

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 сушінням
овочів в стрічковій сушарці»

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) Лапенков О.Є.

(прізвище, ініціали)

II курсу Ам-21 групи

Керівник к.т.н., доц., Гончаренко О.Є.

(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

(назва кафедри)

(підпис)

Світлий І.М.

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса - 2023 рік

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

Лапенкова Олександра Євгенійовича

1. Тема роботи Підвищення ефективності автоматичного керування сушінням овочів в стрічковій сушарці

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 сушінням овочів, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП сушінням овочів.

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 Гончаренко О.Є. ПІБ
Завдання прийняв до виконання Лапенков О.Є. ПІБ

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 Лапенков О.Є. Керівник роботи Гончаренко О.Є.

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 Лапенков О.Є.
ПІБ Підпис

Анотація

Лапенков О.Є. Підвищення ефективності автоматичного керування сушінням овочів в стрічковій сушарці.

В роботі наведено дослідження процесів керування сушінням продуктів овочів і фруктів у стрічковій сушарці.

Одним із можливих шляхів удосконалення, з метою підвищення ефективності функціонування сушарки, є застосування алгоритмів керування з автоматичної оптимізації режимів функціонування установки.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування процесу сушіння овочів та фруктів у стрічковій сушарці за рахунок застосування систем з алгоритмами автоматичної оптимізації та нейромережевими алгоритмами управління.

Для досягнення поставленої мети було проведено аналіз існуючих систем керування процесами сушіння овочів та фруктів, синтезовано моделі систем автоматичної оптимізації режимів функціонування установки для сушення продуктів та моделі нейромережових систем автоматичного управління.

Проведений аналіз функціонування запропонованих систем показав їхню ефективність, а також достоїнства і недоліки в порівнянні з типовими системами автоматичного управління.

ЗМІСТ

	Стр.
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СУШІННЯМ ОВОЧІВ, ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	
1.1. Опис технологічного процесу та його особливості.....	11
1.2. Існуючі системи керування процесом сушіння овочів.....	19
1.3. Недоліки існуючих САК і формулювання мети вдосконалення систем автоматичного керування процесом сушіння овочів.....	37
1.4. Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САУ процесом сушінням овочів.....	38
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП СУШІННЯМ ОВОЧІВ.	
2.1 Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності.....	30
2.2 Порівняльний аналіз САР базової структури і підвищеної динамічної точності (із коригуючими зв'язками).....	38
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління, побудованих на базі апарату нечіткої логіки, для розглянутого об'єкта керування.....	41
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання який характеризується нелінійною статичною характеристикою.....	42
3.3 Параметричний синтез САУ з традиційним ПД регулятором для об'єкта який характеризується нелінійною характеристикою за каналом регулювання.....	44

3.4 Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання	50
3.5 Порівняльний аналіз функціонування САУ з традиційним ПД регулятором і САУ з нечітким регулятором	59
3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів управління	65
3.7 Розробка моделі САУ з нелінійними перетворюючими на основі штучних нейронних мереж.....	67
3.8 Синтез моделі САУ з нейрорегулятором як з альтернативним варіантом алгоритму управління.....	77
3.9 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором	91
3.10 Аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють.....	96
3.11 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.....	98
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ САК, ЩО РЕАЛІЗУЄ НОВУ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО ПРОСУНУТУ, ФУНКЦІЮ.	
4.1. Опис загальних принципів побудови модернізованої системи керування.....	105
4.2. Розробка структурної схеми САУ та опис принципу її дії.....	110
4.3. Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів управління.....	114
4.4 Розробка схеми імітаційного моделювання САУ і дослідження її роботи	115
4.5. Розробка імітаційної моделі екстремальної системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму та дослідження її роботи.....	118
РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ	
5.1 Аналіз вхідних і вихідних сигналів і вибір топології побудови системи.....	127

5.2. Розробка технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування.....	129
5.3. Програмне конфігурування контролера.....	135
5.4 Розробка програми, що реалізує алгоритми регулювання.....	138
ВИСНОВКИ.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	145
ДОДАТОК 1 – стаття до фахового журналу	

ВСТУП

Овочі – найбільш розповсюджений і затребуваний продукт у світі. За рік їх вживають величезну кількість. Але овочі – це сезонний продукт, який не може довго зберігатись. Саме для збереження свіжості і інших корисних властивостей протягом тривалого терміну, необхідно овочі спеціально обробляти. Обробка овочів високими температурами, тобто їх сушіння, є найбільш розповсюдженим і кращим способом консервування цього продукту.

Сушіння овочів здійснюють на фабриках, та, навіть, у домашніх умовах. Основними цілями таких процесів є зниження енергоємності виробництва, зменшення втрат, та підвищення якості готового продукту.

Актуальність теми. Підвищення енергоефективності та зменшення енергоспоживання відповідних технологічних процесів є важливою задачею рішення якої підвищує енергетичну безпеку підприємства та в цілому в країні. На сьогоднішній час в овочесушильній промисловості все більшого значення набуває розробка та впровадження нових технологій що дозволяють отримувати якісну продукцію та зменшити енерговитрати на її виробництво. Зменшення енерговитрат на процес сушіння овочів і фруктів та відповідно підвищення якості відповідної продукції можливо за рахунок підвищення ефективності системи управління.

Відомо, що в наш час багато фірм-виробників сушильних овочів та фруктів широко застосовують традиційні, типові схеми керування, що виключають зайві капітальні витрати, вартість яких сьогодні значно знижується. У зв'язку з цим необхідна розробка нових систем автоматичного керування процесами сушіння продуктів і методика їх синтезу.

На основі аналіз різних літературних джерел пов'язаних з сушінню овочів і фруктів можна зробити висновок що підвищення ефективності процесу управління можливо за рахунок лінеаризації каналів регулювання, адаптації параметрів системи до умовах параметричної невизначеності з

використанням сучасних алгоритмів управління. Це в першу чергу алгоритми управління з додатковими інформаційними каналами та нейромережеві алгоритмами які пов'язані з системою оптимізації загальних режимів роботи технологічних об'єктів.

Аналіз робіт, пов'язаних з регулюванням змінних в овочесушильних установках, і проведені дослідження ефективності функціонування типових систем керування процесами сушіння продуктів дозволяють зробити висновок, що задача розробки і дослідження ефективних алгоритмів керування технологічним процесом сушіння у визначеної стрічкової сушарки **є актуальною.**

У роботі наведені дослідження систем керування процесом сушіння овочів. Розроблені алгоритми керування процесом, котрі забезпечують високу якість регулювання регламентованих змінних. Виконане імітаційне моделювання поведінки системи керування, що реалізує розроблені алгоритми.

В сушарках овочів підвищення ефективності (зниження питомих витрат теплової та електричної енергії на сушіння) можливо за рахунок пошуку найкращого, у конкретних умовах роботи, режиму сушіння тобто значень теплового потоку який подається з агентом сушіння до камери сушіння. Тепловий потік визначається витратами агенту сушки та його температурою. Таким чином можна змінювати витрати агенту сушки для зниження питомих витрат енергії на сушіння. Тому в роботі також реалізовано синтез САК процесом сушіння овочів з функцією автоматичної оптимізації теплового режиму сушарки. Проведено дослідження її роботи з використанням імітаційного моделювання.

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

Результати дослідження різних алгоритмів керування можуть бути використані у науково-дослідницькій роботі НДР кафедри автоматизації технологічних процесів та робототехнічних систем ОНТУ, за відповідними темами.

Мета і задачі дослідження.

Метою магістерської роботи є підвищення ефективності функціонування процесу сушіння овочів та фруктів у стрічковій сушарці за рахунок застосування систем з алгоритмами автоматичної оптимізації та нейромережевими алгоритмами управління.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз існуючих систем керування процесами сушіння овочів та фруктів, на підставі яких обґрунтовано задачі роботи;
- синтезувати моделі систем управління підвищеної динамічної точності і систем автоматичної оптимізації режимів функціонування установки для сушення продуктів;
- синтезувати моделі нейромережових систем автоматичного управління процесами сушення овочів і фруктів;
- проаналізувати ефективність та якість регулювання розроблених моделей систем шляхом їх імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження: Системи керування процесами сушіння овочів та фруктів у стрічкових сушарках.

Предмет дослідження: Моделі та алгоритми систем автоматичного управління і оптимізації процесу сушіння продуктів у стрічковій сушарки.

Методи дослідження базуються на теорії автоматичного управління, теорії багатоконтурних систем управління; теорії нечіткої логіки, нейромережових систем і імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше формалізовано алгоритм нейромережевого управління процесами сушіння продуктів у стрічковій сушарці на основі задачі нечіткого управління;
- отримала подальший розвиток методика перетворення нечіткого регулятора до нейромережевого алгоритму управління на основі дослідження процесу керування сушіння продуктів у стрічковій сушарці;

- розроблено математичну модель системи автоматичної оптимізації режимів роботи стрічковій сушарки овочів і фруктів, яка забезпечує ефективний режим функціонування і стабілізацію важливих змінних.

Практичне значення отриманих результатів.

Матеріали досліджень відповідної магістерської роботи можуть бути використані в наступних дипломних проектах і магістерських роботах за відповідною темою пов'язаною з сушінням продуктів у стрічковій сушарці.

Апробація результатів. Основні результати апробовані на наукових конференціях: студентської та 83-й професорсько-викладацького складу ОНТУ, 2023р.

Структура та обсяг. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і двох додатків. Загальний обсяг роботи 157 сторінок, з яких 133 основного тексту. Магістерська робота має 98 рисунків, 10 таблиць та посилань до 24 літературного джерела.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СУШІННЯ ОВОЧІВ, ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Опис технологічного процесу та його особливості.

Природно-кліматичні умови більшості сільськогосподарських районів України такі, що першорядну роль для забезпечення зберігання врожаю відіграє сушіння овочей і фруктів. Вітчизняна промисловість випускає сушені

овочі і фрукти в широкому асортименті. Виробництво сушених продуктів має велике народногосподарське значення, оскільки вони грають велику роль в живленні населення.

Забезпечити безперебійне приймання, зберігання без утрат прийнятих овочей і фруктів та поліпшення їх якості найважливіші завдання працівників підприємств консервної та переробної промисловості України.

Якість готової продукції залежить від багатьох факторів: властивостей і придатності сортів фруктів та овочів для сушіння, їхньої підготовки до сушіння, технологічного процесу сушіння та ін. Для того, щоб мати продукцію високої якості, необхідно використовувати сорти, придатні для сушіння, дотримуватись технологічного режиму підготовки сировини, її обробки, режим в сушіння.

Використовують різні способи видалення вологи з фруктів і овочів: природні (на сонці та в тіні) та штучні. До штучних відносяться конвективний, кондуктивний, сублімаційний, сушіння у киплячому і віброкиплячому шарі, сушіння струменем високої частоти, сушіння інфрачервоним промінням або радіаційним способом, сушіння з вибуханням у закритому апараті, розпилювальне сушіння, піносушіння та ін.

Суть технологічного процесу - це цілеспрямоване перетворення матеріальних і енергетичних потоків в спеціальному технологічному устаткуванні (машинах, апаратах, агрегатах). Суть технологічного процесу

висушування овочів і фруктів в перетворенні вологого продукту під впливом Теплоносіїв (пари, що гріє, повітря) в сухий продукт. Технологічний процес реалізується в стрічковій сушарці.

Технологічна схема сушіння овочів і фруктів у стрічковій сушарці наведена на рис. 1.1

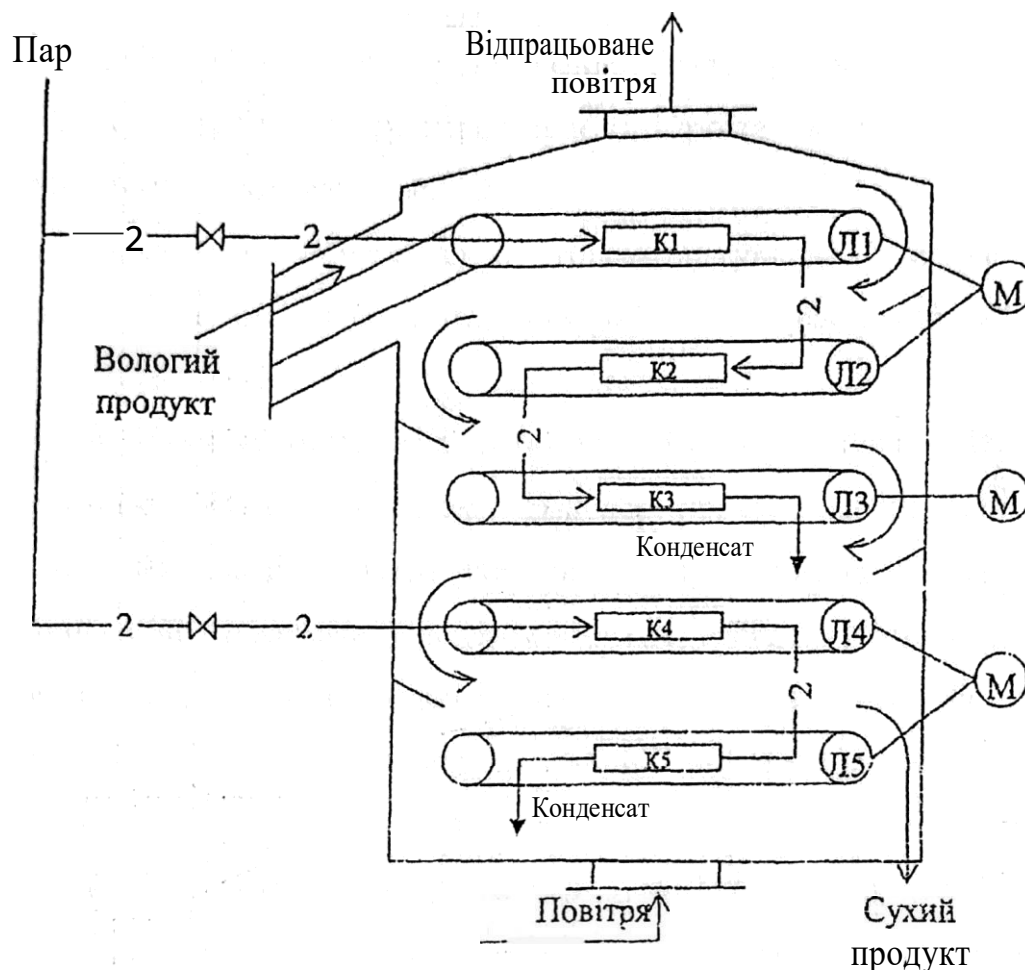


Рис. 1.1 - Технологічна схема сушіння овочів і фруктів на багатострічковій сушарці

Вологий продукт (фрукти чи овочі) у нарізаному вигляді подається в сушарку і стрічками Л1-Л5 переміщається через її зони, де паровими калориферами К1 - К5 підтримується заданий температурний режим. Для видалення вологи із сушарки вона вентильюється атмосферним повітрям. Вологоз'єм, і, отже, кінцева вологість за інших рівних умов визначається часом перебування продукту в сушарці. Її номінальне значення $12 \pm 1\%$, гранично припустиме – 15%

Опис конструкції технологічного обладнання та особливостей його експлуатації

Стрічкові конвективні сушарки використовують в харчовій промисловості для сушки матеріалів, нарізаних на шматки: сухарів, фруктів, овочів, харчових концентратів, чаю, макаронів і інших продуктів.

