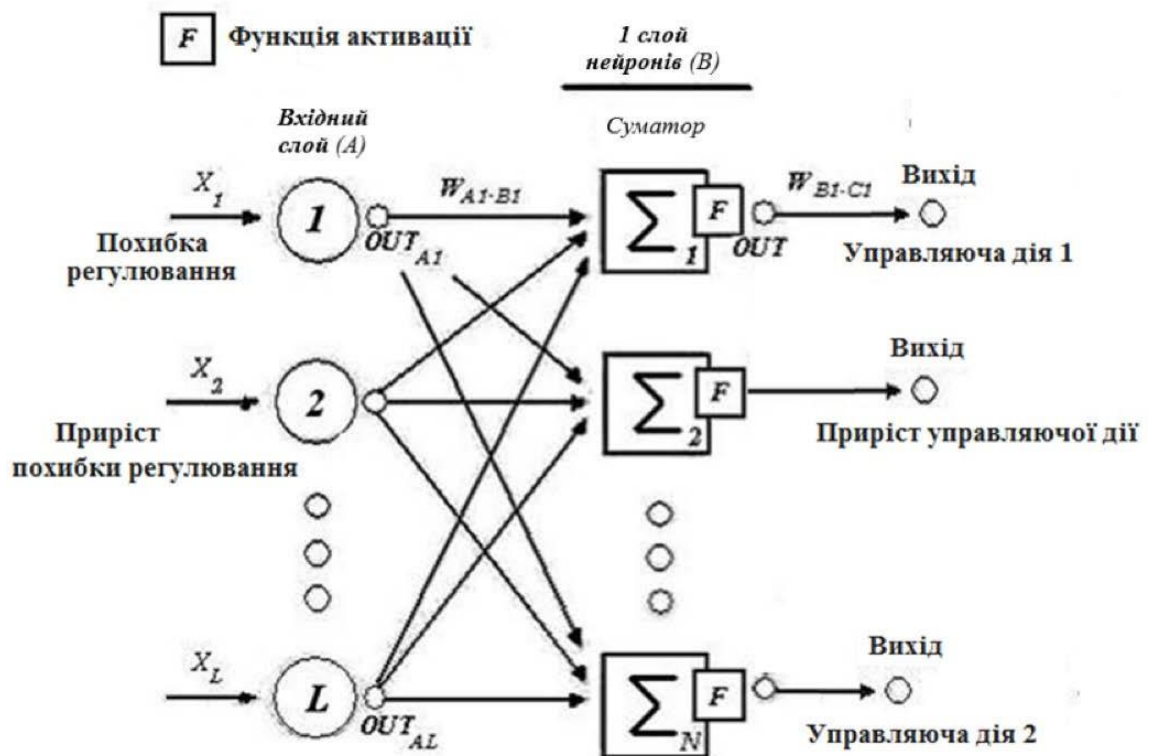


Рис. 3.16 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

Складнішими являються багатошарові нейронні мережі. Такі мережі, крім вхідного і вихідного шарів нейронів, характеризуються ще і прихованим шаром (шарами). Зрозуміти їх розташування просто - ці шари знаходяться між вхідним і вихідним шарами.

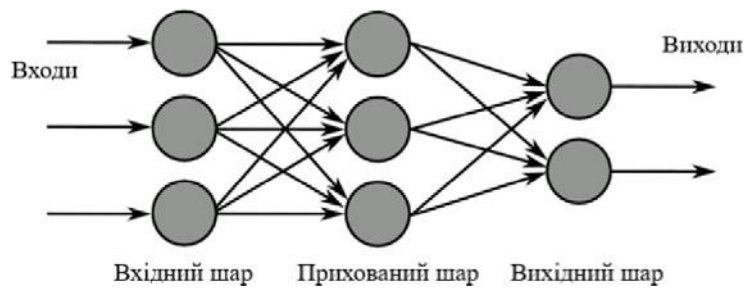


Рис. 3.17 – Багатошарова нейронна мережа

На рисунку 3.18 також зображені похибки на кожному нейроні для коректування ваг за методом зворотного поширення. Якщо така структура буде недостатня, то необхідно буде збільшити кількість нейронів в вхідному шарі мережі та збільшити кількість шарів до трьох.

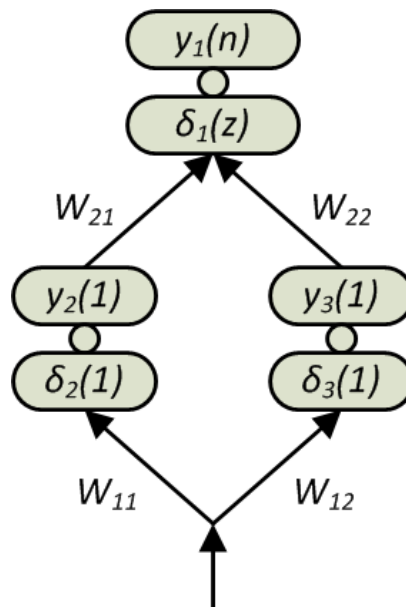


Рис. 3.18 – Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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

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

Таблиця 3.2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	l	u	Δu
1	-50	0,250	0,12
2	-30	0,141	0,0628
3	-15	0,896	0,04312
4	-10	0,068	0,03302
5	-5	0,040	0,0194
6	-2	0,018	0,0088
7	0	0	0
8	5	-0,40	0,0194
9	10	-0,06898	0,03302
10	15	-0,090	0,04312
11	30	-0,141	0,0628
12	50	-0,25	0,12

Далі створюємо М-файл в середовищі Matlab і в цьому файлі прописуємо команди для створення і навчання нашого нейрорегулятора. Вхідні і вихідні значення нейрорегулятора були отримані на основі характеристик нечіткого логічного регулятора, отриманих на основі схеми моделювання, представленої на рисунку 3.19.

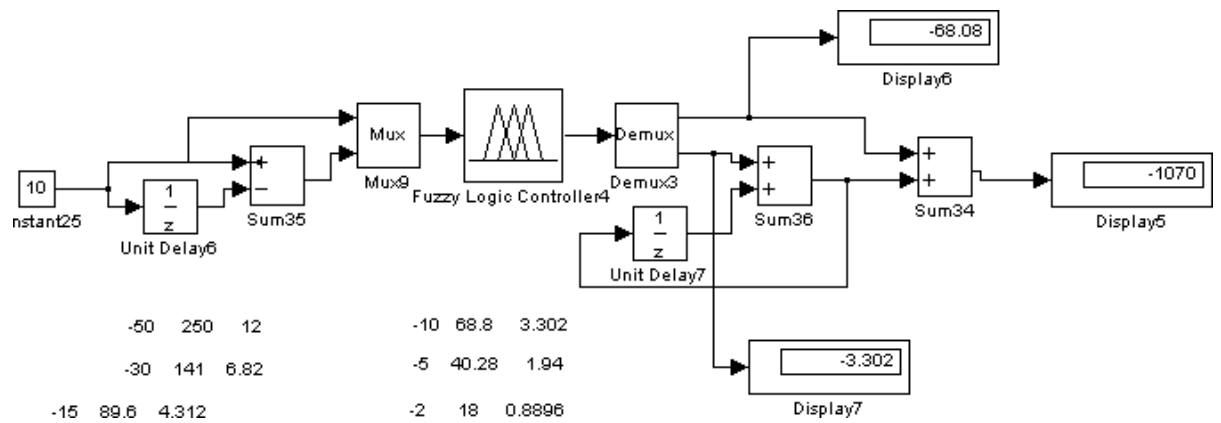


Рисунок. 3.19 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.20 і 3.21 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у командній строчці Matlab – command window, в результаті чого згенерується відповідна нейронна мережа.

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

```

» P=[-50 -30 -15 -5 0 5 15 30 50];
» t=[0.250 0.141 0.0896 0.04028 0 -0.040 -0.089 -0.141 -0.250];
» net=newff([-50 50], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=50;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/50, MSE 0.69644/0, Gradient 24.8853/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/50, MSE 0.000128709/0, Gradient 0.107235/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/50, MSE 0.000109379/0, Gradient 0.00153901/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

    0.2481    0.1527    0.0773    0.0260    0.0002   -0.0256   -0.0770

Columns 8 through 9

   -0.1525   -0.2482

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

    0.2481    0.1527    0.0773    0.0260    0.0002   -0.0256   -0.0770

Columns 8 through 9

   -0.1525   -0.2482

» gensim(net)
»

```

Рис. 3.20 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора


```

» P=[-50 -30 -15 -5 0 5 15 30 50];
» t=[0.12 0.068 0.0431 0.0194 0 -0.0195 -0.043 -0.068 -0.12];
» net=newff([-50 50], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=50;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/50, MSE 0.340904/0, Gradient 28.6431/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/50, MSE 2.56064e-005/0, Gradient 0.0075035/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/50, MSE 2.52342e-005/0, Gradient 0.000561757/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

    0.1191    0.0736    0.0374    0.0125   -0.0001   -0.0126   -0.0376

Columns 8 through 9

   -0.0739   -0.1187

» gensim(net)
»

```

Рис. 3.21 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.22, з яких можливо побачити, що десь на 40-м кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями було закінчено.

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі. На рисунках 3.23 та 3.24 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову та Π – складову нейрорегулятора тиску газу окремо.

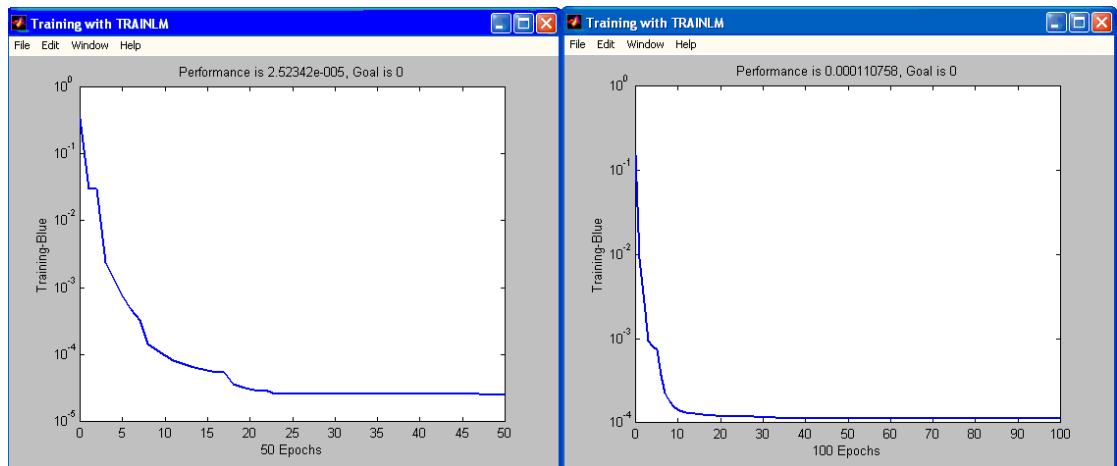


Рис. 3.22 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Фактичні значення:									
0.12	0.068	0.0431	0.0194	0	-0.0195	-0.043	-0.068	-0.120	
Бажані значення:									
0.1191	0.0736	0.0374	0.0125	-0.0001	-0.0125	-0.0376	-0.0739	-0.1187	

Рис. 3.23 – Бажані та фактичні значення вих. сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову нейрорегулятора

Фактичні значення:									
0.250	0.141	0.0896	0.04028	0	-0.040	-0.089	-0.141	-0.250	
Бажані значення:									
0.2481	0.1527	0.0773	0.0260	0.0002	-0.0256	-0.0770	-0.1525	-0.2482	

Рис. 3.24 – Бажані та фактичні значення вих. сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює II – складову нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених на рисунках 3.23 та 3.24, розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для і-тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі.

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

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

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

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

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

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

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

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

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 3.23:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.068 - 0.6127) * (0.068) * (1 - 0.068) = 0.00000085 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) * 0.00000085 = \\ &= -0.0000000143 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) * 0.00000085 = \\ &= 0.0000000351 \end{aligned}$$

Розрахунок помилок для II – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (0.0896 - 0.0773) * (0.0896) * (1 - 0.0896) = 0.0333 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

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

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

$$\begin{aligned} \delta_3(1) &= y_3(1) * \diamond 1 - y_3(1) \diamond * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.9766 * (1 - 0.9766) * (-7.3307275810928836) * 0.0333 = -0.005578 \end{aligned}$$

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

Сформовані нейроні мережі були визначені у схемі моделювання замість нечіткого регулятора, як показано на рисунку 3.25. У такий спосіб була синтезована модель САУ з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.25.

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.26, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.25.

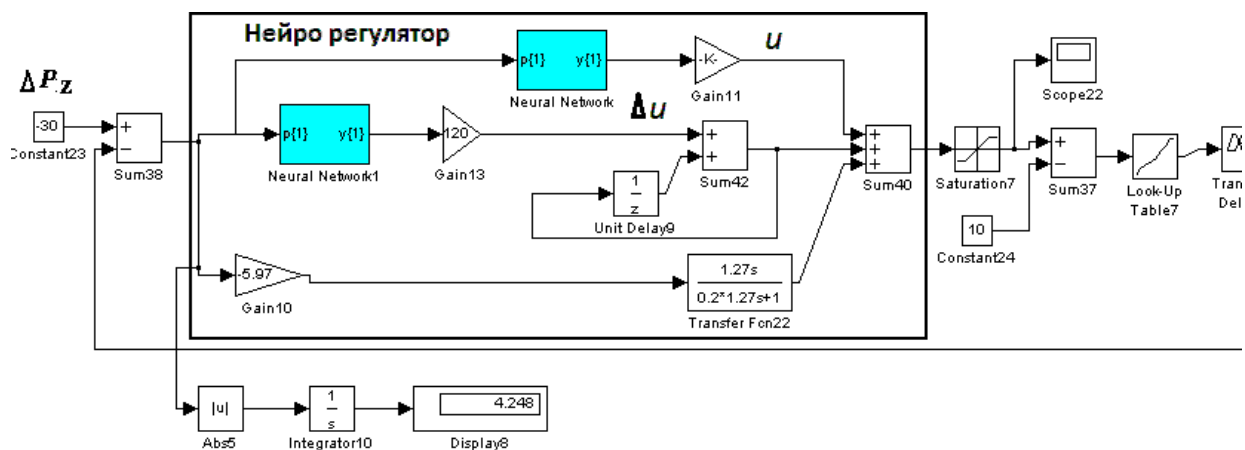


Рис. 3.25 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

У результаті моделювання САУ з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САУ з нечітким регулятором та традиційним ПД-регулятором. Ці графіки

представлені на рисунку 3.27. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором працює незначно гірше, ніж САУ з нечітким регулятором.

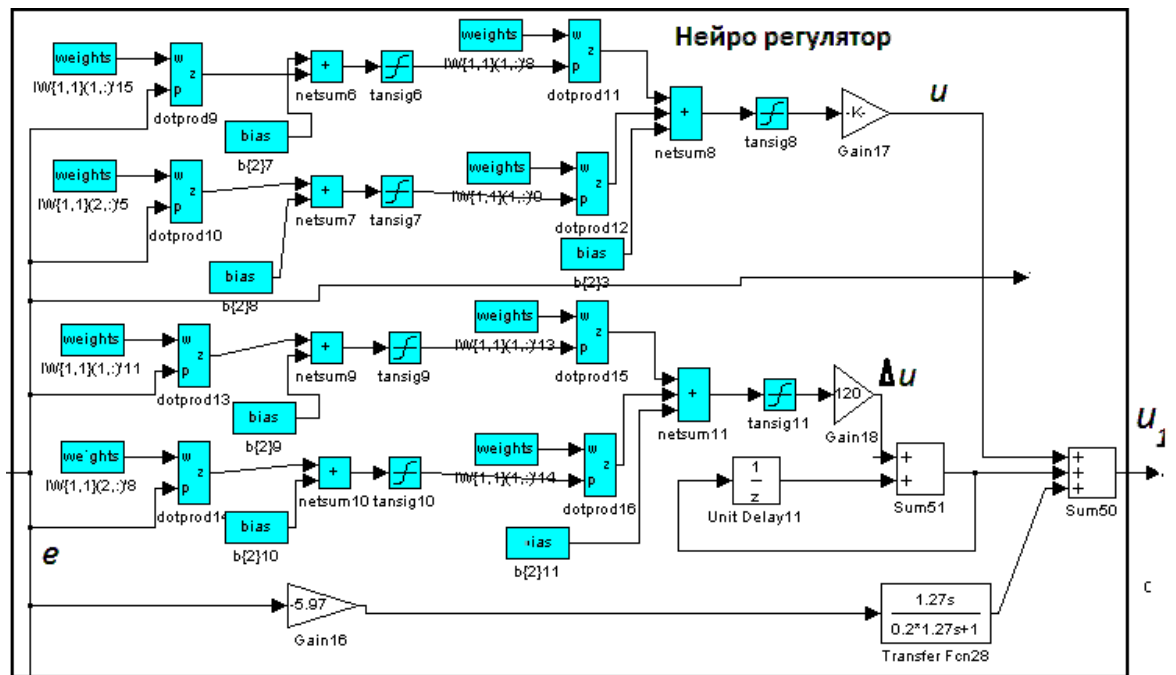


Рис. 3.26 – Схема моделювання нейронного регулятора

Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування складає 15 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПІД регулятором, і 17 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому, що збурює, значно більше в САУ з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.27. Незважаючи на це регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має 8-м ваг між нейронних з'єднань, а саме параметри які можна оптимізувати для покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.28, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

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

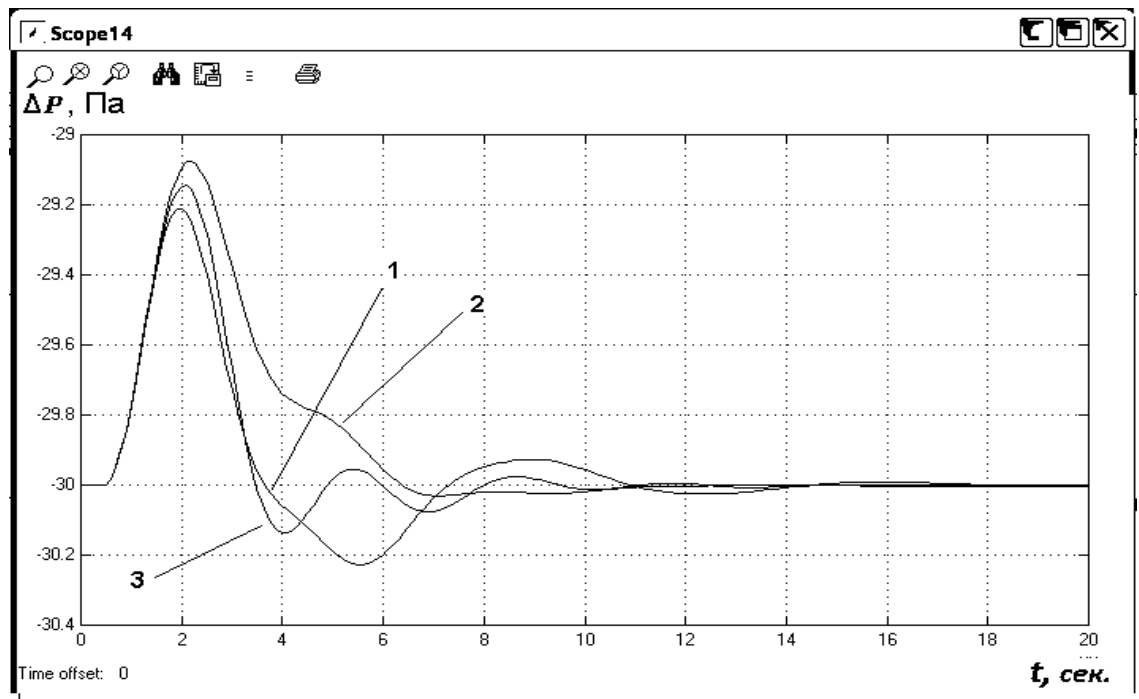


Рис. 3.27 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з традиційним ПД-регулятором; графік 3 – перехідний процес у САУ з регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж

Для покращення якості регулювання у роботі була проведена параметрична оптимізація САУ з нейронним регулятором. Оптимізувались чотири параметри настроювання нейрорегуляторів – це вагові коефіцієнти нейронних з'єднань першого-вхідного шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась при таких же умовах, які були при оптимізації САУ з традиційним ПД регулятором. Таким чином, інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний відповідно таким же, як при оптимізації САУ з традиційним ПД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була визначена модель САУ з нейрорегулятором і параметричним оптимізатором, фрагмент структурної схеми якої відображено на рисунку 3.28.

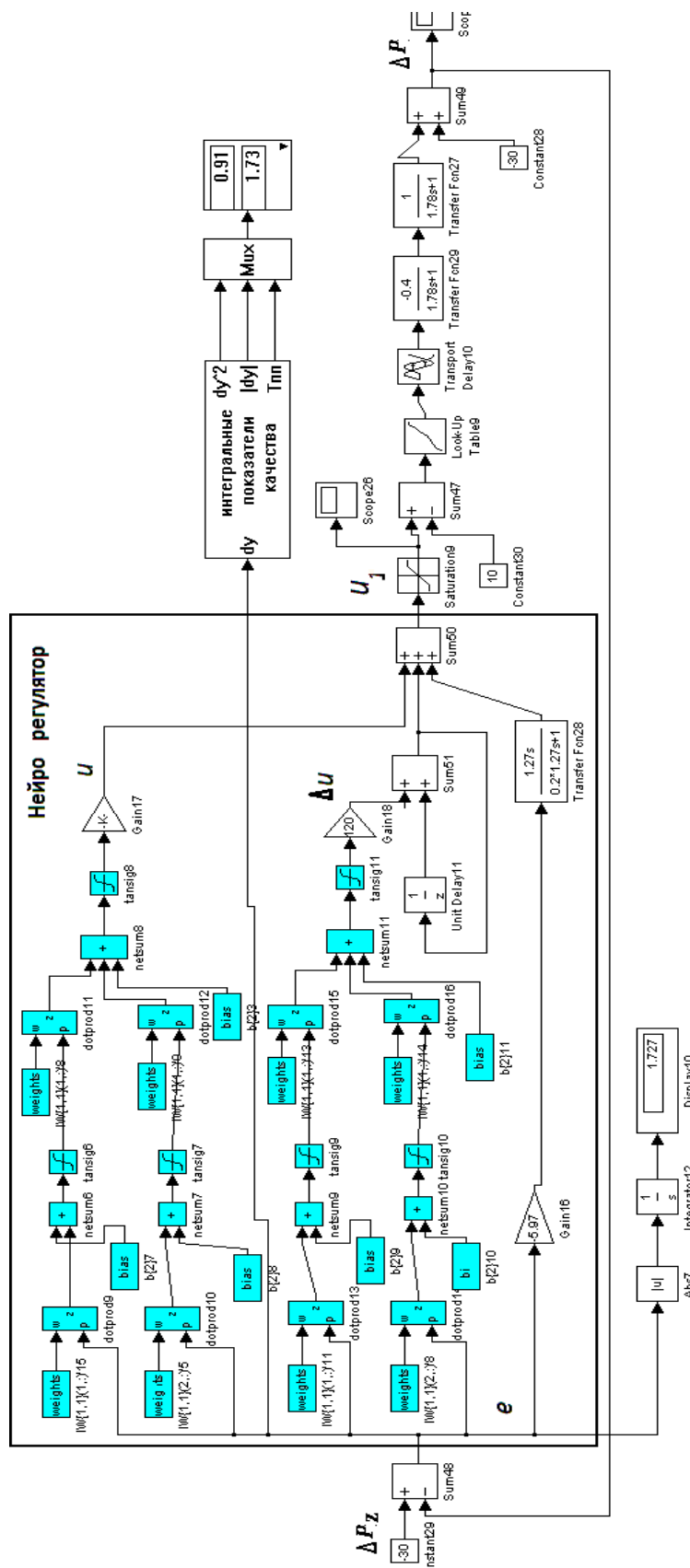
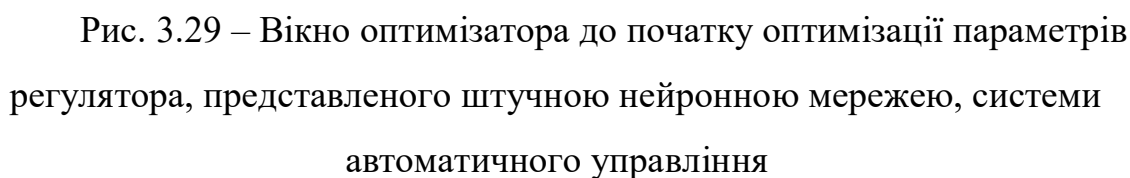


Рис. 3.28 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейронним регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи управління за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

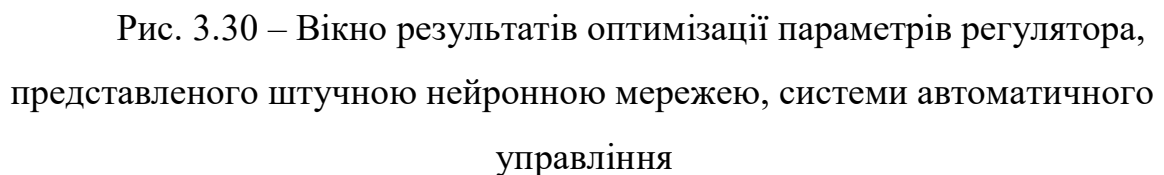
У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у

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



80

Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САУ (рисунк 3.30.1). На рисунку 3.30.2 представлений результат перевірки на грубість при відхиленні відповідних параметрів в діапазоні $\pm 15\%$.



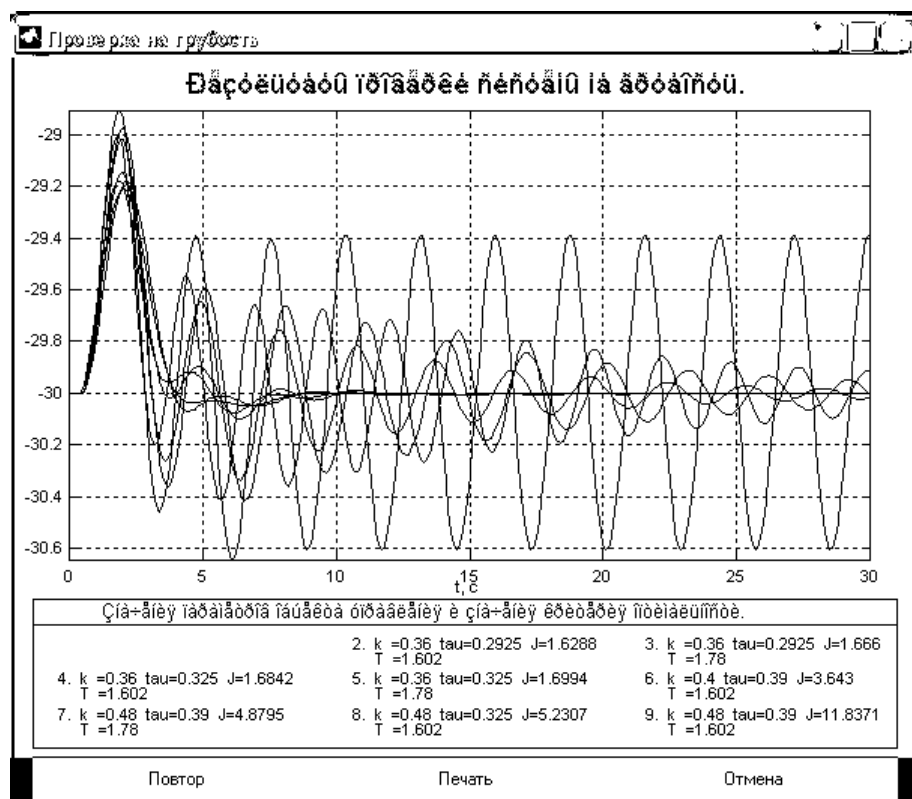


Рис. 3.30.1 – Результаты проверки САР з нейрорегулятором на грубість

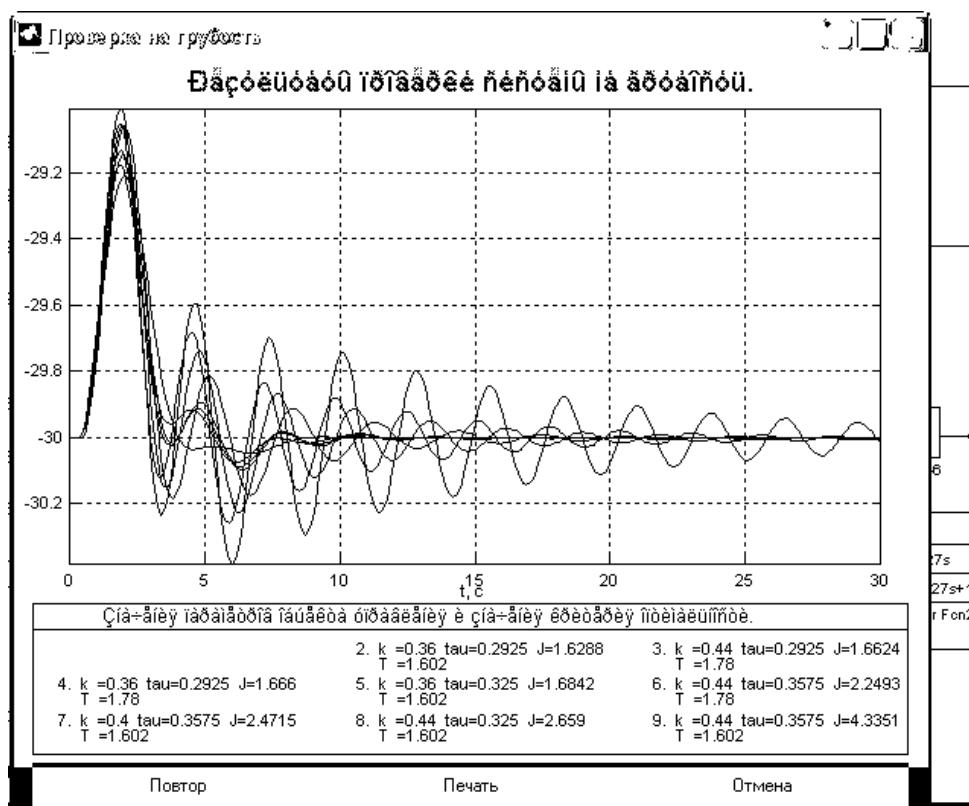


Рис. 3.30.2 – Результаты проверки САР з нейрорегулятором на грубість

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.