Висушуваний матеріал в стрічковій сушарці поступає на верхню стрічку і, йдучи за конвеєром, проходить до нижнього розвантажувального люку.

Стрічки виготовлені з металевих сит (нержавіюча сталь) з великим живим перерізом. Між гілками транспортних стрічок розташовані ребристі парові підігрівачі. Повітря поступає знизу і проходить перехресним по відношенню до матеріалу потоком через усі стрічки сушарки. Відпрацьоване повітря видаляється за допомогою парасольки і труби або вентилятора. Швидкість руху стрічок змінюється від 0,1 до 1 м/хв. за допомогою варіатора

Стрічкові конвективні сушарки працюють по варіанту з проміжним підігріванням повітря. Це дозволяє здійснювати м'які режими сушки, оскільки проміжні температури нагрівання і міри насичення повітря вологою можуть бути вибрані відповідно до швидкості випару вологи з матеріалу.

Завдяки поступовому наростанню вологозмісту, в таких сушарках можна висушувати харчові продукти, для яких потрібно рівномірні умови сушки і невисоку температуру. На овочесушильних підприємствах встановлені в основному парові конвеєрні (стрічкові) сушарки.

Зниження максимальної температури повітря при сушці по варіанту з проміжним підігріванням повітря відбувається внаслідок дробового підведення теплоти до продукту.

Формулювання (у загальному виді) умов, при яких можливо і доцільно реалізувати розглянутий технологічний процес.

Мета ведення процесу – отримання заданих продуктів із заданими властивостями (показниками якості). При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдане тільки тоді, тобто технологічний

процес є сенс реалізовувати, коли виконується цілий ряд вимог до технологічного процесу.

Вимоги до технологічного процесу, що найчастіше зустрічаються:

- кількість вироблюваного в одиницю часу продукту не має бути нижчим встановленої норми;
- втрати сировини і (чи) продукту 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.

Для доцільності здійснення процесу сушіння овочів і фруктів необхідно виконати ряд умов:

- а) продуктивність по випарюваній вологості в одиницю часу не має бути менше встановленої норми: не менше 230 кг за годину;
- б) втрати сировини і продукту не повинні перевищувати нормативних значень: не більше 1 % овочів і фруктів;
- в) питомі витрати енергії на процес не повинні перевищувати нормативних значень: втрати не більше 5% від необхідних витрат для приготування однієї тони продукту;
- г) режим роботи технологічного устаткування не повинні виходити за гранично допустимі: швидкість руху стрічок, температура і швидкість руху повітря не повинні виходити за межі встановлених регламентів;
- д) шкідлива дія ТП на людину і природне середовище не повинна

перевищувати нормативних значень;

е) порушення режим в ведення ТП 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 аварії.

Параметризація схеми технологічного процесу і загальна (на якісному рівні) характеристика параметрів і їх взаємозалежностей

Технологічний процес сушіння овочів і фруктів є тепловим процесом, пов'язаним з передачею тепла від пари через стінки калорифера до продукту. Важливою умовою нормального технологічного процесу є заповнення сушарки продуктом. Проведемо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на рис. 1.2.

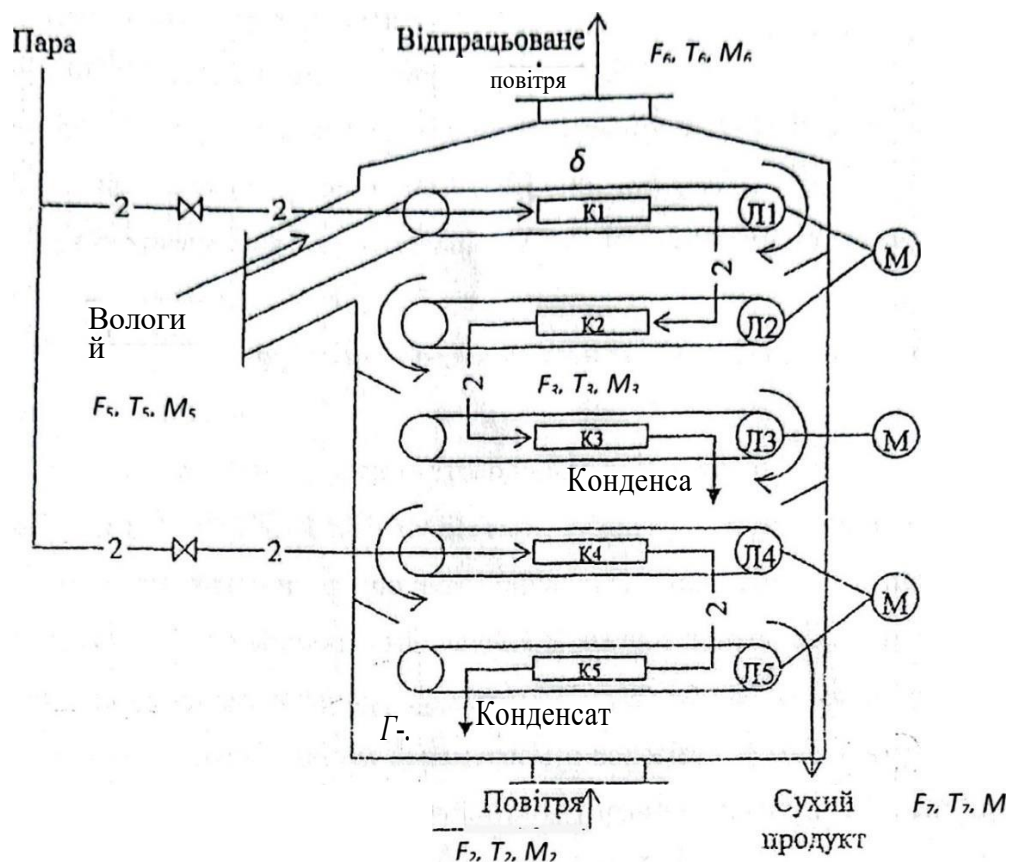


Рис. 1.2 Параметризована технологічна схема процесу сушіння овочів і фруктів

Позначення на технологічній схемі, що параметризується:

F1 — витрата пари, що гріє;

P1 - тиск пари, що гріє;

u - положення регулюючого органу подачі пари;

F2 — витрата повітря;

T2 - температура повітря;

M2- вологість повітря;

F3 - витрата гарячого повітря;

T3 - температура гарячого повітря;

M3 – вологість гарячого повітря;

F4 — витрата конденсату;

T4 - температура конденсату;

F5 - витрата вологого продукту;

T5 - температура вологого продукту;

M5 - вологість вологого продукту;

F6 - витрата відпрацьованого повітря;

T6- температура відпрацьованого повітря;

M6 - вологість відпрацьованого повітря;

F7 - витрата сухого продукту;

T7 - температура сухого продукту;

M – вологість сухого продукту

U8 – напруга на двигуні приводу стрічок 4, 5;

u 8 – регулювання частоти обертання двигуна приводу стрічок 4,5

б – товщина шару продукту на 1-й стрічці.

Конкретизація регламентів і умов ведення процесу, його формалізоване представлення

Основу нормативів складають три основні регламенти:

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕГЛАМЕНТ - визначає умови, при яких в результаті технологічного процесу виходить продукт із заданими

властивостями. Він є набором номінальних значень і допусків на відхилення від номінальних технологічних параметрів. Для технологічного процесу сушіння овочів і фруктів таким параметром є вологість сухого продукту M , температура сухого продукту T_7 , вологість гарячого повітря M_3 , витрата гарячого повітря F_3 , температура гарячого повітря T_3 .

ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РЕГЛАМЕНТ - визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного устаткування. Він є набором номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів цього технологічного устаткування. Для стрічкової сушарки таких параметрів не буде.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ і екологічний регламент визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він є набором номінальних або гранично допустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів. До цієї групи параметрів можна віднести витрату пари F_1 , витрату сухого продукту F_7 , витрату пари, що гріє F_1 , витрату конденсату F_4 , температуру конденсату T_4 , витрату відпрацьованого повітря F_6 , температуру відпрацьованого повітря T_6 , вологість відпрацьованого повітря M_6 .

Аналіз наслідків виходу технологічних і експлуатаційних параметрів за регламентні допуски.

Відхилення параметрів технологічного процесу від регламентних значень, що викликаються зміною параметрів, що характеризують умови ведення процесу навіть при досить ефективному управлінні процесом, можуть перевищувати встановлені допуски. Залежно від наслідків, можна виділити два характерні типи таких порушень:

а) технологічний процес не припиняється, вихід за допуски ліквідовується з часом, наприклад, за рахунок управління процесом;

б) технологічний процес припиняється повністю або частково для його відновлення часто потрібна підготовка устаткування до повторного запуску (видалення сировини з машини, чищення робочих органів, їх заміна і так далі)

Відхилення вологості продукту на виході з сушарки нижче гранично допустимих значень може привести до пересушування продукту, а перевищення вологості верхнього гранично допустимого значення може привести до нетривалого зберігання продукту, тобто псуванню. У обох випадках порушення регламенту веде до погіршення якості готового продукту і навіть до збільшення виходу браку.

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

Тривало допустимі відхилення визначають зону незначних для цього процесу відхилень (ЗНВ) даного параметра. Усередині цієї зони значення параметра можна вважати приблизно рівним нормативному, тому відхилення, що не виходять зі ЗНВ, можна не усувати.

Короткочасні допустимі відхилення параметрів перевищують їх ЗНВ і призводять до зниження ефективності процесу, тому (як вже ясно з назви) вони допустимі лише обмежений час, який задається і входить в регламент-

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

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру або ф-ція зміни номінального значення	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі (t_0)	Короткочасні ($0 < t \ll t_k$)	
				величина	величина	час, сек
1	2	3	4	5	6	7
Вологість продукту на виході сушарки	М	%	12	± 1	± 5	600

1.2. Існуючі системи керування процесом сушіння овочів.

Загальним завданням управління є управління матеріальними і енергетичними потоками для набуття властивостей продукту необхідного виду і якості.

Із спільної мети управління можна виділити окремі задачі:

- підтримка вихідної змінної об'єкту управління (М) на її заданому значенні (М ЗДН) – завдання регулювання;
- пристосування в процесі роботи об'єкту управління до його властивостей, що змінюються, завданням - завдання адаптації;
- забезпечення найкращих (оптимальних) в певному (заданому) значенні режимів роботи об'єкту управління - завдання оптимізації;
- забезпечити включення і відключення при пусках, остановах, аварійних ситуаціях - завдання логічного управління.

Необхідно і доцільно автоматизувати кожне із завдань управління.

Для завдання регулювання автоматизація потрібна для автоматичного регулювання заданої змінної в околі бажаного значення із заданою точністю без фізичної участі людини.

Для якісної і економічно доцільної реалізації технологічного процесу сушіння овочів і фруктів в стрічковій сушарці необхідно регулювати вологість продукту на виході сушарки (на виході з п'ятої стрічки) М.

Для завдання адаптації потрібна автоматизація пристосування в процесі роботи об'єкту управління до його властивостей, що змінюються, завдань. Даний технологічний процес є об'єктом безперервної дії.

Властивості продукту істотно впливають на динамічні властивості об'єкту. Але ці властивості в процесі роботи установки на тривалому інтервалі часу змінюються мало.

Це завдання можна вирішити, міняючи (коригуючи) налаштування регуляторів в процесі роботи установки.

Для завдання оптимізації необхідно автоматизувати пошук оптимального проходження процесу, мінімізувати витрати енергії, брак

продукції, збільшити продуктивність устаткування.