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

На заключному етапі розробки САУ був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САУ за виходом системи на номінальний режим функціонування, що показані на рисунку 3.27. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування значно менший при САУ з регулятором, що представлений на базі штучної нейронної мережі.

Також на основі аналізатора імовірнісних характеристик, що був вбудований у середовище MATLAB\Simulink, була визначена якість регулювання різних САУ при випадкових впливах що збурюють. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання різних САУ при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.31, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.31 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням САУ з традиційним ПД-регулятором і САУ з нейронним регулятором практично функціонують ідентично, а САУ з нечітким

регулятором незначно гірше. В кінцевому випадку показники функціонування різних САУ за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.

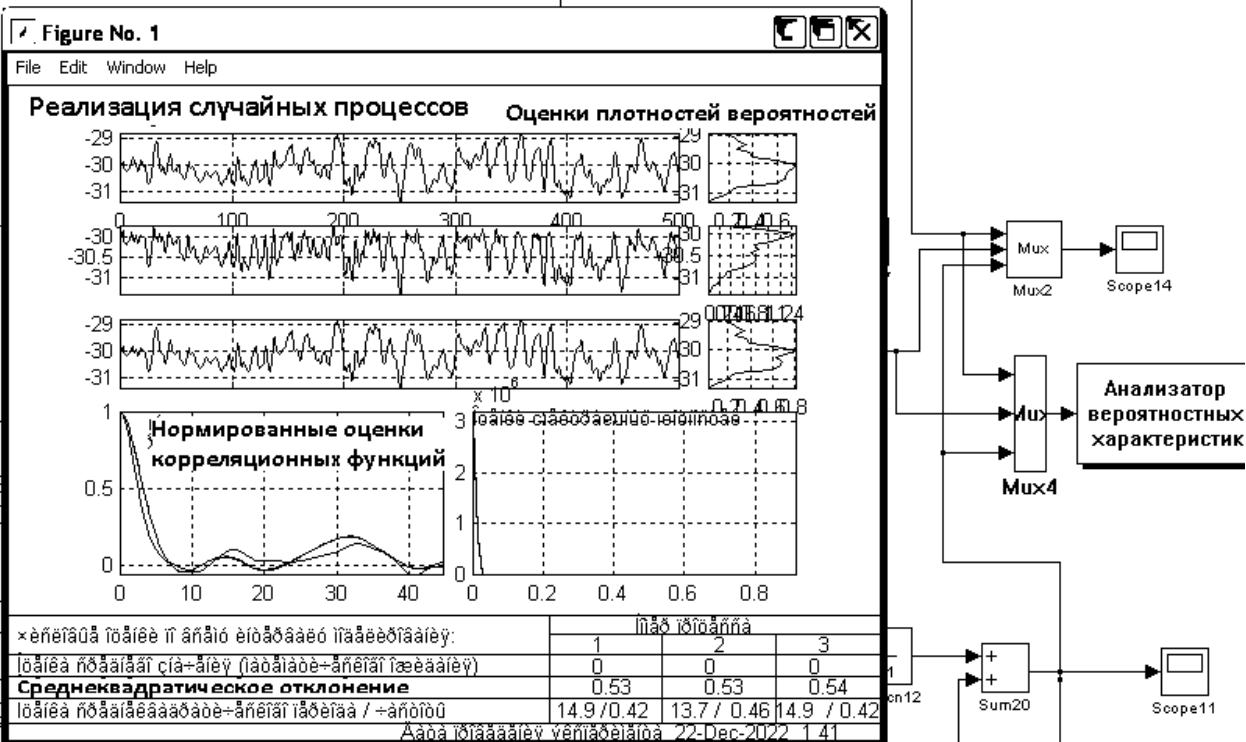


Рис. 3.31 – Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

Таблица 3.3 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПІД-регулятором	САУ з нечітким регулятором	САУ з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈12	≈7	≈10
Максимальне динамічне відхилення	≈0.85	≈0.9	≈0.8
Інтегральний показник	1,8319	2,0003	1,71
Математичне очікування	30	30	30
Середньоквадратичне відхилення	0,53	0,54	0,53

З таблиці 3.3 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САУ з нейронним регулятором незначно краще функціонує, ніж інші розглянуті САУ. САУ з традиційним ПД-регулятором і САУ з нечітким регулятором функціонують за якістю регулювання практично ідентично при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

3.7 Висновки за розділом

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

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

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 1, 71 при САУ з нейрорегулятором і 1,83 при САУ з традиційним ПД-регулятором.

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

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

РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

4.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом виробництва пари і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок

Відповідно до технологічної схеми та функцій які повинна реалізовувати система керування була складена таблиця (табл. 4.1) зі списком параметрів які повинні вводитись і виводитись з контролера.

Таблиця № 4.1 – Список параметрів що вводяться та виводяться з
контролеру

№ пп	Назва параметра	Умовне позначення	Вид сигналу A/D	Тип сигнал у I/O	Діапазон сигналу на вході/виході контролера	Позна- чення на схемі
1	Тиск пари у барабані котла	Pb	A	I	(0-20 мА)	AB1
2	Рівень котлової води	L	A	I	(0-20 мА)	AB2
3	Витрати газу	Fg	A	I	(0-20 мА)	AB3
4	Тиск у топці котла	Pr	A	I	(0-20 мА)	AB4
5	Витрати повітря	Fpov	A	I	(0-20 мА)	AB5
6	Розрідження перед димососом	dP	A	I	(0-20 мА)	AB6
7	Тиск води	Pv1	D	I	+ 24 В	ДВ1
8	Тиск газу	Pg1	D	I	+ 24 В	ДВ2
9	Сигнал з кнопки «Авар.стоп»	SB2	D	I	+ 24 В	ДВ3
10	Сигнал з датчика контролю стану приводу двигуна вентилятору М1	SS1	D	I	+ 24 В	ДВ4
11	Сигнал з датчика контролю стану приводу двигуна насосу М2	SS2	D	I	+ 24 В	ДВ5

12	Сигнал з датчика контролю стану приводу двигуна димососу М3	SS3	D	I	+ 24 В	ДВ6
13	Сигнал стану авт. вимикача двигуна М1	SS4	D	I	+ 24 В	ДВ7
14	Сигнал стану авт. вимикача двигуна М2	SS5	D	I	+ 24 В	ДВ8
15	Сигнал стану авт. вимикача двигуна М3	SS6	D	I	+ 24 В	ДВ9
16	Сигнал стану відс. клапану газу	SS7	D	I	+ 24 В	ДВ10
17	Сигнал наявності факелу у топці	SS8	D	I	+ 24 В	ДВ11
18	Керуючий вплив подачі газу	U1	A	O	(0-20мА)	ВА1
19	Керуючий вплив подачі води	U2	A	O	(0-20мА)	ВА2
20	Керуючий вплив зміна обертів вентилятору М1	U3	A	O	(0-20мА)	ВА3
21	Керуючий вплив зміна обертів димососу	U4	A	O	(0-20мА)	ВА4
22	Сигнал керування М1	U3	D	O	«відкритий колектор»	ВД1
23	Сигнал керування М2	U4	D	O	«відкритий колектор»	ВД2
24	Сигнал керування М3	U4	D	O	«відкритий колектор»	ВД3
25	Сигнал керування пристроєм розпалу	U5	D	O	«відкритий колектор»	ВД4
26	Сигнал керування відс. клапаном	U5	D	O	«відкритий колектор»	ВД5
27	Сигнал керування звуковою сигналізацією	ZS	D	O	«відкритий колектор»	ВД6

Виходячи з сформованої таблиці з переліком входів-виходів системи керування (див. табл. 4.1) та середньої складності алгоритмів керування технічну структуру системи управління розробимо на базі контролера Simatic S7-300. Для реалізації системи управління в модулях ПЗО контролера повинні бути передбачені: 6 - аналогових входів, 4 - аналогових виходи, 11 – дискретних входів і 6 дискретних виходів. Виходячи з сформованої таблиці та середньої складності алгоритмів керування, для реалізації системи керування скористаємося контролером CPU 313C-2DP з модулями ПЗО SM 331 - AI8, SM 332 - AO4.



Рис. 4.1 – CPU 313C-2DP

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

- Мікропроцесор; 100-200 нс на виконання бінарної інструкції. Робоча пам'ять об'ємом 64 Кбайт, RAM (приблизно 20 К інструкцій); для виконання завантаженої секції програми та зберігання оперативних даних.
- Гнучкі можливості розширення; підключення до 31 модуля S7-300 (4-рядна конфігурація).

- Інтерфейс MPI; дозволяє встановлювати одночасно до 8 з'єднань з програмованими контролерами S7-300/400, програматорами, комп'ютерами та панелями операторів.
- Набір вбудованих входів і виходів; 16 дискретних входів = 24В і 16 дискретних виходів = 24В/0.5А .

Таблиця. 4.2 — Технічні дані входів/виходів CPU

Центральні процесори S7-300C	CPU 312C	CPU 313C-2 PtP	CPU 313C-2 DP
<i>Вбудовані дискретні входи</i>			
Кількість вхідних каналів:			
• загальне	10	16	16
• використовуване технологічними функціями	8	12	12
Адреса входів, які встановлюються за замовчуванням	DI124.0 ... DI125.1	DI124.0 ... DI125.7	DI124.0 ... DI125.7
Кількість вхідних сигналів, які одночасно фіксуються тригерами:			
• горизонтальна установка:			
- при температурі до 40°C	10	16	16
- при температурі до 60°C	5	8	8
• вертикальна установка:			
- при температурі до 40°C	5	8	8
Гальванічне розділення: ние:			
• між каналами та внутрішньою шиною контролера	Є	Є	Є
• між каналами	Немає	Немає	Немає
Допустима різниця потенціалів між різноманітними цілями	=75В/~60В	=75В/~60В	=75В/~60В
Випробування напруги ізоляції	=500В	=500В	=500В
Струм, споживаний з ланцюга L+ при холостому ході	Нет	70мА	70мА
Індикація стану вхідних сигналів	1 зелений світлодіод на кожний канал		
Підтримка переривання			
Діагностичні функції	<ul style="list-style-type: none"> • для каналів сконфігурованих для роботи в режимі • при використанні технологічних функцій (див. опис) • не використовуються для стандартних дискретних входів • для технологічних функцій (див. опис технологіч.) 		
Вхідна напруга			
• номінальне значення	=24В	=24В	=24В
• логічної одиниці	15...30В	15...30В	15...30В
• логічного нуля	-3...+5В	-3...+5В	-3...+5В
• захист від неправильної полярності напруги	Є	Є	Є
Вхідний струм логічної одиниці	9мА	9мА	9мА
Затримка поширення вхідного сигналу при номінальній вхідній напрузі			

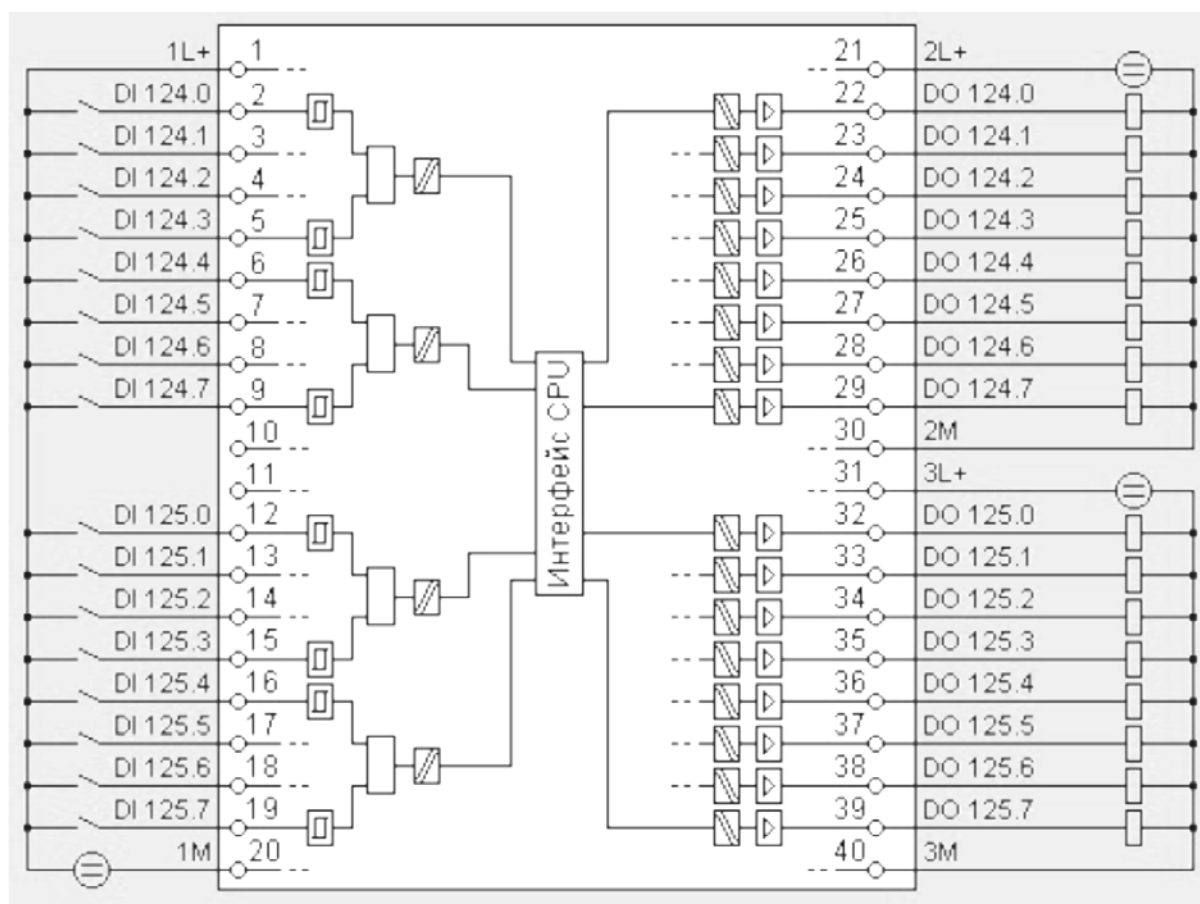


Рис. 4.2 – Схеми зовнішніх підключень CPU 313C-2DP

Рекомендації щодо підключення дискретних сигналів. У тих випадках, коли від контакторів приходять сигнали ~ 220 В змінного струму, то для їхнього перетворення в сигнали ≈ 24 В постійного струму слід використовувати інтерфейсні реле, наприклад, фірми Relpol.

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

Схеми захисту для котушок, що обтікають постійним струмом

До котушок, що обтікають постійним струмом, паралельно підключається, як зображено на наступному малюнку, діод або стабілітрон.



Рис. - Схема захисту для котушок, що обтікають постійним струмом

- ① з діодом
- ② зі стабілізатором

Схема з діодом/стабілітроном має наступні властивості:

- Можна повністю уникнути перенапруження які зв'язані з відключеннями. Стабілітрон допускає більш високу напругу, що відключається
 - Більша затримка відключення (в 6-10 раз більше, ніж без захисної схеми).
- Схема зі стабілітроном забезпечує більш швидке відключення, ніж схема з діодом.

Схема для котушок, що обтікають змінним струмом

До котушок що обтікають змінним струмом паралельно підключають як показано на наступному малюнку варистор або RC-ланцюг

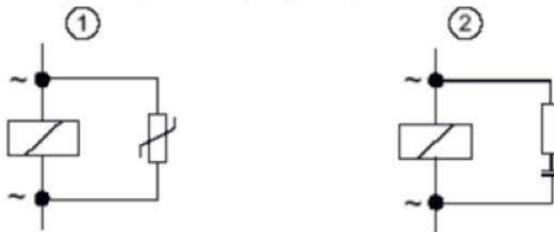


Рис. - Схема захисту для котушок що обтікають змінним струмом

- ① з варистором
- ② з RC-ланцюгом

Схема з варистором має наступні властивості:

- Амплітуда перенапруги, що виникає при відключення, що обмежує, але не демпфірується
- Крутизна перенапруги залишається тією ж самою.
- Затримка відключення незначна.

Схема з RC-ланцюгом має наступні властивості:

- Зменшується амплітуда і крутизна напруги, що виникає при відключенні.
- Затримка відключення незначна.

Рис. 4.3 – Рекомендації Siemens при підключенні дискретних виходів

Для вводу аналогових сигналів було обрано модуль вводу SM 331; AI 8 x 12 Bit (6ES7331-7KF02-0AB0).

Аналоговий модуль вводу SM 331; AI 8 x 12 Bit має наступні властивості:

- 8 входів в 4 групах каналів

- разрешение вимірюваної величини; встановлюється на групу (в залежно від встановленого часу інтегрування)
- 9 бітів + знак; - 12 бітів + знак; - 14 бітів + знак
- можливість вибору виду вимірювання на групу каналів:
- напруга, струм, опір, температура
- довільний вибір діапазону вимірювань на групу каналів
- параметризуєме діагностування, два канали з контролем кордонів
- гальванічна розв'язка щодо інтерфейсу з задньої шиною.

На рис 4.4 показані деякі приклади підключення для різних видів вимірювань.

Схема підключення та принципова схема SM 331; AI 8 x 12 Bit

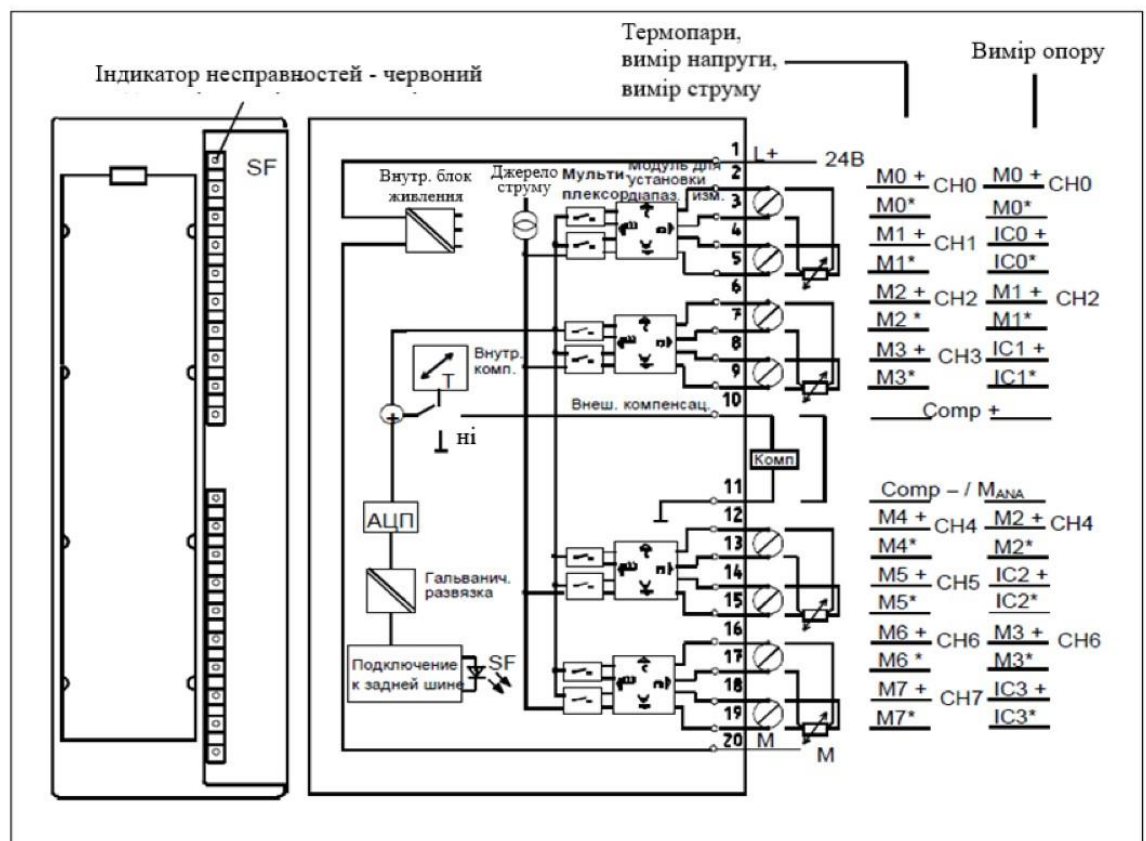


Рис. 4.4 – Схема підключення і принципова схема SM 331; AI 8

У таблицях нижче представлені технічні дані модуля та огляд параметрів, що настраюються.

Таблиця 4.3 – Технічні дані модуля аналогового введення

Технічні дані SM 331; AI 8 x 12 Bit

Розмір та вага		Формування аналогових значень				
Розміри ШxВxГ (в міліметрах)	40 x 125 x 117	інтегруючий				
Вага	ок. 250 г					
Особисті дані модуля		Принцип виміру				
Підтримка режиму тактової синхронізації	Ні	Час інтегрування/перетворення/дозволу (на канал)				
Кількість входів	8	• параметризоване	Так			
• для датчиків	4	• час інтегрування в мілісекундах	2,5	16 ^{2/3}	20	100
Довжина кабелю	макс. 200 м	• основний час перетворення, що включає час інтегрування в мілісекундах	3	17	22	102
• екранованого	макс. 50 м при 80 мВ і для термопар	додатковий час перетворення при виміру опору, в мс або додатковий час перетворення для контролю обриву провoda, в мс або додатковий час перетворення при виміру опору і контролю обриву провoda, в мс	1	1	1	1
Напруга, струми, потенціали		• роздільна здатність в бітах (вкл. область перенавантаження)	10	10	10	10
Номинальна напруга живлення електроніки L+	= 24 В	• придушення перешкод для частоти f в Гц	16	16	16	16
• захист від обраної полярності	Так	• основний час реакції модуля, в мс (всі канали розбіжності)	9	12	12s	14
Блок живлення вимірювальних перетворювачів		• згладжування вимірювальних значень	400	60	50	10
• струм живлення	макс. 60 мА (на канал)		24	136	176	816
• стійкість до короткого замикання	Так					
Струм постійної величини для датчиків опору	тип. 1_67 мА					
Гальванічна розв'язка						
• між каналами та задньою шиною	Так					
• між каналами та блоками живлення електроніки	Так					
- не для 2-проводного перетворювача						
Допустима різниця потенціалів						
• між входами та M _{ANA} (U _{CM})	2,5 В пост. тока					
- при сигналі = 0 В						
• між входами (U _{CM})	2,5 В пост. тока					
• між M _{ANA} и M _{INTERNAL} (U _{ISO})	= 75 В / ~ 60 В					
Ізоляція перевірена при	= 500 В					
Споживання струму						
• з задньої шини	макс. 50 мА					
• з джерела живлення навантаження L+	макс. 30 мА (без 2-проводного перетворювача)					
Потужність втрат модуля	тип. 1 Вт					

Таблиця 4.4 – Технічні дані модуля аналогового введення для вибору датчиків та виконавчих пристроїв

Придушення перешкод, границя помилок			Повторюваність (в режимі, що встановився 25 °С відносно вхідного діапазону) Температурна помилка внутрішньої компенсації		
Придушення перешкод, $F = n$ ($f1 \pm 1 \%$), ($f1$ = частота перешкод)			$\pm 0,05 \%$		
• синфазна перешкода ($U_{cm} < 2,5$ В)	> 70 дБ		$\pm 1 \%$		
• протифазна перешкода (пікове значення перешкоди < номінального значення вхідного діапазону)	> 40 дБ		Стан, переривання, діагностика		
Перехрестна перешкода між входами	> 50 дБ		Переривання		
Границя експлуатаційної помилки (у всьому температурному діапазоні, відносно вхідного діапазону)			• апаратне переривання при порушенні граничного значення	Параметризоване канали 0 та 2	
• потенціальний вхід	80 мВ	$\pm 1 \%$	• діагностичне переривання	параметризоване	
	от 250 до 1000 мВ	$\pm 0,6 \%$	Діагностичні функції	параметризоване червоний світлодіод (SF)	
	от 2,5 до 10 В	$\pm 0,8 \%$	• індикатор групової помилки зчитування діагностичної інформації	можливо	
• струмовий вхід	от 3,2 до 20 мА	$\pm 0,7 \%$	Данні для вибору датчика		
• опір	150 Ом; 300 Ом; 600 Ом	$\pm 0,7 \%$	Вхідний діапазон (номінальне значення)/ вхідний опір		
• термопари	Тип E, N, J, K, L	$\pm 1,1 \%$	• напруга	± 80 мВ	/10 МОм
• термометри опору	Pt 100/Ni 100	$\pm 0,7 \%$		± 250 мВ	/10 МОм
	Pt 100 climate	$\pm 0,8 \%$		± 500 мВ	/10 МОм
Основна помилка (гранична експлуатаційна помилка при 25 °С відносно вхідного діапазону)				± 1000 мВ	/10 МОм
• потенціальний вхід	80 мВ	$\pm 0,7 \%$		$\pm 2,5$ В	/100 кОм
	от 250 до 1000 мВ	$\pm 0,4 \%$		± 5 В	/100 кОм
	от 2,5 до 10 В	$\pm 0,6 \%$		от 1 до 5 В;	/100 кОм
• струмовий вхід	от 3,2 до 20 мА	$\pm 0,5 \%$		± 10 В	/100 кОм
• опір	150 Ом; 300 Ом; 600 Ом	$\pm 0,5 \%$	• струм	$\pm 3,2$ мА	/25 Ом
• термопари	Тип E, N, J, K, L	$\pm 0,7 \%$		± 10 мА	/25 Ом
• термометри опору	Pt 100/Ni 100	$\pm 0,5 \%$		± 20 мА	/25 Ом
	Pt 100 climate	$\pm 0,6 \%$		от 0 до 20 мА;	/25 Ом
Температурна помилка (відносно вхідного діапазону)				от 4 до 20 мА;	/25 Ом
Помилка лінеаризації (відносно вхідного діапазону)	$\pm 0,005 \%/K$		• опір	150 Ом	/10 МОм
	$\pm 0,05 \%$			300 Ом	/10 МОм
				600 Ом	/10 МОм
			• термопари	Тип E, N, J, K, L	/10 МОм
			• термометри опору	Pt 100, Ni 100	/10 МОм
			Максимальна вхідна напруга для потенційного входу (руйнівна межа)	макс. 20 В тривалість; 75 В протягом макс. 1 с (коефіцієнт заповнення 1:20)	
			Максимальний вхідний струм для струмового входу (руйнівна межа)	40 мА	

Для виводу аналогових сигналів було обрано модуль виводу SM 332; АО 4 x 12 Bit (6ES7332-5HD01-0AB0).

Аналоговий модуль виведення SM 332; АО 4 x 12 Bit має наступні властивості:

- 4 вихідних каналу
- окремі вихідні канали можуть бути параметризовані як: потенційні виходи та струмові виходи.
- Роздільна здатність 12 Bit
- параметрізуєма діагностика
- параметрізуєма діагностичне переривання
- гальванічна розв'язка щодо інтерфейсу з задній шиною і напруги на навантаженні.

На рис 4.5 наведена схема підключення модуля аналогового виведення, а у таблицях 4.5 і 4.6 його технічні характеристики.

Схема підключення та принципова схема SM 332; АО 4 x 12 Bit

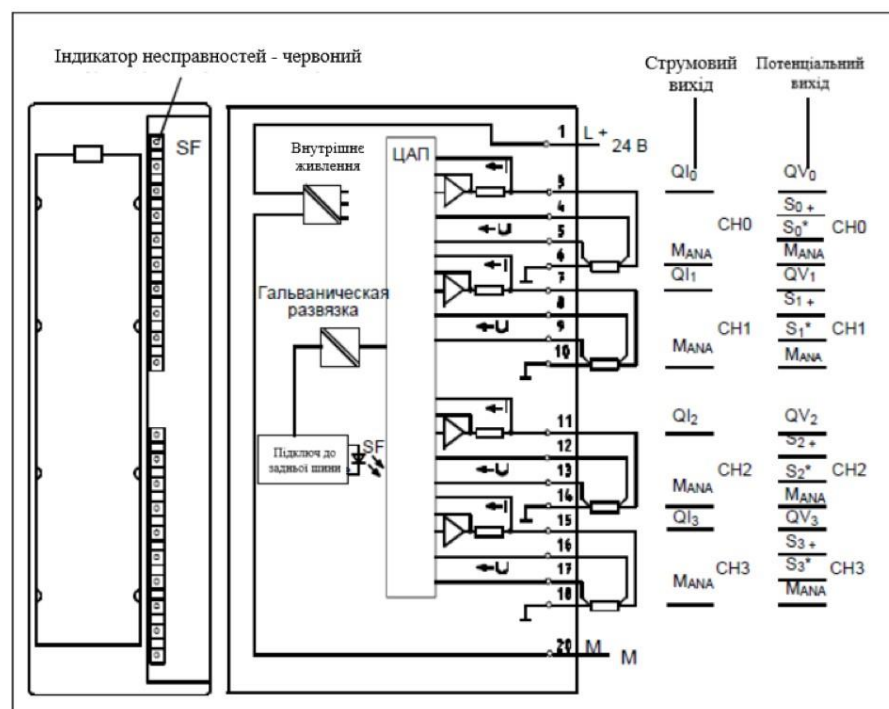


Рис. 4.5 – Зовнішній вигляд і принципова схема аналогового модуля виводу SM 332; АО 4 x 12 Bit.