Для процесу сушіння овочів і фруктів в стрічковій сушарці це завдання можна вирішити, підвищивши вимоги до рішення задачі регулювання. Головним джерелом підвищення економічної ефективності цього процесу є зниження витрат енергії пари на реалізацію технологічного процесу.

Процес сушіння овочів і фруктів в стрічковій сушарці є об'єктом безперервної дії. Для нього є характерним тривалий робочий режим, на який об'єкт виводять в дистанційному режимі. Режими пуску і останову є неекономічними режимами роботи установки. Підвищення економічної ефективності роботи цього процесу в режимах пуску і останову можна досягти, автоматизувавши ці завдання. Тому для даного технологічного процесу актуальна автоматизація завдання логічного управління.

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів вологість продукту на виході сушарки (на виході з п'ятої стрічки) M повинна підтримуватися на рівні 12 % з точністю ± 1 %. По цьому параметру допустимі короткочасні відхилення до ± 5 % упродовж часу не більше 600 секунд. Регламентна зона по цьому параметру приведена на рис. 3.1.

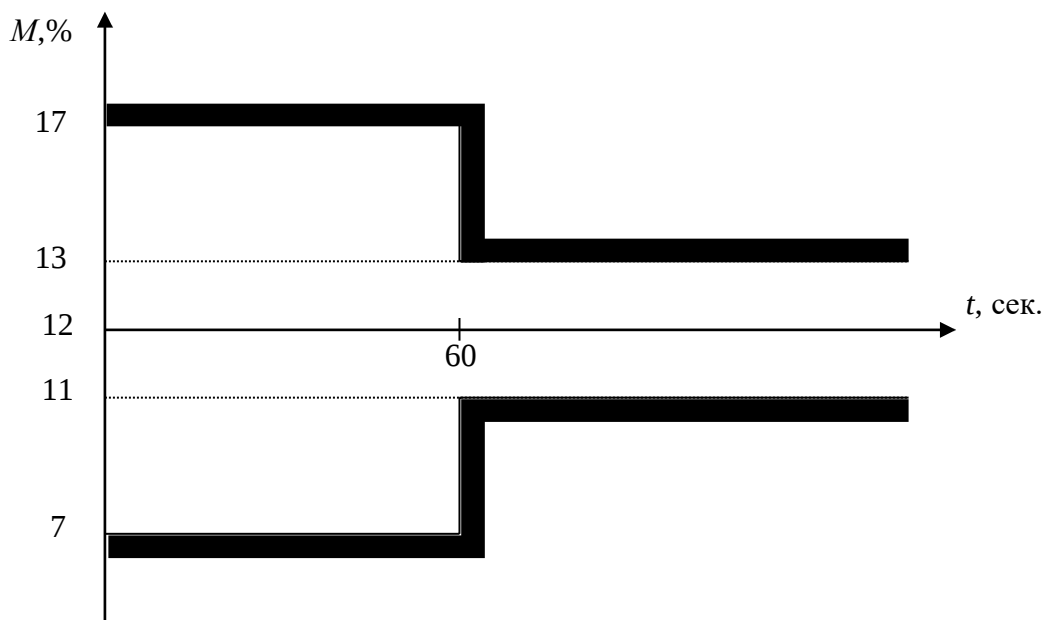


Рис. 1.3 – Вологість продукту на виході сушарки (на виході з п'ятої стрічки) M

Як видно з регламентів на САР для процесу сушіння овочів і фруктів в

стрічковій сушарці особливо жорсткі вимоги пред'являються до короткочасних відхилень та до значних коливань регульованої координати, 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 вологості і підвищення її динамічної точності доцільно оцінювати за наступним критерієм:

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

де t_M – час моделювання;

$\Delta M(t)$ – відхилення вологості продукту на виході сушарки (на виході з п'ятої стрічки) від заданого значення;

Основу управління складає інформація про мету управління або про бажаний стан ОУ у_{бж}, про поточний стан ОУ у і про збурення f. Залежно від об'єму використовуваної пристроєм (УП), що управляє, інформації про ОУ виділяють чотири принципи побудови САР: принцип розімкненого жорсткого (програмного) управління; принцип розімкненого управління по збуренню; принцип замкнутого управління за станом ОУ або управління із зворотним зв'язком; комбінований принцип управління.

Для САР процесу сушіння овочів і фруктів в стрічковій сушарці доступною, окрім інформації про бажаний стан ОУ, являється інформація про поточний стан ОУ. Такий об'єм інформації для формування дії, що управляє, достатній для реалізації замкнутого принципу управління. Тому саме цей принцип покладений в основу САР вологості продукту на виході сушарки (на виході з п'ятої стрічки).

В результаті виконання роботи була проведена ідентифікація моделей каналів перетворення координатних дій технологічного процесу. Результати ідентифікації зведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Результати ідентифікації каналів перетворення координатних дій ОУ

Канал ОУ	Модель динаміки	
	1-го порядку	2-го порядку
« $u - M$ »	$W_0(p) = \frac{-0,27 \cdot e^{-159p}}{92,5p + 1}$	$W_0(p) = \frac{-0,27 \cdot e^{-118,5p}}{(63,1p + 1)^2}$
« $\delta - M$ »	$W_0(p) = \frac{0,12 \cdot e^{-185,5p}}{141,3p + 1}$	$W_0(p) = \frac{0,12 \cdot e^{-130p}}{(93,8p + 1)^2}$

Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором представлена на рис. 1.4 а відповідна структурна схема моделювання ОУ приведена на рис. 1.5.

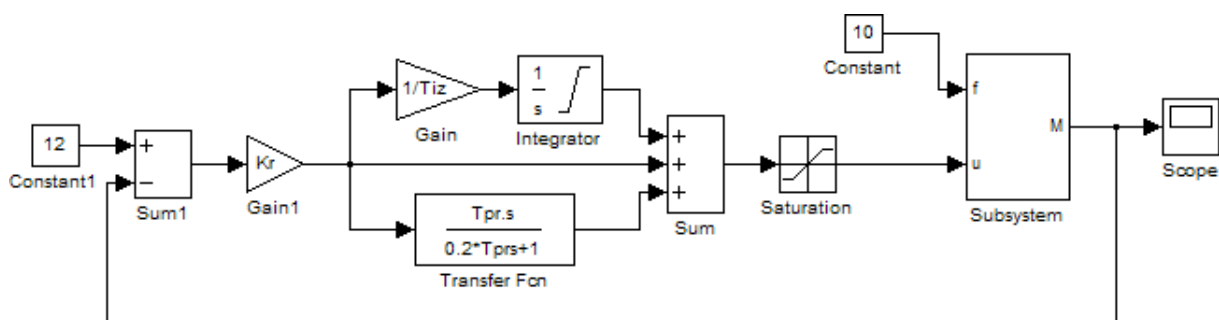


Рис. 1.4 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

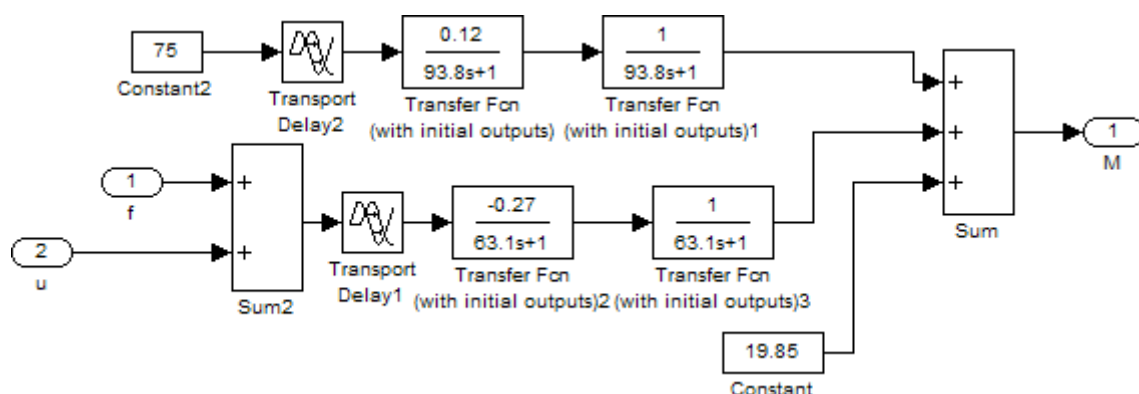


Рис. 1.5 – Структурна схема моделювання ОУ

Вибір початкових наближень налаштовувальних параметрів алгоритмів регулювання було виконано на основі інженерних методик параметричного

(неоптимального) синтезу САР

Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора приведені на рис. 1.7.

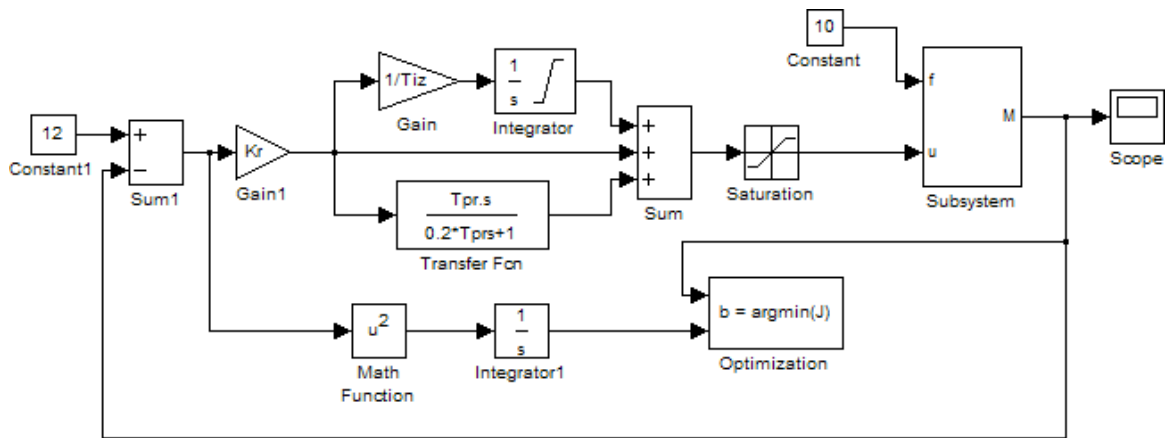
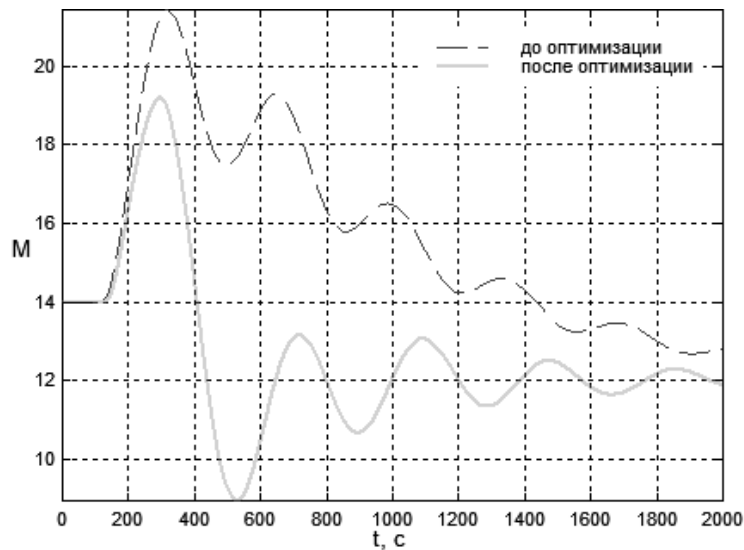


Рис. 1.6 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr	-4.4803	-21.5	-2.15	0	до - 38675.1474
Tiz	111.9445	31.8	318	3180	после - 9749.8325
Tpr	71.8664	15.9	159	1590	Количество шагов процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 173

Рис. 1.7 – Результаты оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

Порівняємо перехідні процеси в САР з ПІД-регулятором до і після оптимізації по інтегральному і прямим показникам якості. Результати

порівняння зведені в таблицю 1.3.

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

САР з ПІД-регулятором	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta M^{МАКС}$	T_{nn}, c	
до оптимізації	9,8	2000	38675
після оптимізації	7	700	9749

Згідно з таблицею 1.3 можливо зробити висновок щодо покращення якості регулювання завдяки етапу оптимізації параметрів САУ.

Аналіз грубості САР до варіацій параметрів ОУ

В процесі роботи сушарки може змінюватися час запізнювання в каналах ОУ. Слід зазначити, що внаслідок нелінійності, параметри 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. і детермінованого ступінчастого контрольованого збурення в 10 мм. Структурна схема моделювання для аналізу ПІД-регуляторами на грубість приведені на рис. 1.8.

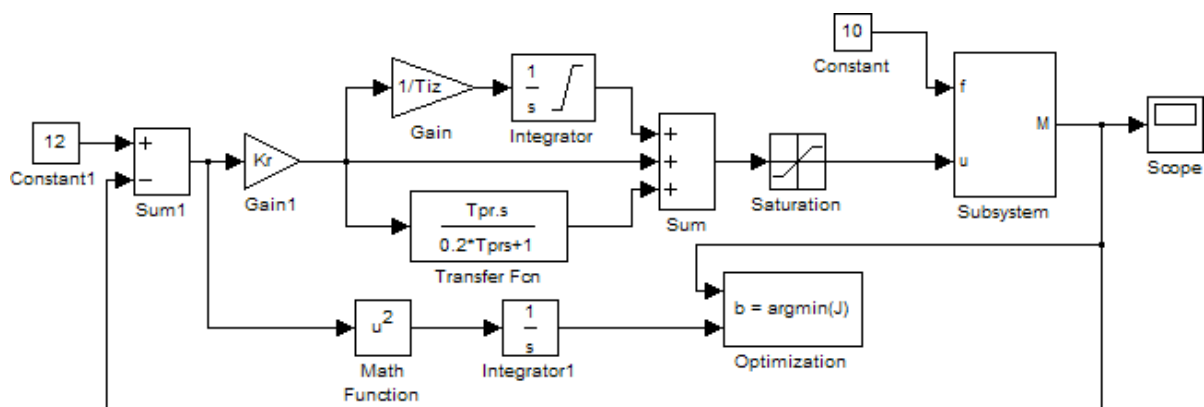


Рис. 1.8 - Структурна схема моделювання для аналізу САР з ПІД-регулятором на грубість

Результати оцінки САР з ПІД-регулятором – на рис. 1.9. Як видно з результатів, з ПІД-регулятором є грубою, оскільки в умовах варіації

параметрів ОУ дає перехідні процеси, що сходяться. Але також в умовах дії збурень детермінованого характеру перехідні процеси в САР виходять за рамки регламентних зон.

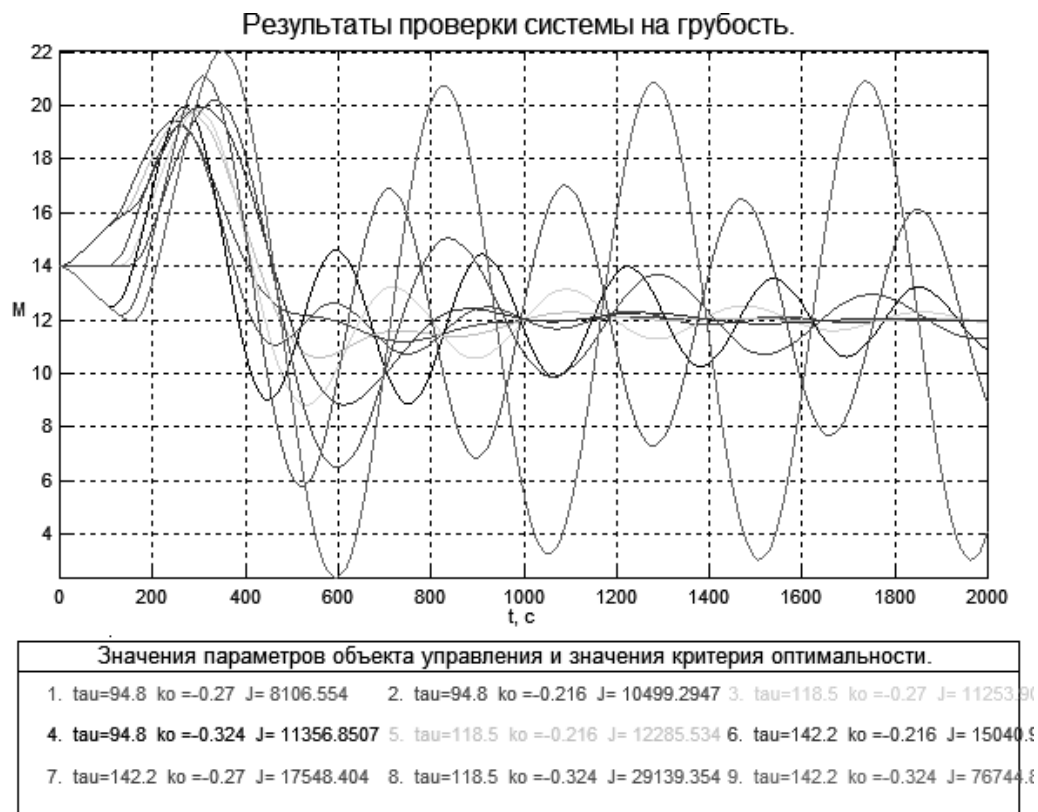


Рис. 1.9 - Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором за умов дії детермінованих контрольованих збурень

Як видно з результатів оцінки САР на грубість, «найгіршим» для управління поєднанням параметрів ОУ є більше на 20 % час запізнювання ОУ, а «найкращим» для управління поєднанням - на 20 % менший час запізнювання. По більшості показників якості САР з ПД-регулятором являється краще, ніж САР з ПІ-регулятором. Тому в подальших дослідженнях в якості базового алгоритму регулювання буде виступати ПД-алгоритм регулювання.

1.3. Недоліки існуючих САК і формулювання мети вдосконалення систем автоматичного керування процесом сушіння овочів

Розглянуті у розділі 1.2 варіанти САК процесом сушіння овочів обмежуються функцією регулювання вологості продукту на виході з

сушарки. Також передбачені різні функції блокування подачі пари, що гріє. Підвищення динамічної точності алгоритмів регулювання забезпечує підтримку регульованої змінної на заданому значенні з меншим відхиленням та забезпечують дотримання технологічного регламенту. Але в системі ні як не передбачено виконання технологічного регламенту за температурою сушильного агенту і ця температура в процесі регулювання кінцевої вологості продукту може перевищувати свої максимальні значення. Перевищення максимальних значень по температурі агенту сушіння може привести до браку готової продукції. Зазвичай у штатних системах керування, якими компонується сушильні установки передбачена саме функція регулювання (стабілізації) температури сушильного агенту, а регулювання кінцевої вологості частіше виконується оператором за рахунок зміни швидкості стрічкового конвеєру.

Додатково в умовах, коли характеристики сировини змінюються екстремуми функцій ефективності роботи сушильної камери дрейфують і стабілізуючі САР не дозволяють забезпечити найбільш ефективні режими роботи сушарки овочів. Таким чином потрібно розширення функцій, що реалізуються САК, наприклад, розширення функцій регулювання та реалізація функції, що забезпечує цілеспрямоване підвищення техніко-економічних показників процесу сушіння овочів, зокрема зниження питомих витрат теплової (пар, що гріє) та електричної енергії на сушіння.

В сушарках овочів підвищення ефективності можливо за рахунок пошуку найкращого, у конкретних умовах роботи, режиму сушіння тобто значень теплового потоку який подається з агентом сушіння до камери сушіння. Тепловий потік визначається витратами та температурою сушильного агенту і його можна змінювати, наприклад, за рахунок зміни витрат сушильного агенту (швидкість обертання вентилятору) для зниження питомих витрат енергії на сушіння.

В нашому випадку метою вдосконалення САК процесом сушіння овочів є: зниження питомих енерговитрат (питомих витрат теплової енергії)

на сушіння за рахунок реалізації функції автоматичної оптимізації теплового режиму сушіння у сушарці овочів.

1.4. Обґрунтування нових функцій, які повинні бути реалізовані САК процесом сушінням овочів.

В умовах, коли змінюються характеристики сировини, параметри енергоносіїв (властивості пари що гріє) найкращий режим сушіння в сушарках овочів, який забезпечує мінімум питомих витрат теплової енергії на сушіння (або максимум кількості висушених овочів на одиницю витраченої енергії) заздалегідь не відомий і потрібно забезпечити його пошук.

Тобто для забезпечення максимальної ефективності роботи сушарки овочів недостатньо реалізації функцій регулювання (зокрема реалізації контурів регулювання температури агенту сушіння та вологості продукту на виході з сушарки), необхідно забезпечити пошук найкращого, за конкретних умов роботи, теплового режиму сушіння (витрат агенту сушіння на вході до камери сушіння при фіксованому значенні температури агенту сушіння). Цей пошук і складатиме сутність функції оптимізації, яка буде реалізована САК процесом сушіння овочів, що розробляється. Додатково приймаємо, що в процесі пошуку оптимального значення витрат агенту сушіння технологічний регламент роботи сушарки не порушуватиметься.

При синтезі системи автоматичної оптимізації можна розглянути два показника ефективності (критерії оптимізації) та вибрати один з них. Перший критерій це кількість води що видаляється на одиницю витраченої теплової енергії. Другий показник ефективності - кількість висушених овочів на одиницю витраченої теплової енергії. Другий критерій фактично відтворює перший при роботі контуру регулювання кінцевої вологості продукту. Тобто якщо води видаляється більше то і продуктивність сушарки буде збільшуватися для забезпечення заданої вологості матеріалу.

Кожен з критеріїв в функції від витрат сушильного агенту має екстремальний характер, завдання оптимізації є однокритеріальним, об'єкт оптимізації одномірний, то реалізацію функції оптимізації проведемо на основі системи екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму.

Етапи розробки модернізованої системи керування процесом сушіння овочів будуть розглянуті в наступних розділах.

РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП СУШІННЯМ ОВОЧІВ.

2.1 Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності

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

У нашому випадку головною причиною недостатньої динамічної точності САР є дія контрольованого збурення. Основним шляхом підвищення динамічної точності саме даною САР являється побудова САР, інваріантною до дії контрольованого збурення.

У основу підвищення динамічної точності САР буде покладений принцип двуканальності Петрова, суть якого у введенні додаткового каналу дії " $\delta - M$ " через корегуючий зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема САР, інваріантною до дії контрольованого збурення матиме вигляд, приведений на рис. 2.1.

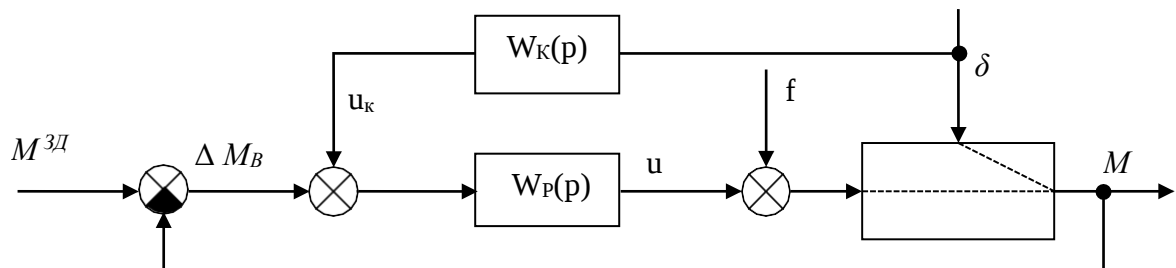


Рис. 2.1 – Структурна схема САР, інваріантною до дії контрольованого збурення

На схемі $W_k(p)$ - передатна функція коригуючого зв'язку.

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткового каналу дії по контрольованому збуренню, а для даної САР така можливість є. Достатньою умовою реалізації САР є фізична та реалізуєма коригуюча передатна функція.

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

$$\Delta M_{\text{стаб}} = 0.$$

Відомо, що

$$\Delta M_{\text{стаб}} = W_{\delta-M}^c(p) \cdot M = 0.$$

Відомо, що $M \neq 0$, тоді

$$W_{\delta-M}^c(p) = 0;$$

$$W_{\delta-M}^c(p) = \frac{W_{\delta-M}^o(p)}{1 + W_p(p)W_{u-M}^o(p)} + \frac{W_K(p) \cdot W_p(p) \cdot W_{u-M}^o(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{u-M}^o(p)} = 0.$$

звідси

$$W_K(p) = -\frac{W_{\delta-M}^o(p)}{W_p(p)W_{u-M}^o(p)};$$

Якщо

$$W_{u-M}^o(p) = -\frac{0,27 \cdot e^{-159p}}{92,5p+1};$$

$$W_{\delta-M}^o(p) = \frac{0,12 \cdot e^{-185,5p}}{141,3p+1};$$

$$W_p(p) = -4,48 \cdot \left(1 + \frac{1}{111,9p} + 71,87p\right);$$

тоді можливо виконати відповідні перетворення для визначення передатної функції корегуючого зв'язку завдяки якому можливо отримати підвищену динамічну точність та відповідну якість регулювання.

$$W_K(p) = -\frac{\frac{0,12 \cdot e^{-185,5p}}{141,3p+1}}{-4,48 \cdot \left(1 + \frac{1}{111,9p} + 71,87p\right) \cdot \left(-\frac{0,27 \cdot e^{-159p}}{92,5p+1}\right)} = \frac{0,12}{-4,48 \cdot (-0,27)} \cdot e^{-26,5p} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{92,5p + 1}{(141,3p + 1) \cdot \frac{8042,253p^2 + 111,9p + 1}{111,9p}} \\
& = -0,1 \cdot e^{-26,5p} \cdot \frac{(92,5p + 1) \cdot 111,9p}{(141,3p + 1) \cdot (8042,253p^2 + 111,9p + 1)} = \\
& = -0,1 \cdot e^{-26,5p} \\
& \cdot \frac{10350,75p^2 + 111,9p}{1136370,3489p^3 + 15811,47p^2 + 8042,253p^2 + 141,3p + 111,9p + 1} = \\
& = -0,1 \cdot e^{-26,5p} \cdot \frac{10350,75p^2 + 111,9p}{1136370,3489p^3 + 23853,723p^2 + 253,2p + 1}.
\end{aligned}$$

Отримана передатна функція корегуючого зв'язку є такою, що фізично реалізовується.

Тоді передатна функція фізично реалізованого корегуючого зв'язку матиме вигляд:

$$W_K(p) = -0,1 \cdot e^{-26,5p} \cdot \frac{10350,75p^2 + 111,9p}{1136370,3489p^3 + 23853,723p^2 + 253,2p + 1}.$$

Структурна схема моделювання передатної функції корегуючого зв'язку, приведена на рис. 2.2, а її перехідна характеристика - на рис. 2.3.