Таблиця 4.5 – Технічні дані модуля аналогового виведення

Технічні дані: SM 332; АО 4 x 12 Bit

Розмір та вага		Формування аналогових значень	
Розміри ШхВхГ (в міліметрах)	40 x 125 x 117	Роздільна здатність, включаючи знак	
Вага	ок. 220 г	• ± 10 В; ± 20 мА; от 4 до 20 мА; от 1 до 5 В	11 битів + знак
Особисті дані модуля		• от 0 до 10 В; от 0 до 20 мА	12 битів
Підтримка режиму тактової синхронізації	й Ні	Час перетворення (на канал)	макс. 0,8 мс
Кількість входів	4	Час становлення	
Довжина кабелю		• для омического навант.	0,2 мс
• екранованого	макс. 200 м	• для ємностного навант.	3,3 мс
Напруга, струми, потенціали		• для індуктивного навант.	0,5 мс (1 мГн) 3,3 мс (10 мГн)
Номинальна напруга на навантаженні L+	= 24 В	Придушення перешкод, меж помилок	
• захист від обраної полярності	Так	Перекрестна перешкода між виходами	> 40 дБ
Гальванічна розв'язка		Границя експлуатаційної помилки (у всьому діапазоні температур, відносно вихідного діапазону)	
• між каналами та задньою шиною	Так	• потенціальні виходи	$\pm 0,5$ %
• між каналами та блоками живлення електроніки	Так	• струмові виходи	$\pm 0,6$ %
• між каналами	Ні	Основна помилка (гранична експлуатаційна помилка при 25° С відносно вихідного діапазону)	
• між каналами та напругою на навантаженні L+	Так	• потенціальні виходи	$\pm 0,4$ %
Допустима різниця потенціалів		• струмові виходи	$\pm 0,5$ %
• между S- и M _{ANA} (U _{CM})	= 3 В	Температурна помилка (відносно вихідного діапазону)	$\pm 0,002$ %/К
• между M _{ANA} и M _{теплоты} (U _{DO})	= 75 В / ~ 60 В	Помилка ліанерізації (відносно вихідного діапазону)	$\pm 0,05$ %
Ізоляція перевірена при Споживання струму	= 500 В	Повторюваність (у встановленому режимі 25° С, відносно вихідного діапазону)	$\pm 0,05$ %
• з задньої шини	макс. 60 мА	Пульсації на виході: діапазон від 0 до 50 кГц (відносно вихідного діапазону)	$\pm 0,05$ %
• з джерела живлення навантаження L+(без навант.)	макс. 240 мА	Стан, переривання, діагностика	
Потужність втрат модуля	тип. 3 Вт	Переривання	
		• діагностичне: переривання	параметризоване
		Діагностичні функції	параметризоване
		• індикатор групової помилки	червоний світлодіод (SF)
		• зчитування діагностичної інформації	можливо
		Можливість примінення замінюючого значення	Так, параметризоване

Аналоговий модуль виведення SM 332; АО 4 x 12 Bit виконує контроль обриву проводу тільки для струмових виходів. Аналоговий модуль виведення SM 332; АО 4 x 12 Bit виконує перевірку на коротке замикання тільки для потенційних виходів.

Таблиця 4.6 – Технічні дані модуля аналогового введення для вибору датчиків та виконавчих пристроїв

Данні для вибору виконавчого пристрою			
Вихідні діапазони (номінальне значення)		Струмний вихід	
• напруга	± 10 В от 0 до 10 В от 1 до 5 В	• напруга холостого ходу	макс. 18 В
• струм	± 20 мА от 0 до 20 мА от 4 до 20 мА	Границя руйнування, що прикладаються ззовні напруг/струмів	
Повний опір (в номінальному вихідному діапазоні)		• напруга на виходах відносно M_{ANA}	макс. 18 В тривалого 75 В в течение макс. 1 с (коefficient заповнення 1:20)
• для потенційних виходів	мін. 1 кОм	• струм	макс. 50 мА пост. струм
- ємностне навантаження	макс. 1 мкФ	Підключення виконавчих пристроїв	
• для струмових виходів	макс. 500 Ом	• для потенційного виходу	можливо
- при $U_{CM} < 1 В$	макс. 600 Ом	- 4-провідне підключення	(вимірювальний ланцюг)
- індуктивне навант-ня	макс. 10 мГн	- 2-провідне підключення	
Потенційний вихід			
• захист від короткого замикання	Да		
• струм короткого замикання	макс. 25 мА		

Загальний вигляд розробленої схеми технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом виробництва пари наведено на рис. 4.6.

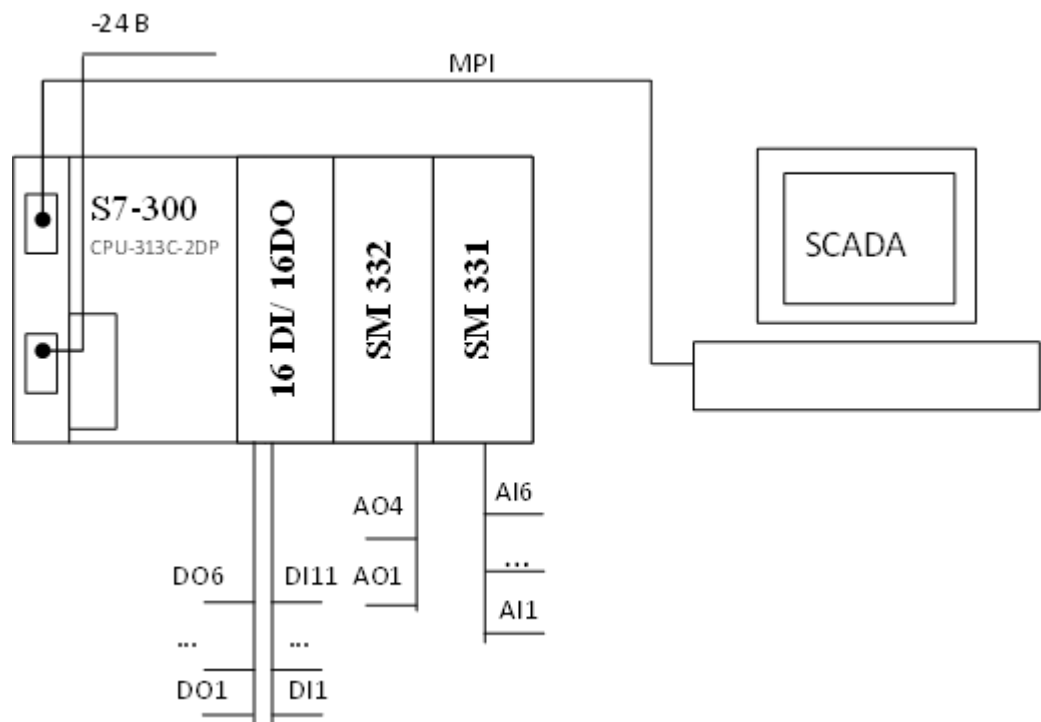


Рис. 4.6 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи управління процесом виробництва пари

У середовищі Simatic Manager Step7 створюємо проект і додаємо до його складу станцію контролера S7-300. У програмі «Hardware» проводимо конфігурування обраного контролера і модулів вводу аналогових сигналів SM 331 та виведення аналогових сигналів SM 332. Загальний вид вікна програми «Hardware» з обраним контролером і модулями ПЗО наведено на рисунку 4.7. При конфігуруванні модулі обираються з каталогу елементів, що входить в програму «Hardware».

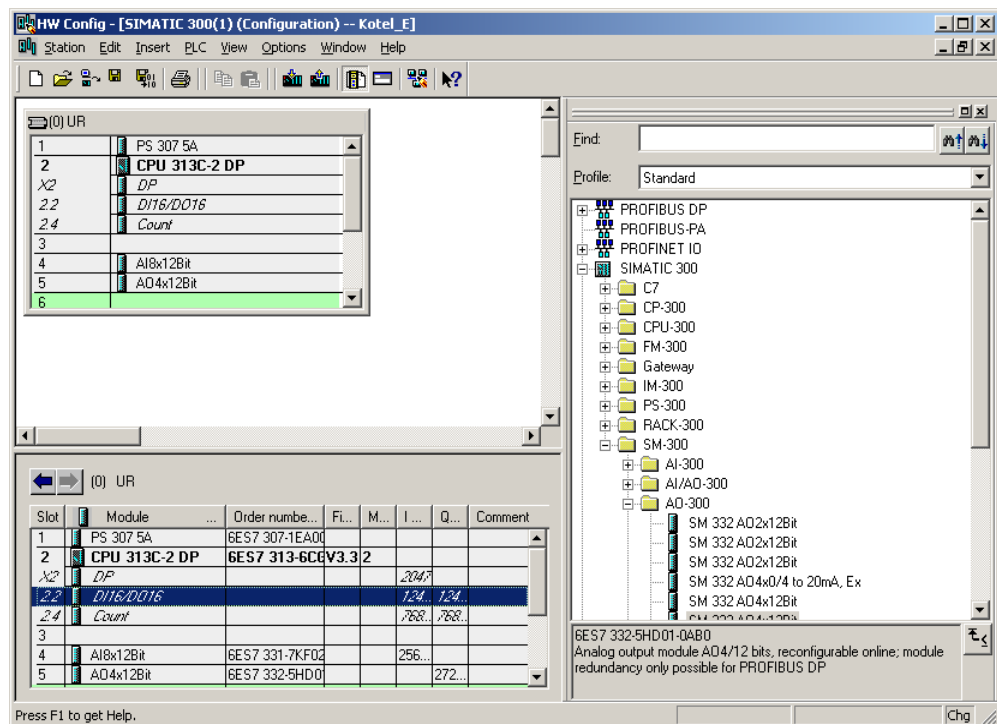


Рис. 4.7 – Загальний вид вікна програми «Hardware»

В розділах 2 і 3 даної роботи існуюча система керування була доповнена алгоритмами підвищення динамічної точності контуру регулювання розрядження у топці котла. Інтегровані алгоритми не потребує істотного збільшення обчислюваних ресурсів. Введення поточного значення витрат газу через аналоговий вхід вже передбачено у контролері. Тому технічну структуру системи керування змінювати не потрібно і можна залишити в існуючому виді.

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

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені у середовищі Simulink системи Matlab алгоритми керування може реалізовуватись безпосередньо у середовищі Simatic Step 7 з використанням стандартних мов програмування контролерів. Наприклад мовами STL і SCL. Для цього потрібно розроблені у системі Matlab алгоритми керування перевести у цифрову форму, отримати різницеві рівняння та привести до виду придатного для програмування, а потім написати відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загалі такий підхід потребує багато часу і та знання принципів та особливостей реалізації цифрових алгоритмів. Альтернативою цьому є варіант конвертації отриманих алгоритмів з середовища Simulink системи Matlab у потрібну середу програмування контролерів. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.

Для програмної реалізації розроблених алгоритмів будемо використовувати пакет Simulink PLC Coder з його бібліотекою функціональних блоків PLCLib. Для цього з використанням блоків бібліотеки PLCLib проведемо цифрову реалізацію алгоритмів керування у моделі Simulink. Отримана модель з алгоритмами підготовленими до конвертації наведена на рис. 4.8.

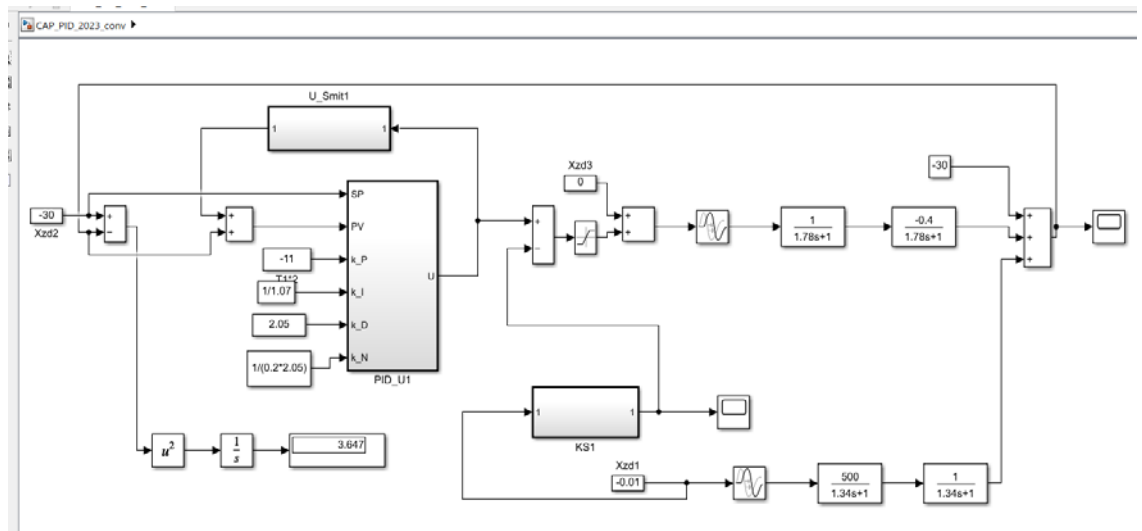


Рис. 4.8 – Схема моделювання САК процесом виробництва пари з цифровими алгоритмами керування, які підготовлені до конвертації

На рис. 4.9 – 4.11 наведені схеми моделювання ПД регулятора та ланок коригуючих зв'язків.

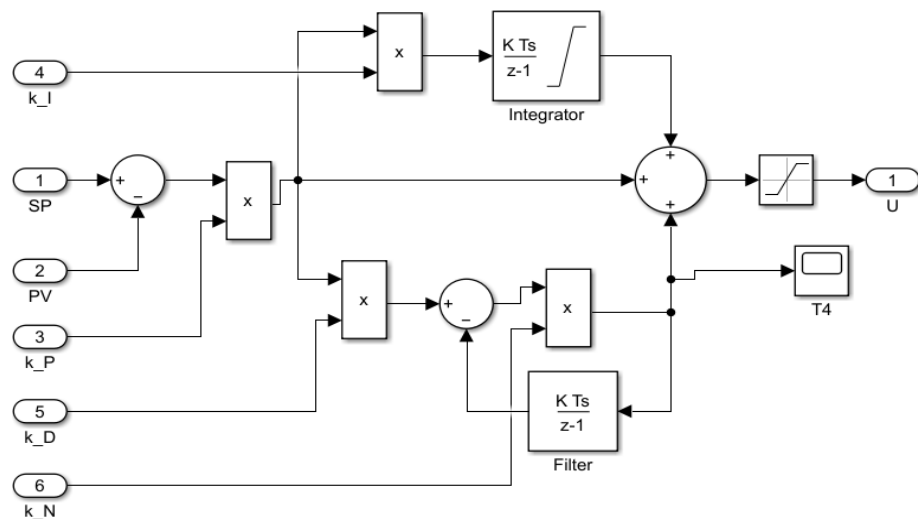


Рис. 4.9 – Схема цифрового ПД-регулятора

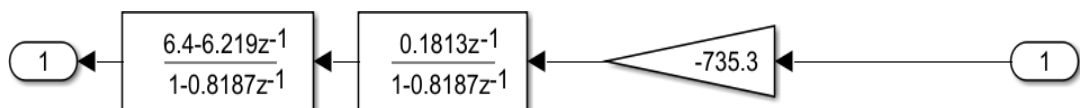


Рис. 4.10 – Схема моделювання цифрового варіанту коригуючого зв'язку (блок «KS»)

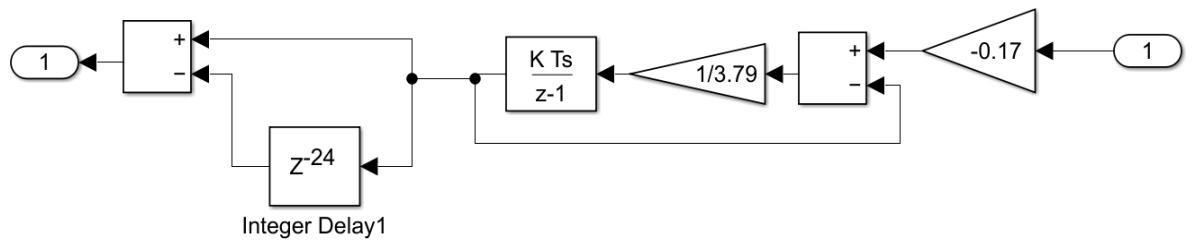


Рис. 4.11 – Схема моделювання цифрового варіанту коригуючого зв'язку (блок «U_Smit»)

Відповідність цифрового варіанту коригуючого зв'язку його неперервному аналогу підтверджена результатами моделювання. На рис. 4.12 – 4.15 наведена відповідна схема моделювання та отримані результати.