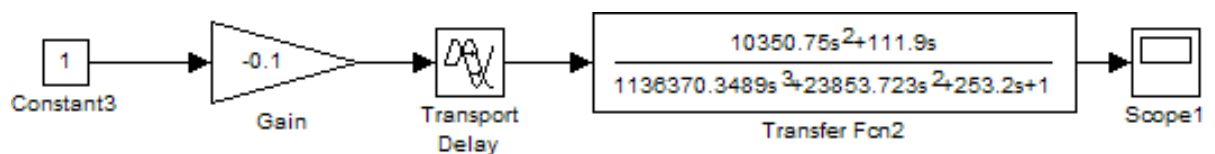


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання передатної функції коригуючого зв'язку

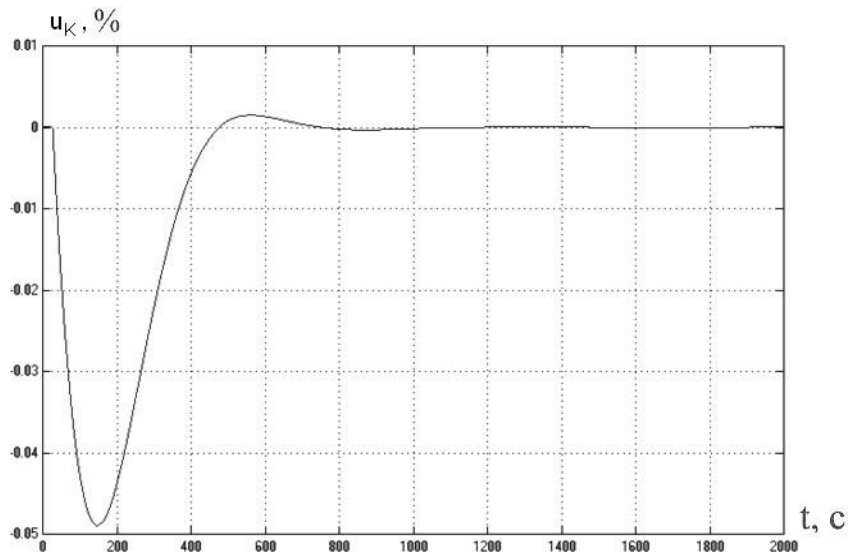


Рис. 2.3 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку

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

$$W_K(\delta) = \frac{\hat{E}}{e} \cdot e^{-T_{K1}p} \cdot \frac{\dot{\hat{E}}_2 \delta}{(\dot{\hat{E}}_3 \delta + 1)^2}.$$

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку приймемо наступні значення параметрів: $K_K = -0,1$; $T_{K1} = 26,5$; $T_{K2} = 111,9$; $T_{K3} = 253,2$. Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання, приведеною на рис. 2.4. Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку приведені на рис. 2.5, а результати моделювання - на рис. 2.6.

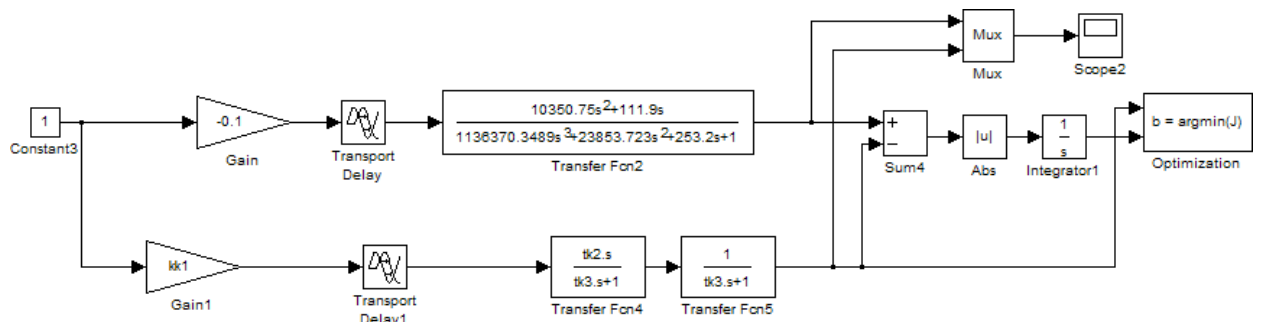
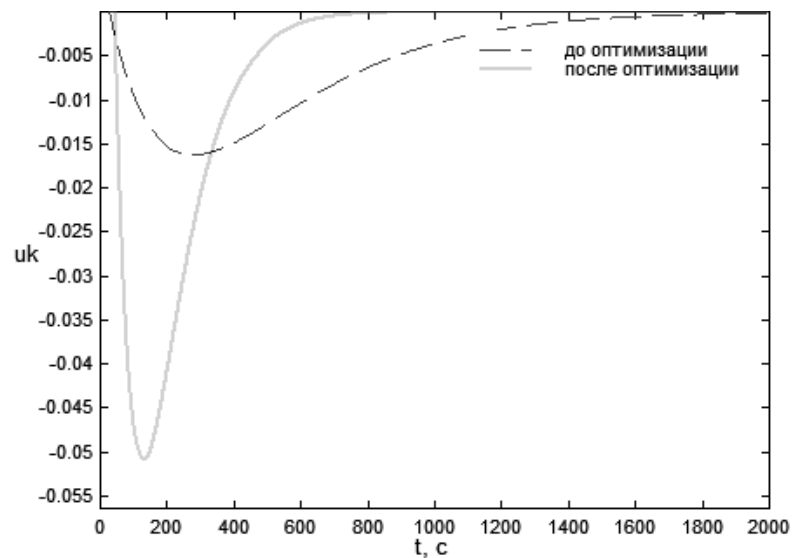


Рис. 2.4 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kk1	-0.14861	-1	-0.1	0	до - 13.318
tk1	44.7291	2.65	26.5	265	после - 2.085
tk2	79.333	11.19	111.9	1119	оптимизации.
tk3	85.4099	25.32	253.2	2532	Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 241

Рис. 2.5 – Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку

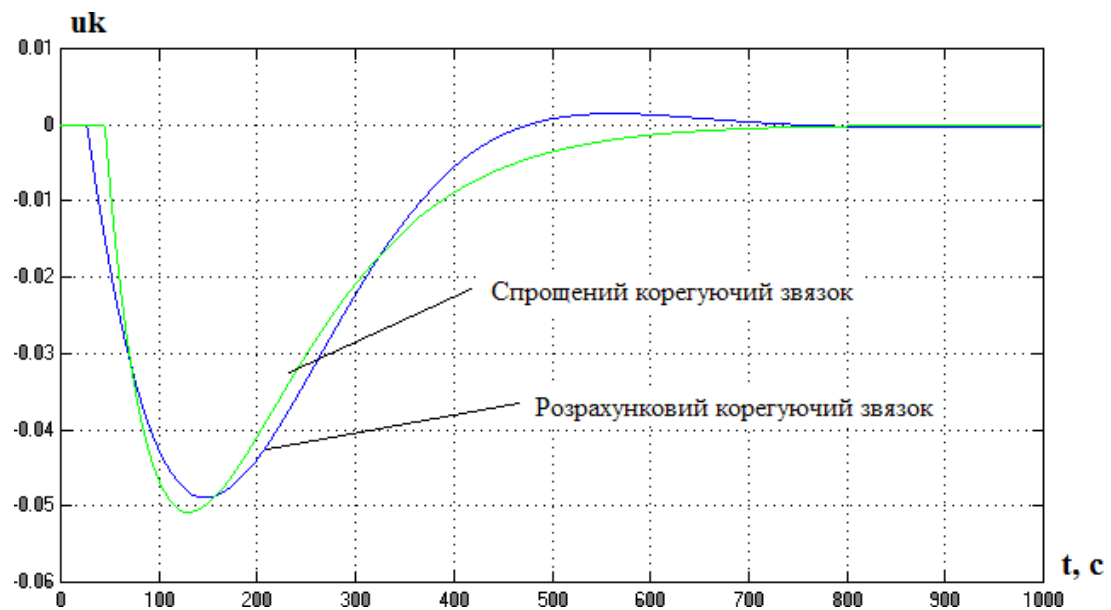


Рис. 2.6 – Перехідна характеристика розрахункового і спрощеного коригуючого зв'язку

Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку приведена на

рис. 2.7, а результати оптимізації - на рис. 2.8.

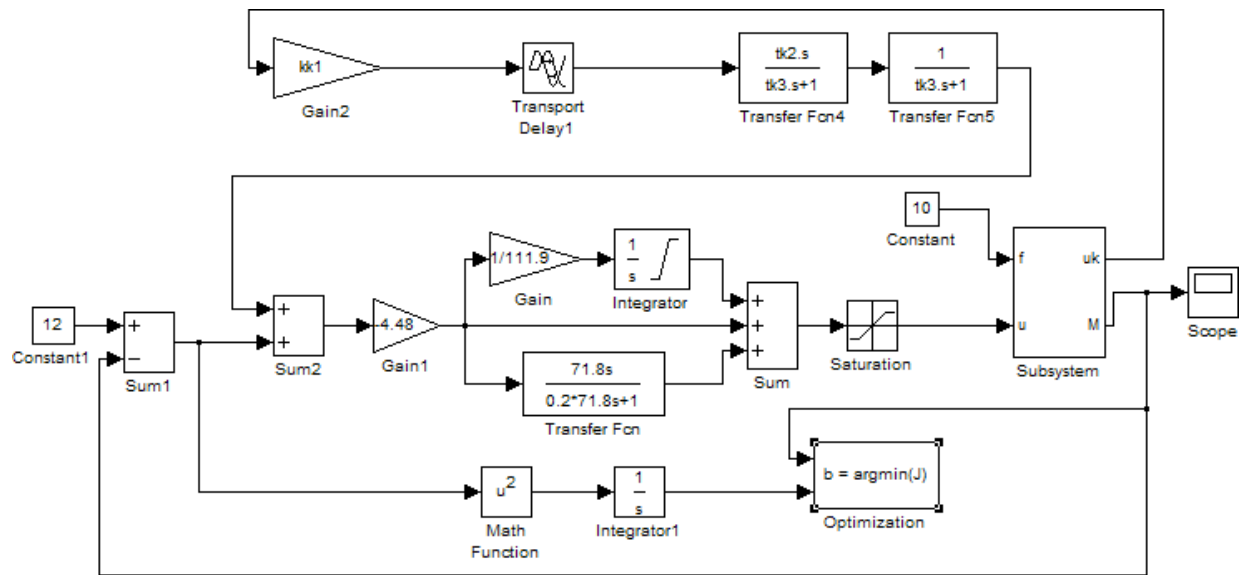
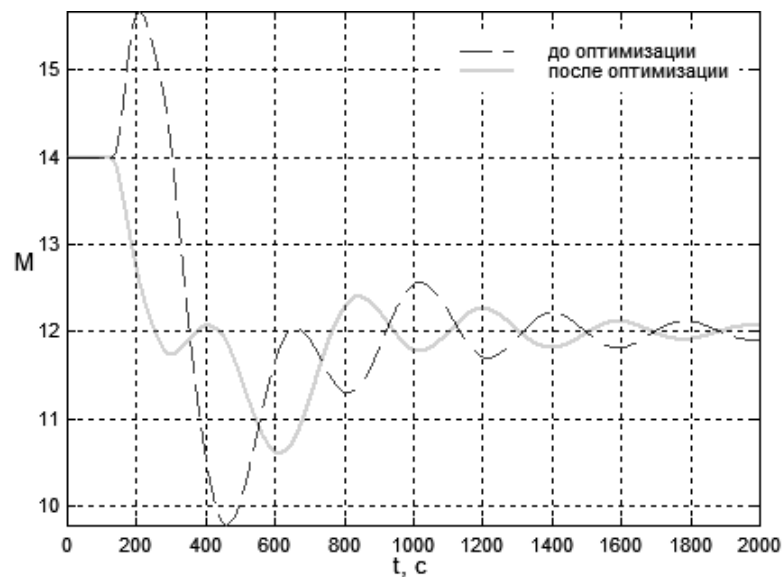


Рис. 2.7 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
kk1	-0.2215	-1	-0.148598	0	до - 2877.5674
tk1	2.65	2.65	44.7273	265	после - 992.8456
tk2	70.1222	11.19	79.3385	1119	оптимизации.
tk3	86.1294	25.32	85.4114	2532	Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1000
					фактическое - 170

Рис. 2.8 – Результати оптимізації параметрів коригуючого зв'язку

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

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОУ приведені на рис. 2.9. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОУ САР дає перехідні процеси, що сходяться, тобто САР є грубою.



Рис. 2.9 – Аналіз САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОУ

Як видно з результатів оцінки САР на грубість, найбільш "сприятливим" для управління є запізнювання, менше на 20% по каналу управління, стала часу залишається номінальною. Найбільш "несприятливим" для управління є поєднання параметрів ОУ, що відповідає запізнювання, більше на 20% , стала часу менше на 20% .

Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для

порівняння варіантів з номінальними параметрами, а також з параметрами ОУ "сприятливими" і "несприятливими" для управління приведена на рис. 2.10. Результати порівняння варіантів САР приведені на рис. 2.11 і зведені в таблицю 2.1.