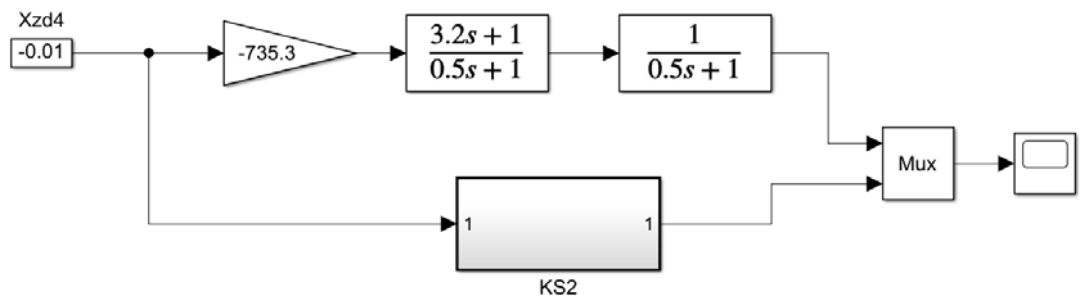


Рис. 4.12 – Схема моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

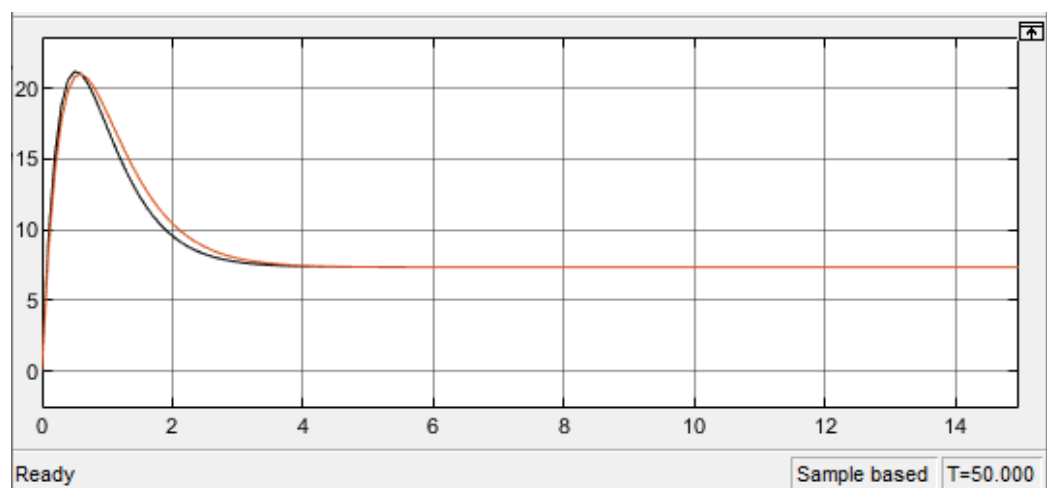


Рис. 4.13 – Результати моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

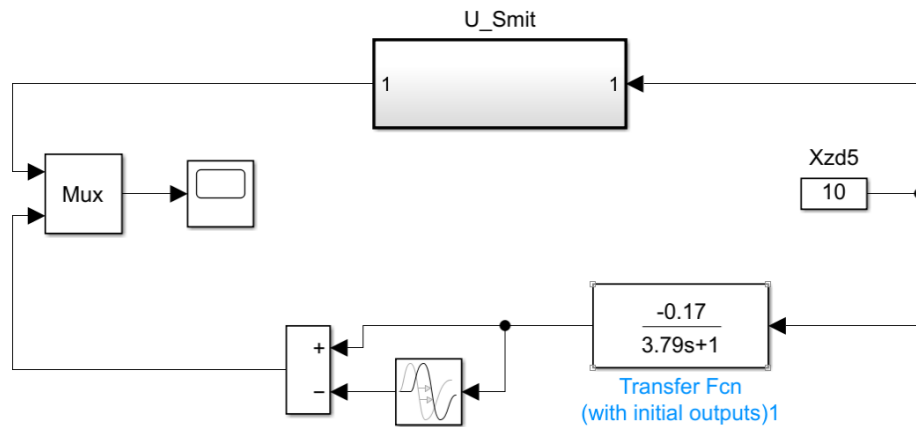


Рис. 4.14 – Схема моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

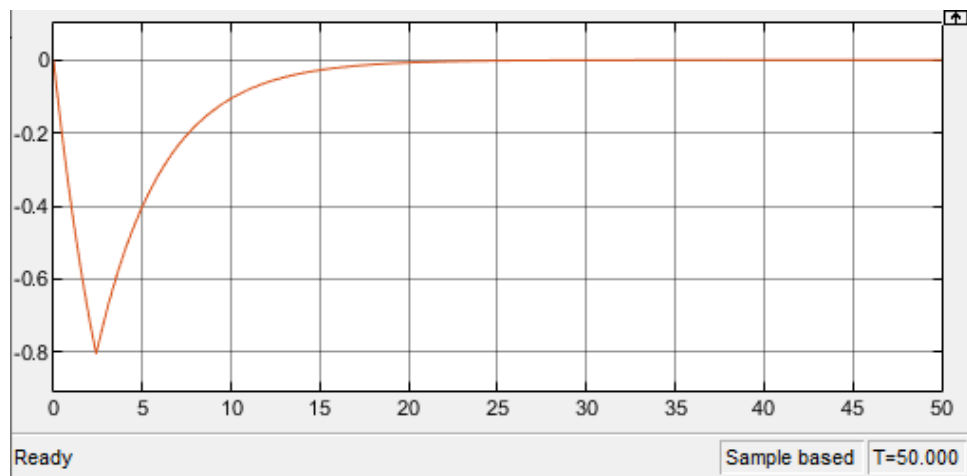


Рис. 4.15 – Результати моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

Результати моделювання системи керування при використанні цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис.4.16.

ΔP , Па

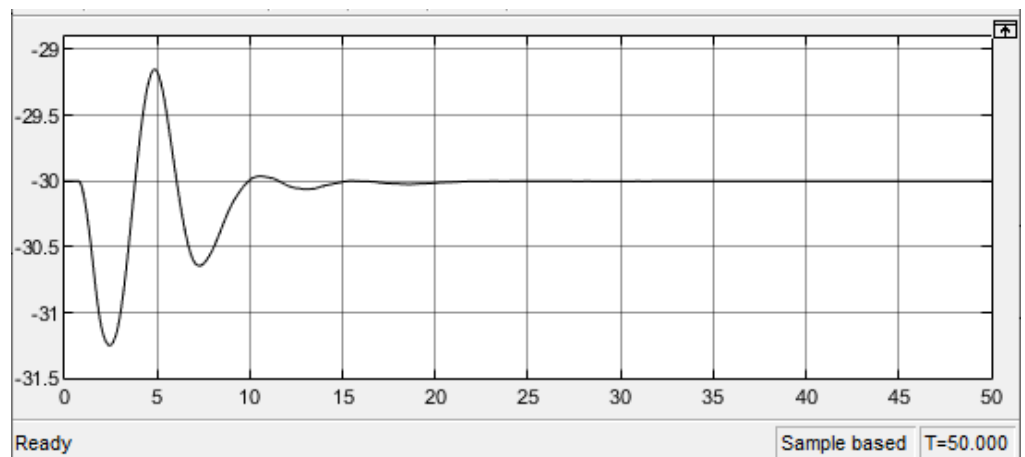


Рис. 4.16 – Динаміка зміни розрядження у топці котла

Процедура отримання Z-передатної функції на прикладі ланки коригуючого зв'язку наведена на рис. 4.17. Для отримання Z-передатної функції використовуються спеціальні вбудовані функції системи MatLab що призначені для роботи з передатними функціями у неперервному та дискретному часі.

Для перетворення неперервної форми передатної функції у дискретну форму (Z-передаточну функцію) використовуємо метод «Zero-order hold on the inputs».


```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

>> sys = tf([3.2 1],[0.5 1])

sys =

    3.2 s + 1
    -----
    0.5 s + 1

Continuous-time transfer function.

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

sysd =

    6.4 z - 6.219
    -----
    z - 0.8187

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

>> sys = tf([1],[0.5 1])

sys =

    1
    -----
    0.5 s + 1

Continuous-time transfer function.

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

sysd =

    0.1813
    -----
    z - 0.8187

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

fx >> |
```

Рис. 4.17 – Отримання Z-передатної функції ланки коригуючого зв'язку (блок «KS»)

Для кожної підсистеми яка буде конвертуватися у мову SCL середовища Step 7 проведемо налаштування рис 4.18.

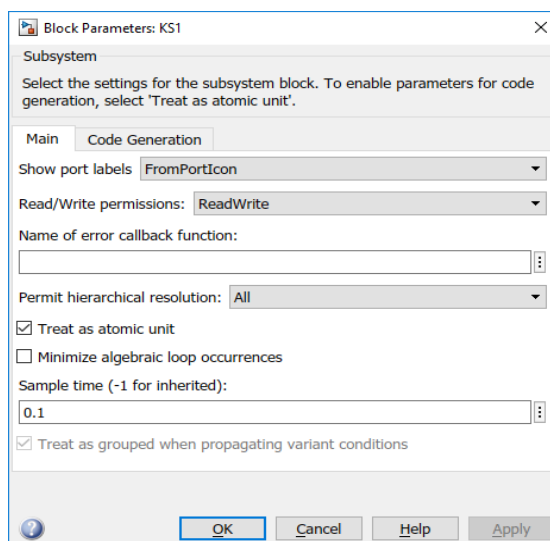


Рис. 4.18 – Вікно налаштування підсистем для їх конвертації

Пакет Simulink PLC Coder налаштуємо для компіляції коду для середовища Siemens SIMATIC Step7 5.4 (рис. 4.19).

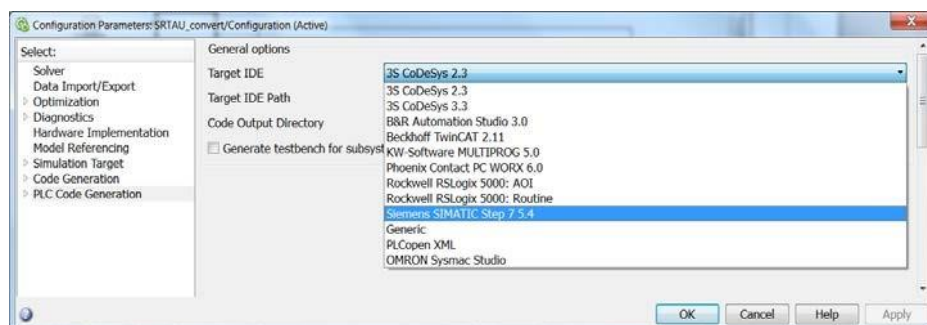


Рис. 4.19 – Вікно налаштування пакету Simulink PLC Coder

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для блоку ПД регулятора та блоків коригуючих зв'язків. На рис. 4.20 та 4.21 наведена процедура генерації коду для коригуючого зв'язку.

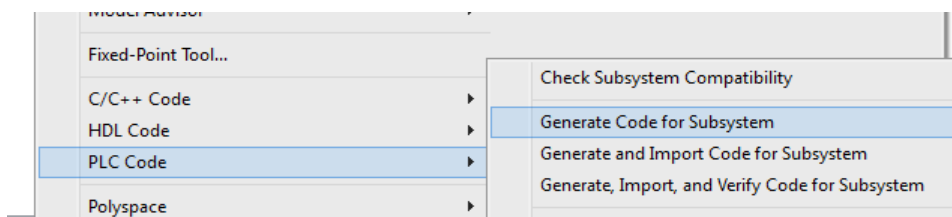


Рис 4.20 – Компіляція коду

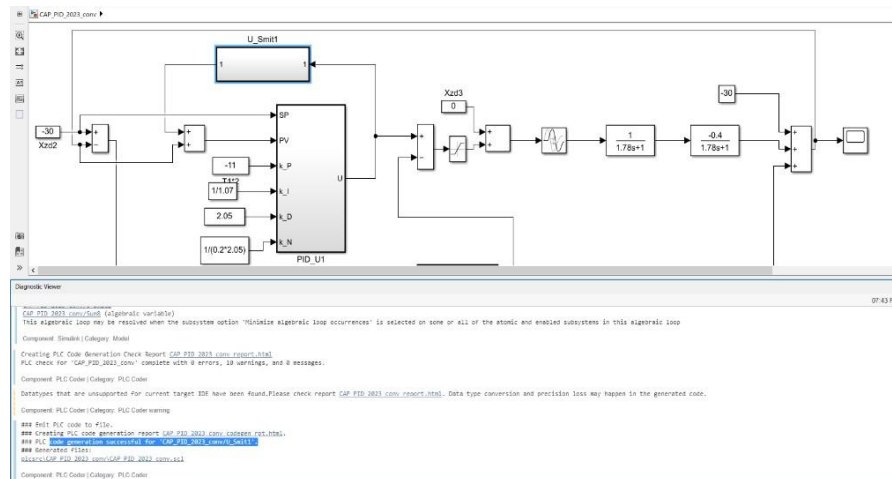


Рис. 4.21 – Результати успішної генерації коду коригуючого зв'язку для середовища SIMATIC Step7 5.4