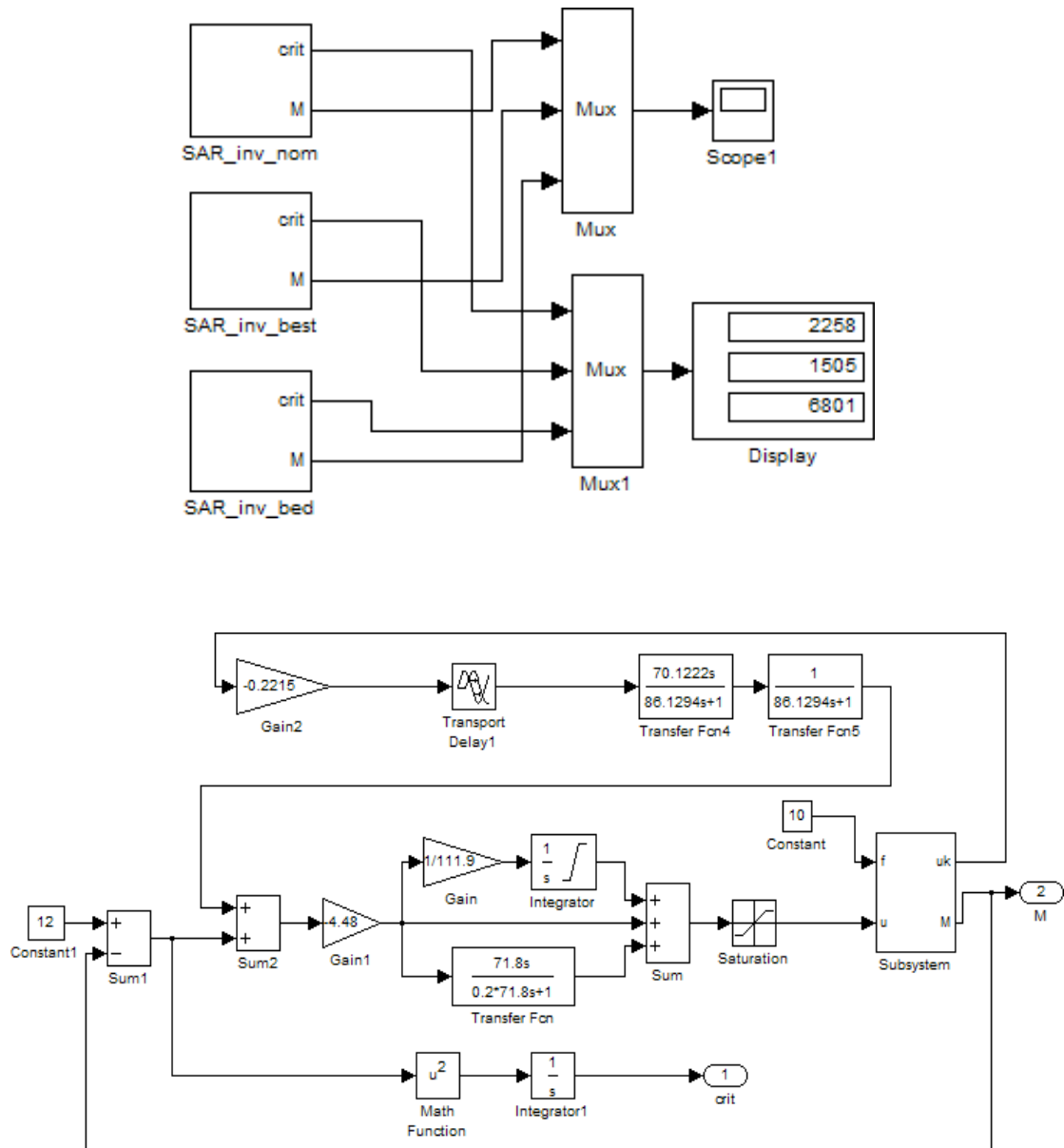


Рис. 2.10 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для порівняння варіантів з номінальними, "сприятливими" і "несприятливими" для управління параметрами ОУ

Таблиця 2.1 - Результати порівняння варіантів САР підвищеної динамічної точності

Поєднання параметрів ОУ	Прямі показники якості		Критерій
	ΔM^{MAKS}	T_{nn}, c	
Номінальні	3,5	600	2258
"Сприятливі"	2,2	1000	1505
"Несприятливі"	3	2000	6801

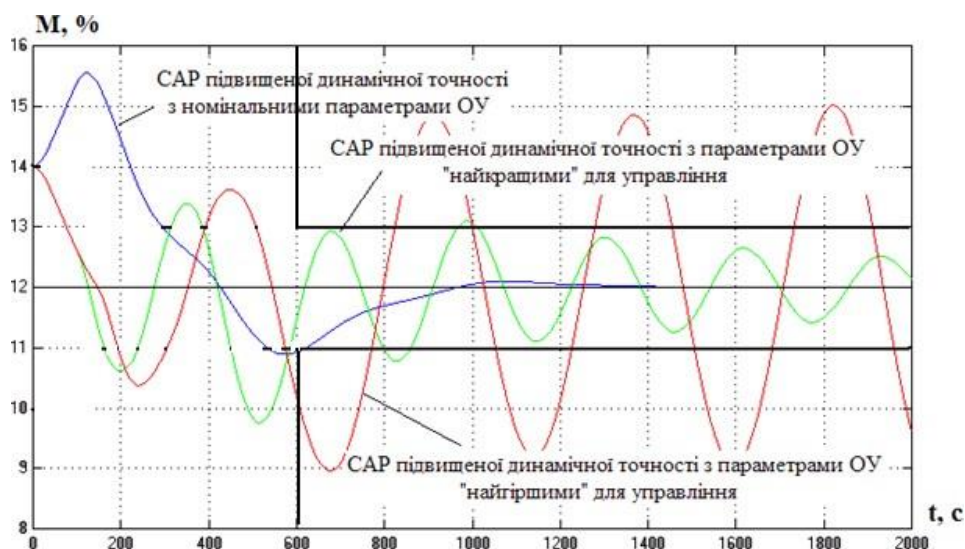


Рис. 2.11 – Результати порівняння варіантів САР підвищеної динамічної точності

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

2.2 Порівняльний аналіз САР базової структури і підвищеної динамічної точності (із коригуючими зв'язками)

Для порівняння якості роботи САР базової структури і підвищеної динамічної точності розроблена структурна схема моделювання, приведена на рис. 2.12. Результати порівняння приведені на рис. 2.13 і в таблиці 2.2.

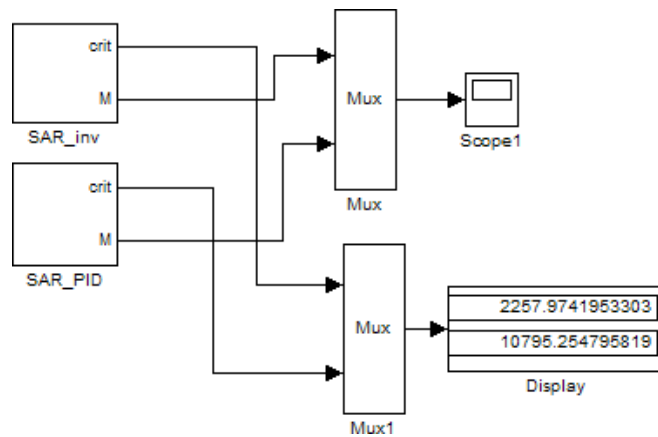


Рис. 2.12 - Структурна схема моделювання для порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

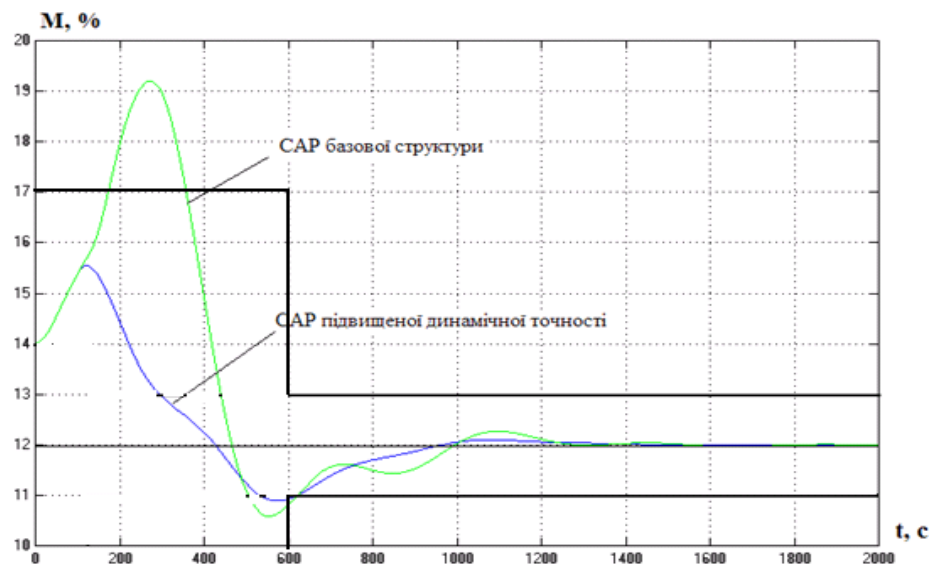


Рис. 2.13 – Перехідні процеси в САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

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

Структура САР	Прямі показники якості		Критерій
	ΔM^{MAXC}	T_{nn}, c	
Базова	7,2	1200	10795
Підвищеної динамічної точності	3,5	600	2257

Як показують результати досліджень варіантів САР, і САР базової структури, і САР підвищеної динамічної точності є грубими. Можемо сказати, що по показникам якості САР підвищеної точності є кращою за САР базової структури.

Якість процесу сушки овочів у стрічковій сушарці значною мірою залежить від якості регулювання вологості продукту на виході сушарки (на виході з п'ятої стрічки). За результатами досліджень можна зробити такі висновки: САР з ПД-регулятором являється кращою за САР з ПІ-регулятором по ряду показників якості. САР підвищеної точності, хоч і не сильно, але є кращою за САР базової структури. Отже можемо сказати, що підвищення динамічної точності САР, незважаючи на її ускладнення при цьому, позитивно впливає на якість(точність) регулювання вологості продукту на виході сушарки (на виході з п'ятої стрічки), чого і потрібно було досягнути.

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

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

До останнього десятиліття ХХ-го століття в побудові регуляторів домінував традиційний підхід. Однак регулятори, побудовані на основі зазначеного підходу, не завжди дозволяють здійснювати робастне керування складними нестаціонарними об'єктами. Дана обставина дала поштовх розвитку нового наукового напрямку – інтелектуальних систем керування. В основу концепції інтелектуальності покладене вміння працювати з формалізованими знаннями людини (експертні системи, нечітка логіка), або властиві людині навчання і мислення (штучні нейронні мережі і генетичні алгоритми). Нечітке керування (керування на основі методів теорії нечітких множин) використовується при недостатньому знанні об'єкта керування, але наявності досвіду керування їм, також нечітке керування використовується у нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка, а також у випадках, коли за умовою завдання необхідно використовувати знання експерта. Прикладом може бути доменна піч або ректифікаційна колона, математична модель яких містить багато емпіричних коефіцієнтів, що змінюються в широкому діапазоні. У той же час кваліфікований оператор досить добре управляє такими об'єктами, користуючись показаннями приладів і накопиченим досвідом.

Виходячи з вищесказаного актуальність використання нечіткої логіки у рамках синтезу систем автоматичного управління розглянутим об'єктом - стрічковою конвективною сушаркою цілеспрямовано якщо канал регулювання буде характеризуватись нелінійною характеристикою або параметричною невизначеністю в діапазоні регулювання. Це є особливою проблемою в сфері автоматизації коли необхідно управляти 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 стрічковій конвективній сушарки 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.

3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделі каналу регулювання який характеризується нелінійною статичною характеристикою

Актуальності застосування системи управління, побудованої на базі апарата нечіткої логіки, для розглянутого у даній роботі об'єкта управління, необхідно підтвердити, а це головним чином за рахунок переходу 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 відповідної моделі каналу регулювання додати відповідну нелінійну ланку. Таким чином, нелінійність необхідно реалізувати за допомогою включення блоку Look up Table у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта управління з додатковим блоком Look up Table, що 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 « $u_1 - M$ », яка має вигляд, представлений на рисунку 3.2.

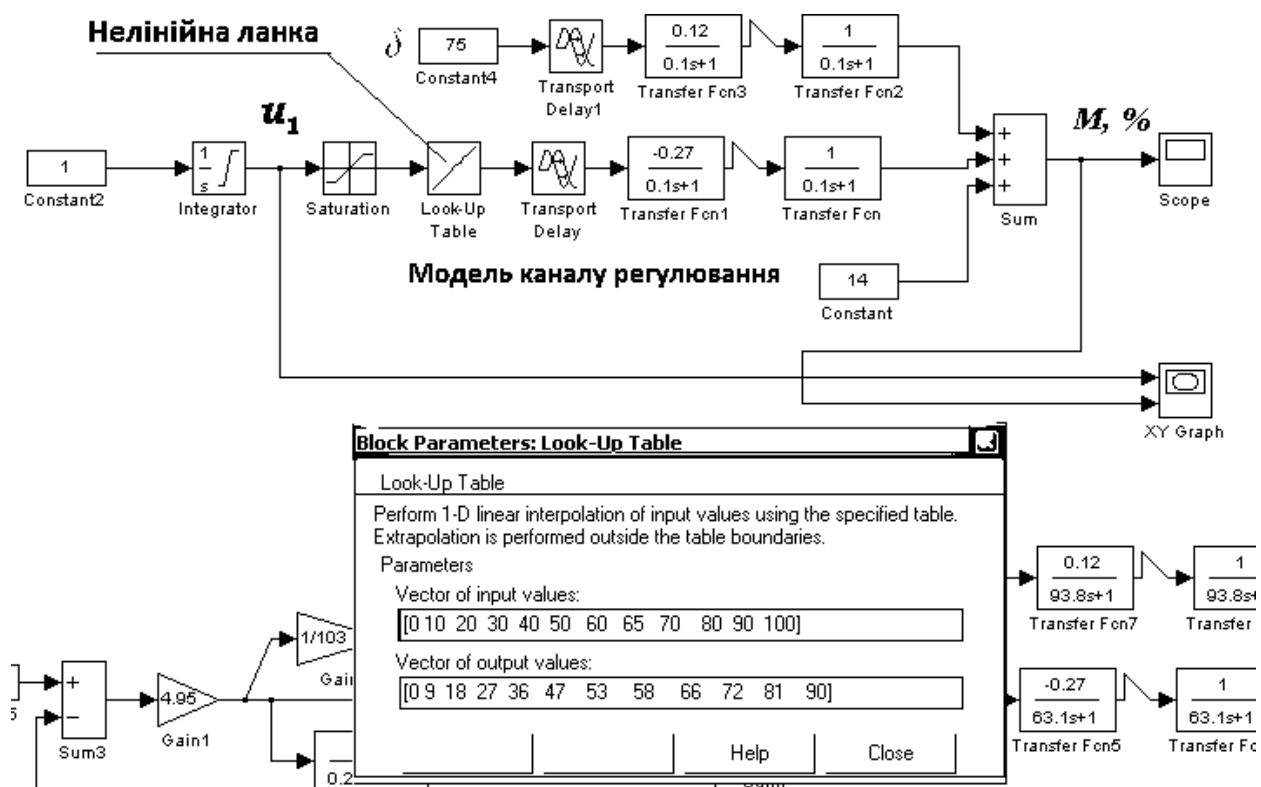


Рисунок 3.1. Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

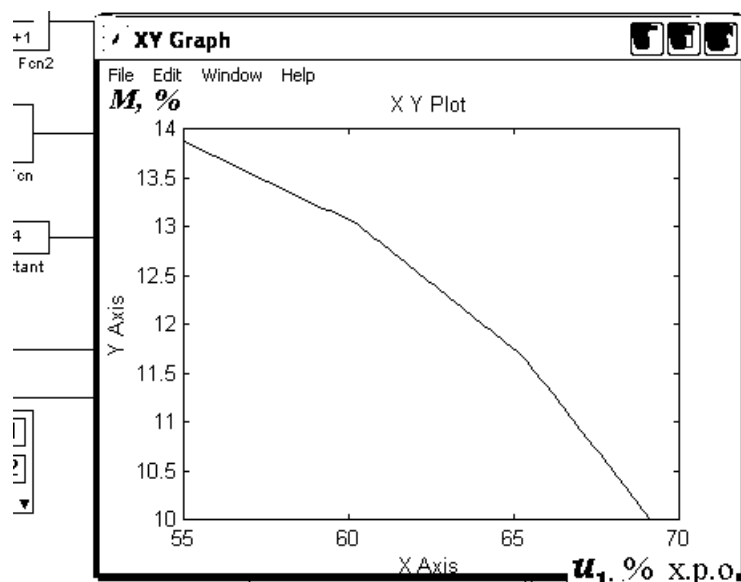


Рисунок 3.2. Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

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

3.3 Параметричний синтез САУ з традиційним ПД регулятором для об'єкта який характеризується нелінійною характеристикою за каналом регулювання

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 регулятора системи управління в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів при мінімізації за наступним квадратичним та модульним критеріями якості роботи системи:

•

$e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням вологості продукту на виході сушарки.

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

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

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

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів вологість продукту на виході сушарки (на виході з п'ятої стрічки) M повинна підтримуватися на рівні 12 % з точністю ± 1 %. За цим параметром допустимі короточасні відхилення до ± 5 % протягом часу не більше 600 с. Всі ці дані відповідають перехідній характеристиці представленої після оптимізації.

Відповідні початкові параметри оптимізації були введені у відповідному вікні за стандартними умовами (рисунок 3.4). Це 100 кроків оптимізації, достатньо великий діапазон пошуку значень оптимізуючи параметрів більш чім на 50%. Параметри канали регулювання були визначені такими як у лінійній моделі отриманою в результаті відповідної ідентифікації.

Необхідно зазначити що оптимізацію проводили поетапно з урахуванням не лінійності характеристики каналу регулювання як за квадратичним так і за модульним інтегральним критерієм якості роботи системи. Але остаточні значення були отримані при тих же умовах що бали при оптимізації відповідної попередньої лінійної системи. На рисунку 3.5 представлена вікно результату оптимізації за модульним критерієм на 40 кроків. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання, за вологістю продукту на виході сушарки, 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. Остаточні результати були отримані при оптимізації за квадратичним інтегральним критерієм якості роботи системи на 100 кроків. Оптимізація була закінчена на 85 кроці оптимізації при визначених оптимальних параметрах настройки ПД-регулятора.

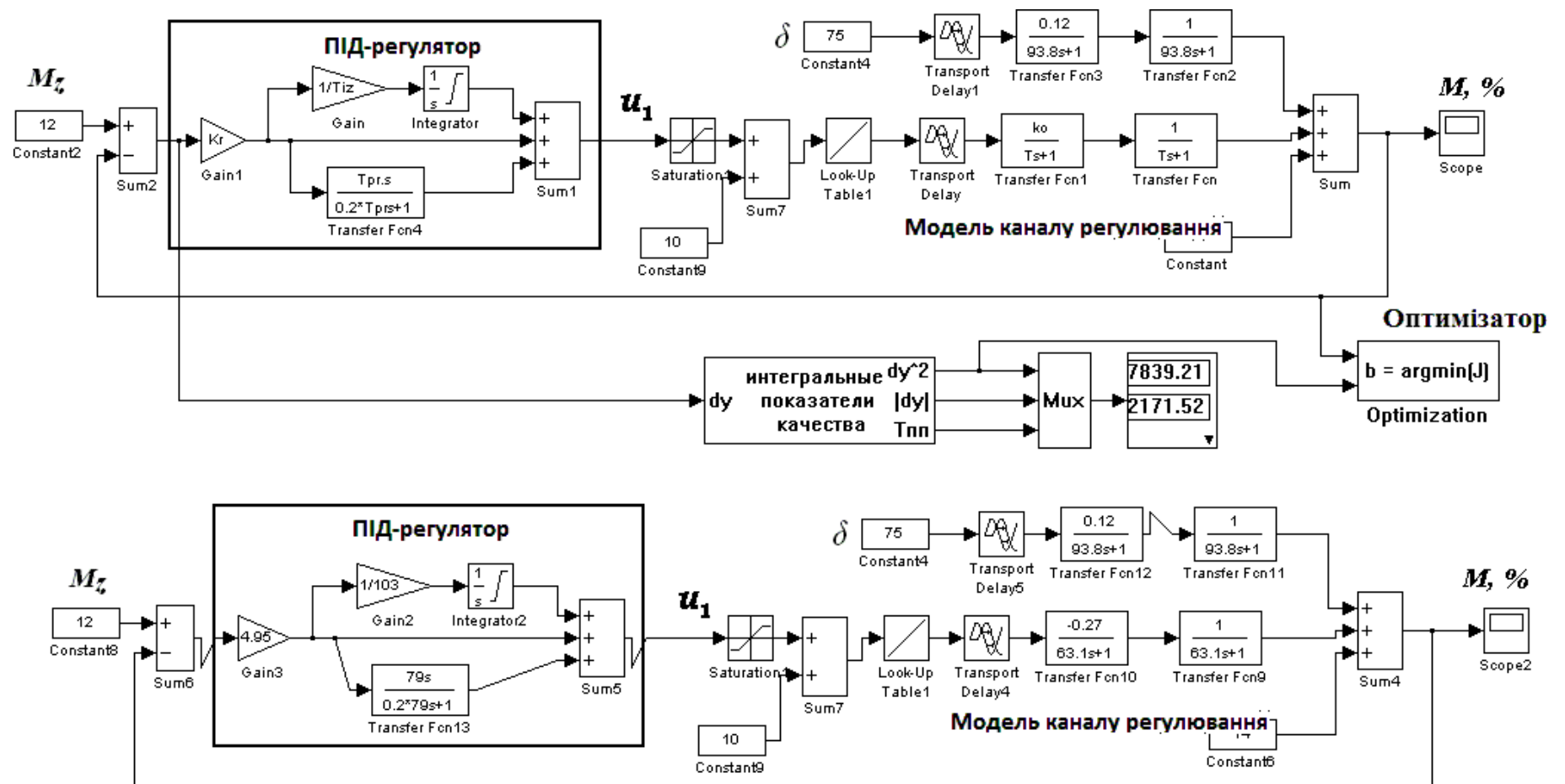


Рисунок 3.3. Структурна схема моделі САУ з традиційним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором, та .

структурна схема моделі оптимізованої САУ що реалізована засобами MATLAB\Simulink

Оптимизация

Конкретизация задачи оптимального параметрического синтеза (ОПС)

☐ ОПС в условиях параметрической неопределенности ОУ.
☒ ОПС при фиксированных параметрах ОУ.

Параметры объекта управления (ОУ)

Имена параметров: ko tau T
 Номинальные значения: -0.27 118 63.1
 Нижние значения диапазонов:
 Верхние значения диапазонов:

Оптимизируемые параметры (аргументы)

Имена параметров: Kr Tiz Tpr
 Начальные приближения: -2.15 150 30
 Нижние ограничения: -10 0 0
 Верхние ограничения: 0 400 400

Условия оптимизации (Симплекс метод Нелдера-Мида)

Максимальное количество шагов процедуры оптимизации: 100
 Минимальное приращение аргументов: 0.01
 Минимально значимое приращение критерия: 0.001

Визуализация результатов

Количество графиков: 1
 Имена переменных отображаемых на графиках: y

Старт Отмена

Sum Scope

b = argmin(J)
Optimization

Рисунок 3.4 Вікно вводу початкових параметрів для оптимізації САР з традиційним ПД регулятором

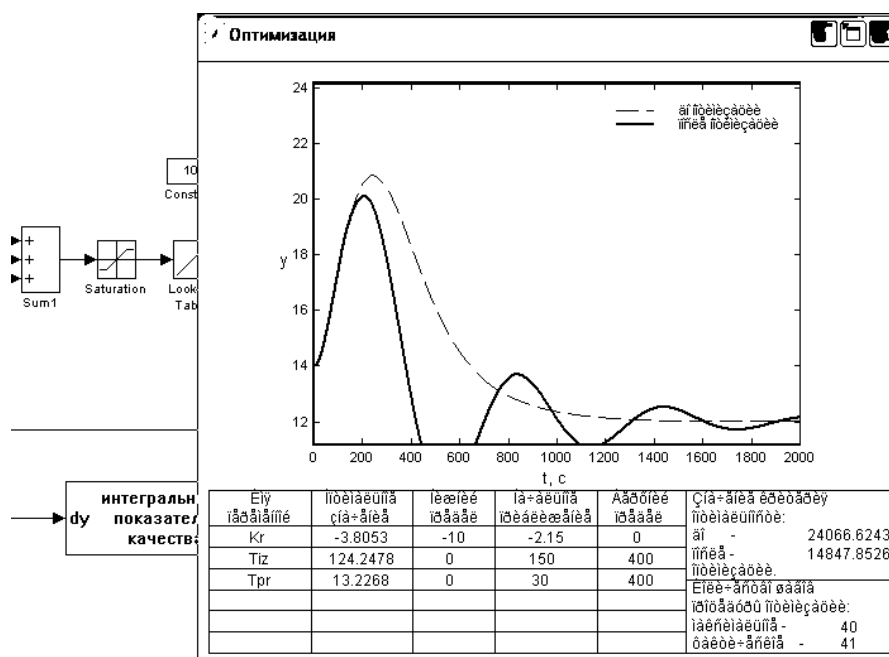


Рисунок 3.5 Вікно результату оптимізації САР з традиційним ПД регулятором та нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

Також біла проведена перевірка на грубість САР з каналом регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою. САР була відповідно з оптимізованим ПД-регулятором за квадратичним критерієм якості роботи системи. Параметри перевірки системи на грубість представлені на рисунку 3.8. та 3.9. Значення цих параметрів не відрізняються від попереднього випадку коли була виконана перевірка на грубість системи з лінійним каналом регулювання.

Проверка на грубість

Изменяющиеся параметры ОУ:

Имена параметров:

Номинальные значения:

Нижние значения диапазонов:

Верхние значения диапазонов:

Визуализация результатов:

Количество графиков:

Имена переменных отображаемых на графиках:

Старт Отмена

Block diagram components: Transport Delay1, Transfer Fcn1, Transport Delay, Transfer Fcn.