На рис. 4.22 наведено вихідний генерований код мовою SCL для блоку коригуючого зв'язку «U_Smit». Повний список вихідних кодів конвертованих блоків наведено у додатку А.

```

Editor - D:\M2023\Мальчи\Пазден NPS\plcsrc\CAP_PID_2023_conv\CAP_PID_2023_conv.scl

EDITOR VIEW
New Open Save Print Compare Go To Find Refactor Analyze Profiler Section Break Run and Advance Run Step Stop
FILE NAVIGATE CODE ANALYZE SECTION RUN

CAP_PID_2023_conv.scl
22 FUNCTION_BLOCK U_Smit1
23 VAR_INPUT
24   ssMethodType: INT;
25   In1: REAL;
26 END_VAR
27 VAR_OUTPUT
28   Out1: REAL;
29 END_VAR
30 VAR
31   c_DiscreteTimeIntegr: REAL;
32   IntegerDelay1_DSTATE: ARRAY [0..23] OF REAL;
33   c_rtb_DiscreteTimeIn: REAL;
34   b_i: DINT;
35 END_VAR
36 CASE ssMethodType OF
37   0:
38     (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/U_Smit1' *)
39     (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator' *)
40     c_DiscreteTimeIntegr := 0.0;
41     (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/U_Smit1' *)
42     (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/U_Smit1' *)
43     (* InitializeConditions for Delay: '<S1>/Integer Delay1' *)
44     FOR b_i := 0 TO 23 DO
45       IntegerDelay1_DSTATE[b_i] := 0.0;
46     END_FOR;
47     (* End of InitializeConditions for Delay: '<S1>/Integer Delay1' *)
48     (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/U_Smit1' *)
49   1:
50     (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/U_Smit1' *)
51     (* DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator' *)
52     c_rtb_DiscreteTimeIn := c_DiscreteTimeIntegr;
53     (* Output: '<Root>/Out1' incorporates:
54      * Delay: '<S1>/Integer Delay1'
55      * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator'
56      * Sum: '<S1>/Sum7' *)
57     Out1 := c_DiscreteTimeIntegr - IntegerDelay1_DSTATE[0];
58     (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator' incorporates:
59      * Gain: '<S1>/Gain1'
60      * Gain: '<S1>/Gain5'
61      * Sum: '<S1>/Sum1' *)
62     c_DiscreteTimeIntegr := ((((-0.17 * In1) - c_DiscreteTimeIntegr) * 0.26385224274406333) * 0.1) + c_DiscreteTimeIntegr;
63     (* Update for Delay: '<S1>/Integer Delay1' *)
64     FOR b_i := 0 TO 22 DO
65       IntegerDelay1_DSTATE[b_i] := IntegerDelay1_DSTATE[b_i + 1];

```

Рис. 4.22 – Вихідний генерований код мовою SCL блоку коригуючого зв'язку «U_Smit» для середовища програмування Step7

Після генерації коду в середовищі MATLAB додаємо файли до проекту який створено у середовищі Step 7. Процес інтеграції програмних модулів у проект Step 7 наведено на рис. 4.23, а на рис 4.24 приклад імпортованого генерованого коду.

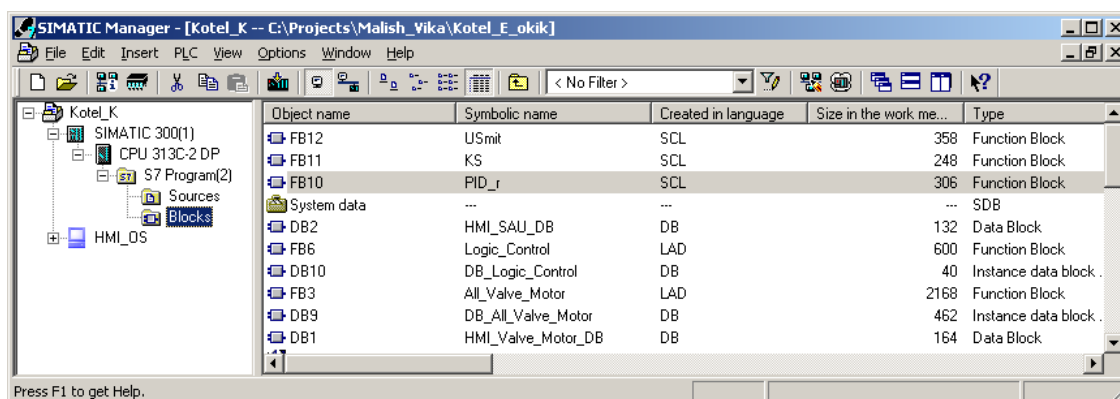
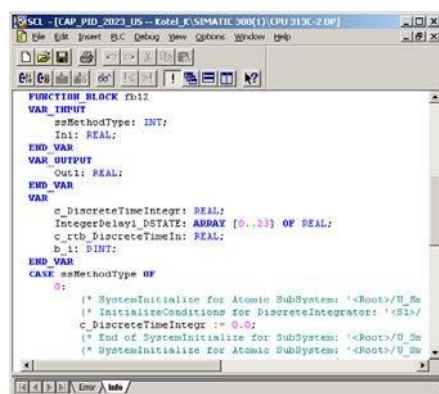
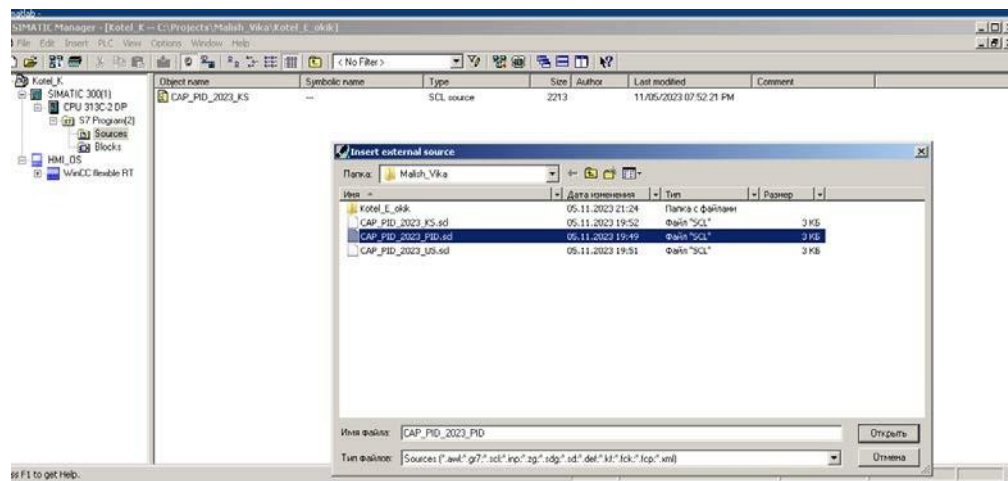


Рис. 4.23 – Процедура імпорту генерованого коду в середовище програмування Step 7 і створення відповідних функціональних блоків

```

FUNCTION_BLOCK FB772
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    SP: REAL;
    PV: REAL;
    k_P: REAL;
    k_I: REAL;
    k_D: REAL;
    k_N: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    U: REAL;
    dPV: REAL;
END_VAR
VAR
    Integrator_DSTATE: REAL;
    Filter_DSTATE: REAL;
    rtb_Add: REAL;
    rtb_Add2: REAL;
    rtb_Product: REAL;
    rtb_Product3: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    0:
        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        Integrator_DSTATE := 0.0;

        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
        Filter_DSTATE := 0.0;
    1:
        (* DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        IF Integrator_DSTATE >= 100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := 100.0;
        ELSIF Integrator_DSTATE <= -100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := -100.0;
        END IF;

        rtb_Add2 := SP - PV;
        (* Product: '<S1>/Product' incorporates:
        *   Input: '<Root>/k_P' *)
        rtb_Product := rtb_Add2 * k_P;
        (* Product: '<S1>/Product3' incorporates:
        *   DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter'
        *   Input: '<Root>/k_D'
        *   Input: '<Root>/k_N'
        *   Product: '<S1>/Product1'
        *   Sum: '<S1>/Add1' *)
        rtb_Product3 := ((rtb_Product * k_D) - Filter_DSTATE) * k_N;
        (* Sum: '<S1>/Add' incorporates:
        *   DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)
        rtb_Add := (Integrator_DSTATE + rtb_Product) + rtb_Product3;
        (* Saturate: '<S1>/Saturation' *)
        IF rtb_Add >= 100.0 THEN
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := 100.0;
        ELSIF rtb_Add > -100.0 THEN
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := rtb_Add;
        ELSE
            (* Output: '<Root>/U' *)
            U := -100.0;
        END IF;
        (* End of Saturate: '<S1>/Saturation' *)
        (* Output: '<Root>/dPV' *)
        dPV := rtb_Add2;
        (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' incorporates:
        *   Update for Input: '<Root>/k_I'
        *   Product: '<S1>/Product2' *)
        Integrator_DSTATE := ((rtb_Product * k_I) * 0.1) + Integrator_DSTATE;
        IF Integrator_DSTATE >= 100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := 100.0;
        ELSIF Integrator_DSTATE <= -100.0 THEN
            Integrator_DSTATE := -100.0;
        END IF;
        (* End of Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Integrator' *)

        (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Filter' *)
        Filter_DSTATE := (0.1 * rtb_Product3) + Filter_DSTATE;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Рис. 4.24 – Приклад імпортованого генерованого коду ПД-регулятору
в середовищі Step 7

Загальний вигляд розробленого проекту в середовищі Step 7 наведено на рис.4.25.

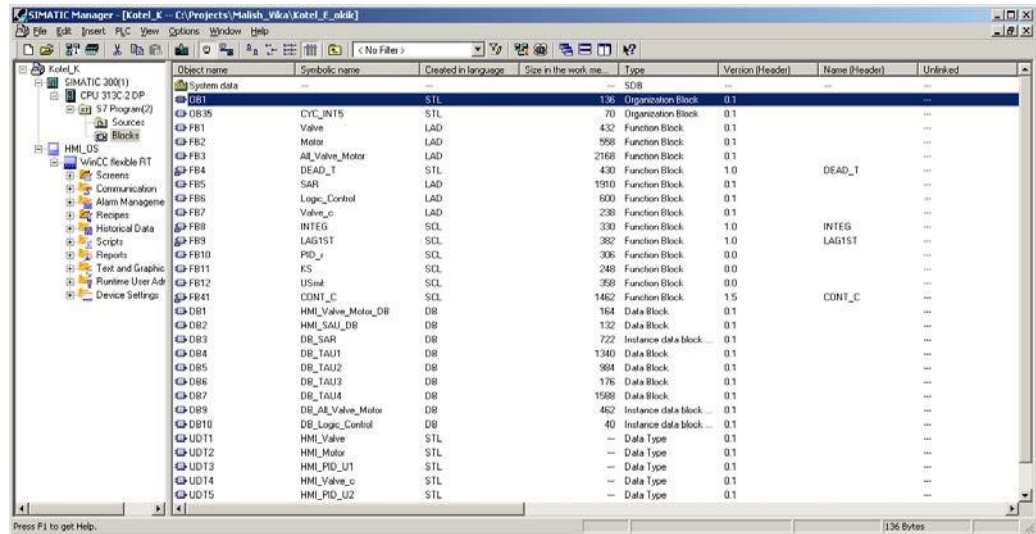


Рис. 4.25 – Загальний вид вікна проекту в середовищі Step 7

Алгоритми регулювання тиску у топці котла та коригуючі алгоритми реалізовані у функціональному блоці FB5. Фрагмент коду програми наведено на рис. 4.26.

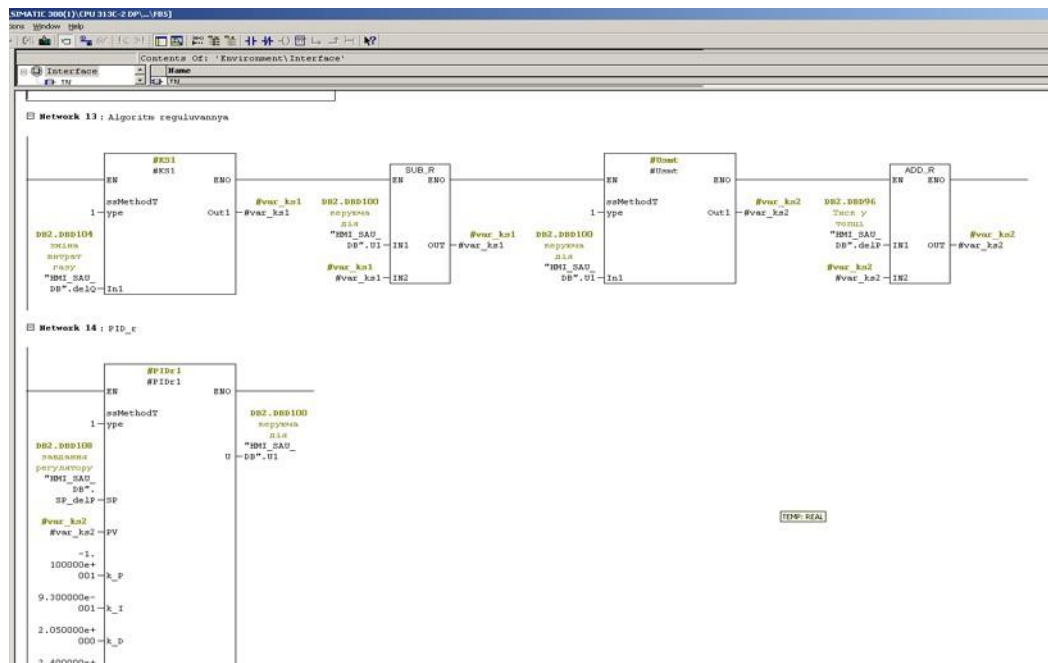


Рис. 4.26 – Фрагмент програми в функціональному блоці FB5 яка реалізує розрахунок регулятора та коригуючі алгоритми

Проведемо тестування програми в режимі емуляції контролеру. Для цього доповнимо програму моделлю об'єкта керування і запусимо розрахунок моделі CAP за каналом регулювання тиску у топці котла. Фрагмент програми моделі ОК наведено на рис. 4.27. А результати тестування у вигляді перехідної характеристики CAP розрядження наведені у вікні SCADA системи WinCCflexible на рис. 4.28 та 4.29.

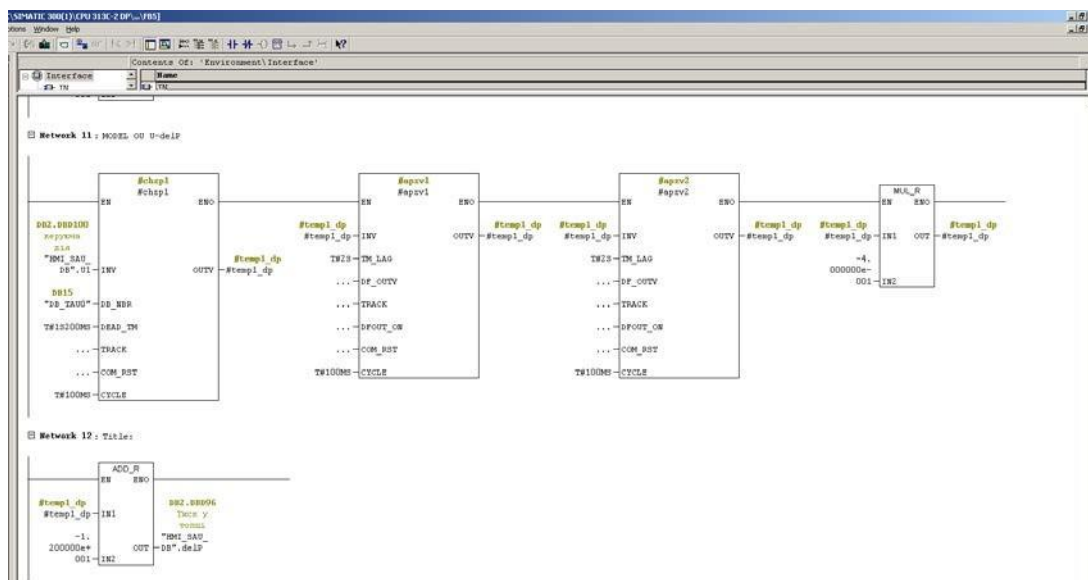


Рис. 4.27 – Фрагмент програми в організаційному блоці OB35 яка реалізує розрахунок моделі ОК

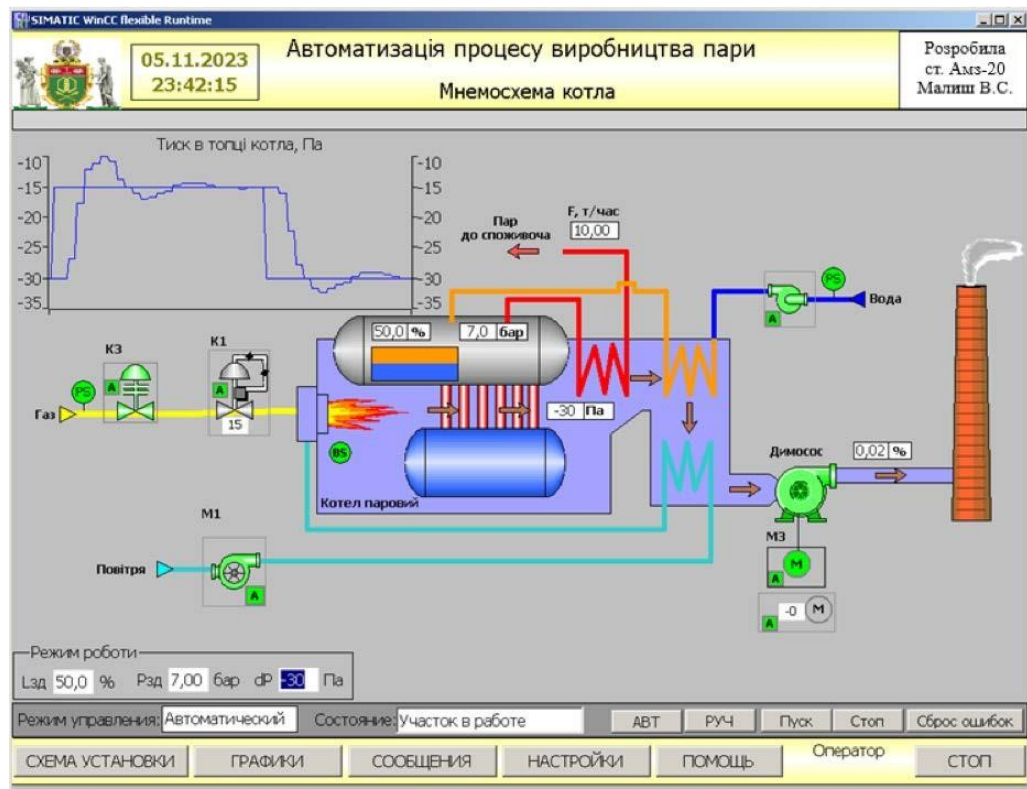


Рис. 4.28 – Результати тестування у вигляді перехідної характеристики моделі САР тиску у топці котла (головний екран)

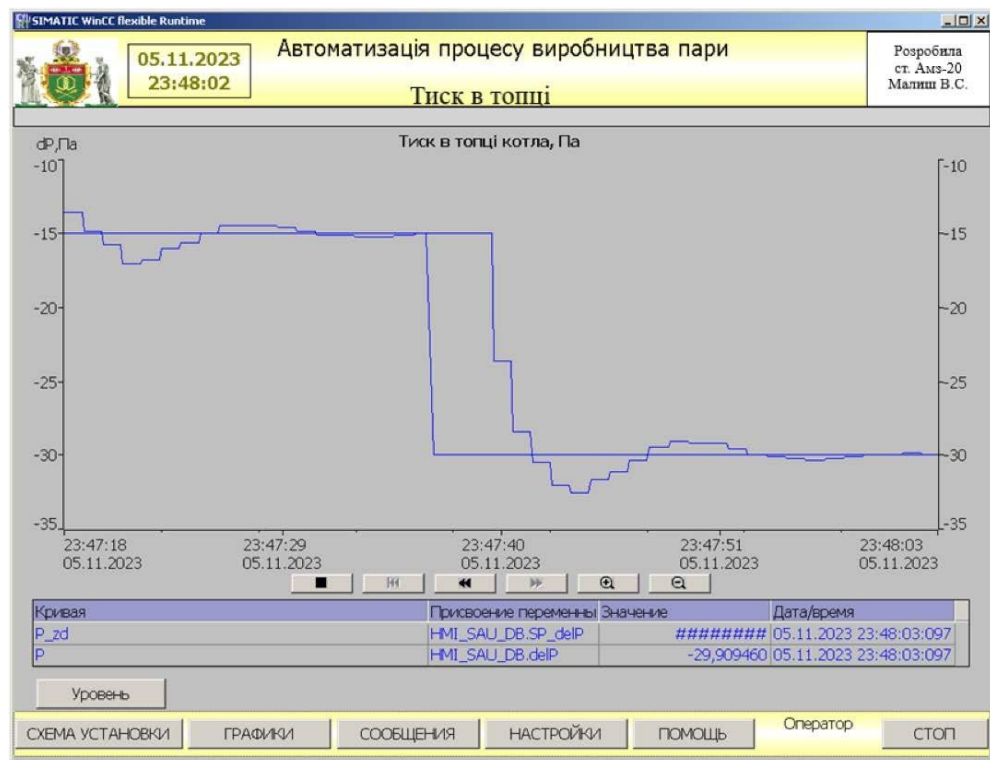


Рис. 4.29 – Результати тестування у вигляді перехідної характеристики моделі САР тиску у топці котла (екран тренди)

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

4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок

За результатами моделювання можна зробити висновки що підвищення динамічної точності САР тиску в топці котла на основі компенсації запізнення у власному русі системи та принципу інваріантності до контрольованих збурень з подальшим зменшенням заданого значення розрідження до -29 Па дозволяє забезпечити зниження витрат електричної енергії на витяжному вентиляторі на (5...7) % без порушень технологічного регламенту і забезпечивши надійний відвід продуктів згорання.

Зменшення заданого значення тиску та його наближення до верхньої границі можливо при відносно незмінних (стаціонарних) властивостях контрольованих збурень зокрема їх дисперсії.

4.4 Висновки за розділом

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

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

Запропонований варіант побудови АСУ ТП на базі МПК серії SimaticS7-313-с 2dp є інвестиційно привабливими, так як розширення функцій системи

керування не потребує істотної зміни технічної структури системи і дозволяє залишити базовий контролер без змін. Тому модернізація САУ на базі Siemens окуповується досить швидко.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи було проаналізовано процес виробництва пари і задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Детально проаналізувавши вибраний об'єкт регулювання, можна зробити висновок, що на розрядження в топці котла має значний вплив витрати газу, що подається у топку. Цей перехресний зв'язок в ОК знижує динамічну точність САР. Основним шляхом підвищення динамічної точності даної САР являється побудова САР інваріантної до цих збурень.

В даній роботі розроблена САР тиску у топці котла з упереджувачем Сміта та інваріантністю відносно коливань витрат газу, що подається до топки F_T . Результати моделювання показують, що введення коригуючих зв'язків дозволило істотно зменшити прямі та інтегральні показники якості, тобто підвищилась динамічна точність САР.

Було досліджено, що використання нейрорегулятора доречно, коли об'єкт є суттєво нелінійним і нестационарним, саме за цієї умови якість регулювання є вищою, ніж при типових САК.

Використання нечіткої логіки в системах керування дозволяє зменшити втручання оператора в процес керування і, отже, дозволяє розробити нові методики керування більш адаптовані до промислового середовища.

Була розроблена технічна структура мікропроцесорного ядра системи керування та програмне забезпечення системи автоматичного керування ТП виробництва пари.

Були вивчені основні характеристики контролерів фірми Siemens сімейства S7-300. Отримано практичний досвід програмного конфігурування контролерів в середовищах Step7.

Також було проаналізовано техніко-економічну ефективність від впровадження нової системи автоматичного регулювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» – Одеса: ДАПТ, 2000. – 16 с.
2. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з Ідентифікації та моделювання технологічних об'єктів – Одеса 1999. – 78 с.
3. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Теорія автоматичного управління» – Одеса: ОДАПТ, 2000. – 16с.
4. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 1. – Одеса 2013. – 110 с.
5. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 2. – Одеса 2012. – 59 с.
6. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту [Текст] / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
7. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В, Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
8. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
9. Усков А.А. Інтелектуальні технології управління (для фахівців у галузі теорії управління, аспірантів та студентів старших курсів технічних університетів) [Текст] / О.О. Усков, А.В. Кузьмін. - М: Гаряча лінія. Телеком, 2004. - 144 с.
10. Круглов В.В. Нечітка логіка та штучні нейронні мережі [Текст] / Круглов В.В., Длі М.І., Голунов Р.Ю. - М.: Фізматліт, 2001. - 302 с.
11. Архангельський В.І. і др. Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] – К. : техніка, 1999. – 364с.

12. Василець Т. Ю. и др. Синтез нейромережевого регулятора для електромеханічної системи з пружними зв'язками в кінематичних передачах // Системи обробки інформації. – 2018. – №. 2. – С. 7-17.
13. Сергей А. Терехов Лаборатория Искусственных Нейронных Сетей НТО-2, ВНИИТФ, Снежинск / [Електрон. ресурс]. – Режим доступа: <https://book.org/book/530233/94a2fe>, <https://www.twirpx.com/file/600450/>, <https://studfiles.net/preview/986654/>
14. User's Manual .WinCC flexible 2008 Compact / Standard / Advanced.
15. «MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Інструменти штучного інтелекту та біоінформатики». – Дьяконов В.П., Круглов В.В М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 456 с.
16. Каталог ІК РІ «Промисловий зв'язок для систем автоматизації та приводів». – Siemens AG, 2005. – 666с.
17. Каталог ST70 «SIMATIC – «Компоненти для комплексної автоматизації». – Siemens AG, 2007. – 862с.
18. «Автоматизація за допомогою програм Step 7 LAD и FBD». – Ганс Бергер, 2001. – 605с.
19. «Економіка підприємства: Підручник» / За заг. редакторка С.Ф. Покропивного-Вид. 2-ге, перероб. але доп. – К.: Київ, 2000. – 528 с.
20. UA 60340 C2. Котел вертикально-циліндричний паровий / В.В. Кіндратович. МПК 7F24H1/08. Заявл. 21.02.00 № 2000020957. Опубл. 15.10.03. Бюл. №10. – 2с.
21. UA 30902. Котел водогрійний / Я.Я. Шепель та ін. МПК F24H 1/00. Опубл. 15.12.00. Бюл. №8. – 2с.
22. UA 6893 C1. Котел опалювальний водогрійний / В.Л. Маменко. МПК F24H 1/08. Заявл. 19.01.89 № 4639497/29-06. Опубл. 31.03.95. Бюл. №1. – 4с.



УДК 681.5:621.182/186

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАРИ

Малаш В.С.

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9607-8352>E-mail: rain89304@gmail.com

Copyright © 2021 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI: 10.15673/atbp.v15i3.2622

Анотація. В сучасних умовах теплоенергетика займає одне з провідних місць серед інших галузей виробництва, забезпечуючи теплою їх об'єкти. Технологічний процес виробництва пари є одним з ключових процесів на підприємствах харчової та зернопереробної промисловості. Автоматизація виробництва пари є актуальною. Існуючі системи автоматичного керування (САК) не забезпечують високої динамічної точності керування. На кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем одеського національного технологічного університету, в рамках випускної роботи магістра, запропоновано ефективну САК з компенсацією запізнення в контурі регулювання розрідження в топці. Паровий котел як об'єкт керування (ОК) є складною динамічною системою. Проведено параметризацію технологічної схеми процесу виробництва пари, побудовано параметричну та координатну схеми ОК, здійснено параметричну та структурну ідентифікацію моделей ОК, проведено оптимальний параметричний синтез та аналіз базової САК та підвищеної динамічної точності. Запропоновані алгоритми керування реалізовані на базі контролера SIMATIC S7-300 фірми Siemens. Розроблено елементи технічного проекту САК: схему автоматизації, принципову електричну схему та інші. З метою інтеграції запропонованих алгоритмів автоматичного регулювання до автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора-технолога і наладчика САК ділянки виробництва пари створено SCADA-систему процесу в середовищі WinCC Flexible. Розроблено технічну структуру мікропроцесорного ядра САК та програмне забезпечення на базі контролера Fastwel I/O в середовищі CodeSys. Розроблено моделі САК з нечітким та нейронорегулятором, проведено їх моделювання та порівняльний аналіз з традиційною САК.

Abstract. In modern conditions, thermal power engineering occupies one of the leading places among other branches of production, providing heat to their facilities. The technological process of steam production is one of the key processes at enterprises of the food and grain processing industry. Automation of steam production is relevant. Existing automatic control systems (ACS) do not provide high dynamic control accuracy. At the Department of Automation of Technological Processes and Robotic Systems of the Odesa National University of Technology, as part of the master's thesis, an effective ACS with compensation for the delay in the rarefaction regulation circuit in the furnace was proposed. A steam boiler as an control object (CO) is a complex dynamic system. The parameterization of the technological scheme of the steam production process was carried out, the parametric and coordinate diagrams of the CO were built, the parametric and structural identification of the OC models was carried out, the optimal parametric synthesis and analysis of the basic ACS and increased dynamic accuracy was carried out. The proposed control algorithms are implemented on the basis of the Siemens SIMATIC S7-300 controller. The elements of the ACS technical project were developed: the automation scheme, the basic electrical scheme and others. In order to integrate the proposed automatic regulation algorithms into the automated workplace (AWP) of the operator-technologist and the ACS adjuster of the steam production section, a SCADA system of the process was created in the WinCC Flexible environment. The technical structure of the ACS microprocessor core and software based on the Fastwel I/O controller in the CodeSys environment were developed. Models of ACS with fuzzy and neuroregulator were developed, their simulation and comparative analysis with traditional ACS were carried out.

Ключові слова: виробництво пари, котел, розрідження в топці, автоматичне управління, автоматизація.

Keywords: steam production, boiler, rarefaction in the furnace, automatic control, automation.

Вступ. Технологічні процеси, швидкість протікання яких визначається інтенсивністю підведення або відведення теплоти, називаються тепловими. До них належать процеси нагрівання, охолодження, випаровування та конденсації. Теплові процеси широко розповсюджені в усіх галузях промисловості, зокрема, в харчовій та переробній промисловості. Джерелом теплоти часто виступає пара, яка виробляється в котельнях підприємств.

Виробництво пари – це процес перетворення технологічної хімічно очищеної води із використанням продуктів горіння палива при високій температурі в насичену пару з тиском, більшим за атмосферний та з