3.8 Вікно вводу параметрів перевірки системи на грубість

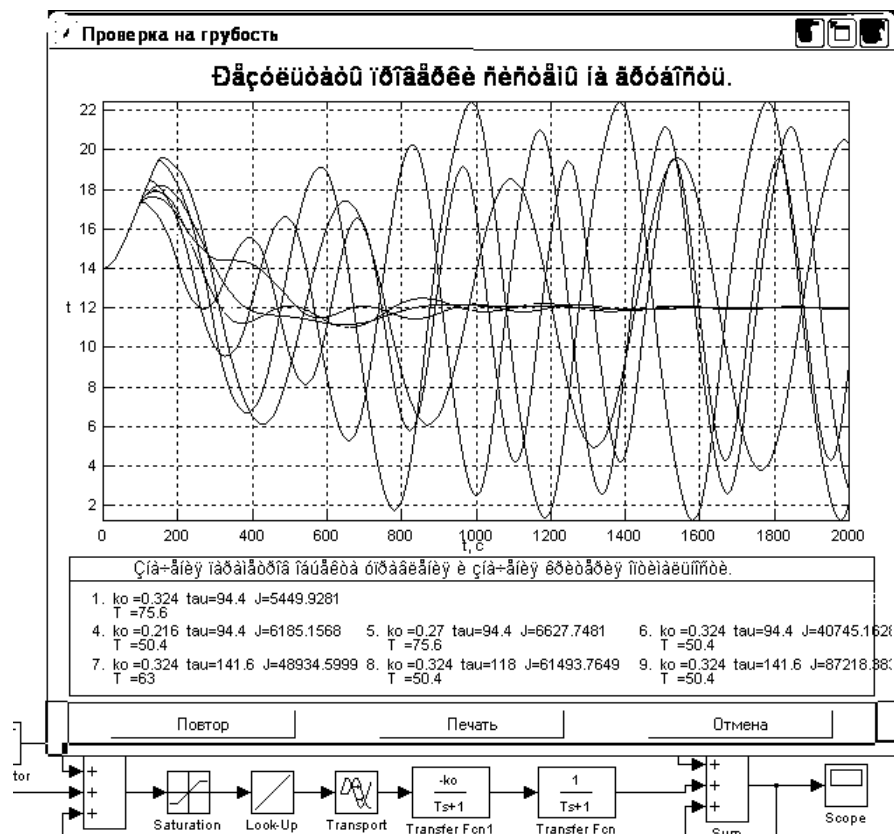


Рис. 3.9 – Вікно результатів перевірки САР на грубість

Згідно з результатами, що представлені на рисунку 3.9, можна зробити висновок що за грубістю нелінійна система така ж сама як САР з ПД-регулятором та з каналом регулювання який характеризується лінійною статичною характеристикою. Згідно з представленими результатами на рисунку 3.9 систему можна вважати не значно грубою бо де які перехідні характеристики відповідають системі що знаходиться на границі стійкості.

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

Нечітка логіка в ПД-регуляторах використовується переважно двома шляхами: для побудови самого регулятора і для організації підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора. Оба шляхи можуть використовуватися в ПД-контролері одночасно. В нашому випадку нечітка логіка використовується для побудови самого регулятора за відомими схемами. Складність опису статичних режимів роботи об'єкта приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними. Таким чином, у справжній роботі була реалізована модель САР із Fuzzy – нечітким регулятором.

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

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазіуправління: фазіфікація, логічного висновку і дефазіфікація. Спрощена структурна схема розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.10. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

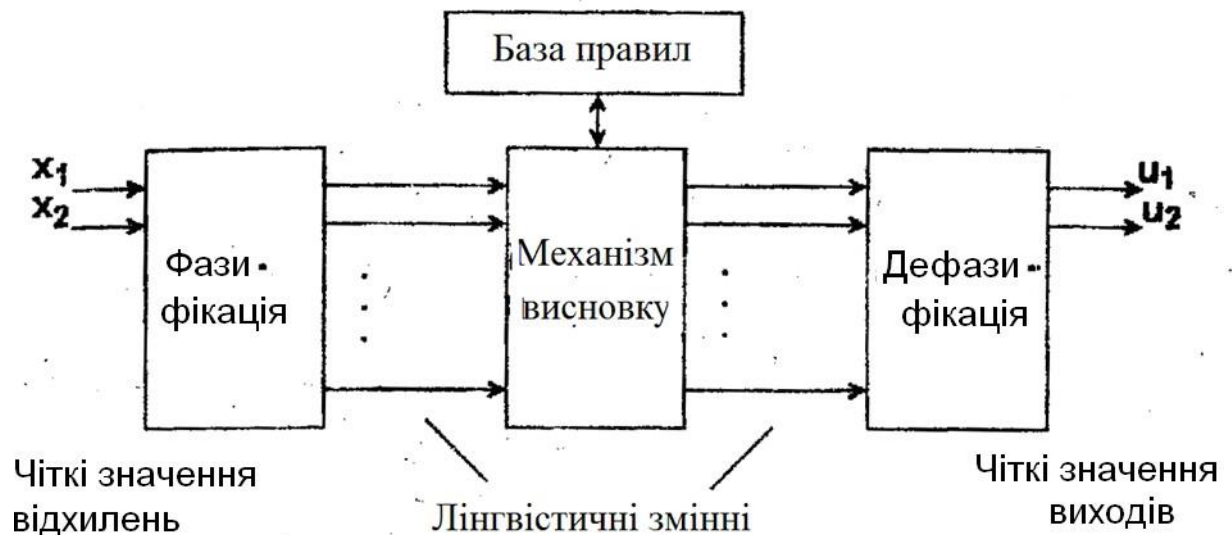


Рисунок 3.10. Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

Всі визначені блоки (фазифікація, блок логічного розв'язку, дефазифікація), що представлені на рисунку 3.10, 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 3.11 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора продукту на виході сушарки 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 - чисельні значення вхідних параметрів, $z_1 = f(x_1, \dots, x_n)$ - довільна чітка функція.

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

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

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

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

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

де C_1, C_2 – звичайні (чіткі) числа.

Далі алгоритм виконується за наступними етапами:

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

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

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

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

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

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

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

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

де n – загальна кількість активних правил нечітких продукцій

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

П1: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика позитивна 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 $\Delta u_1 = -w_2$;

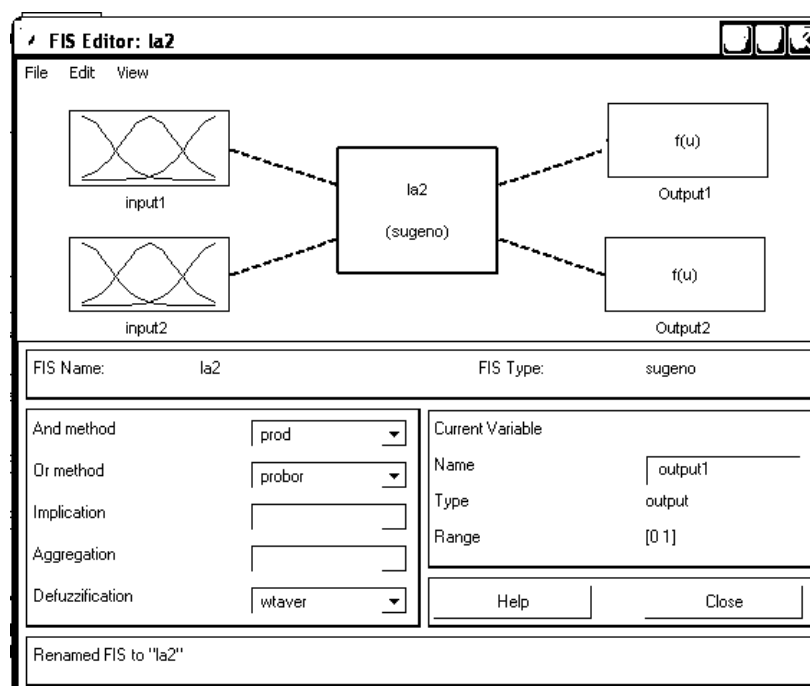


Рисунок 3.11. Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

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 $u_1 = w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w2$;

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

Відповідно вище представленим правилам складемо таблицю баз знань для НЛР вологості продукту на виході сушарки.

Як видно з рисунку 3.11, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки регулювання (input2). Для змінної input1 задаємо три трикутні функції приналежності «trimf». Це проста функція приналежності і найбільш часто застосовується. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

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

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

b - найбільш можливе значення змінної

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.12 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 3.13.

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 3.14.

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора вологості продукту на виході сушарки

e_1 Δe_1	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = 100;$ $\Delta u_1 = 0,1;$	–
Z	$u_1 = 100;$ $\Delta u_1 = 0,1;$	$u_1 = 0;$ $\Delta u_1 = 0;$	$u_1 = -100;$ $\Delta u_1 = -0,1;$
PE	–	$u_1 = -100;$ $\Delta u_1 = -0,1;$	–

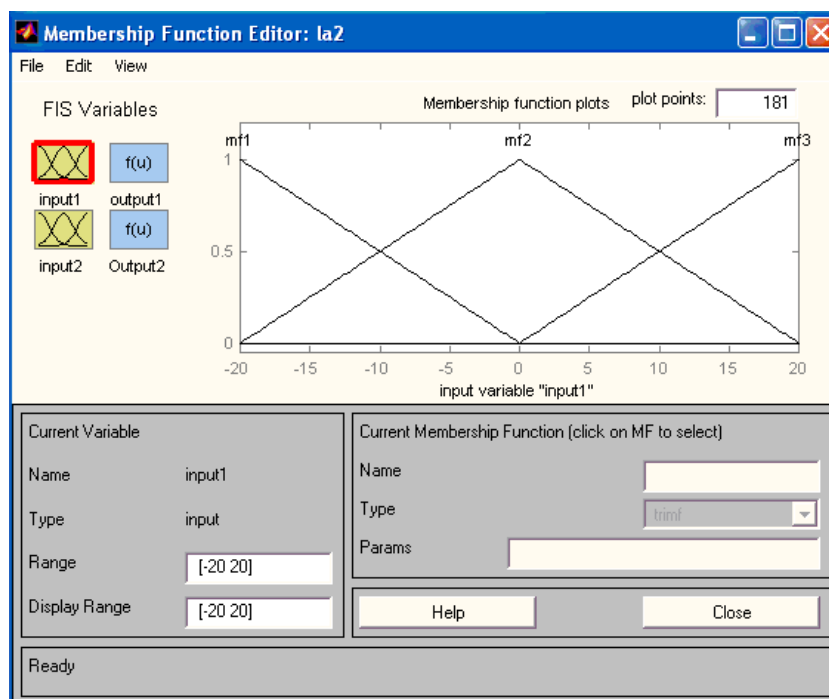


Рисунок 3.12. Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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

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

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

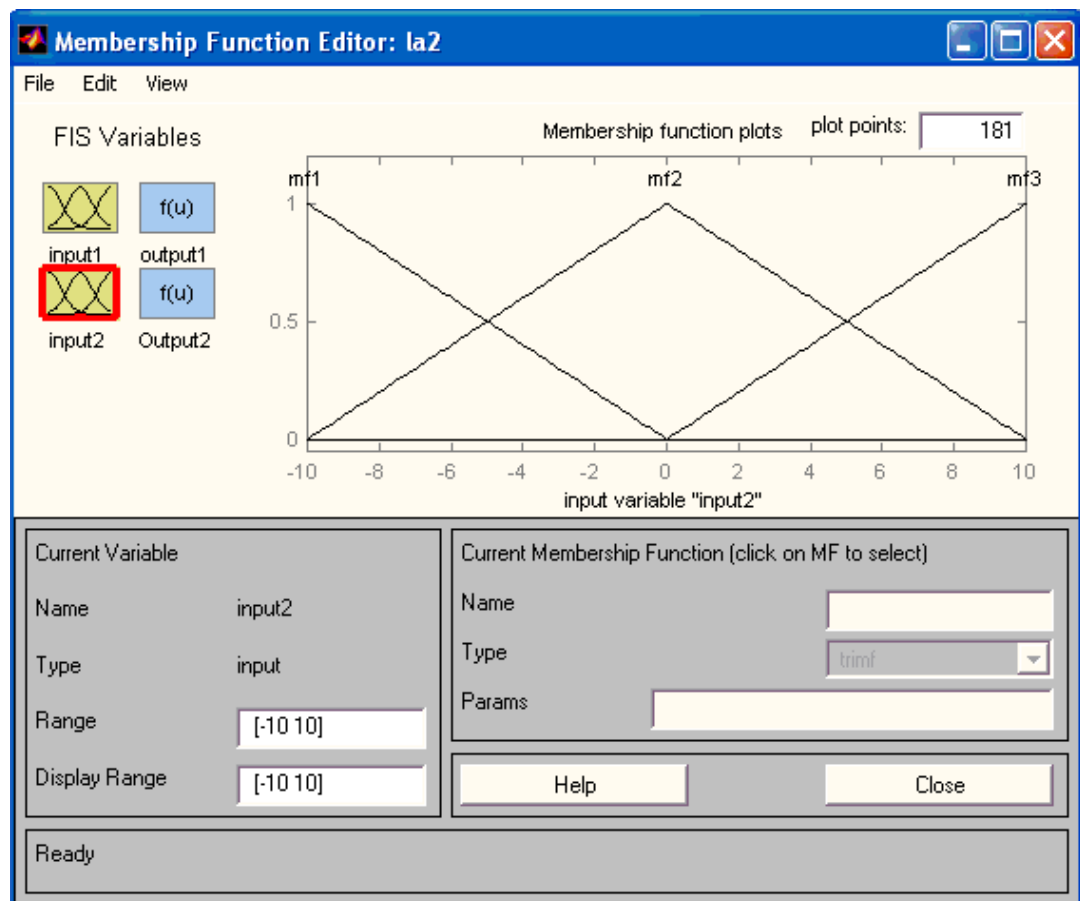


Рисунок 3.13. Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів C_i згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на рисунку 3.15. 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.

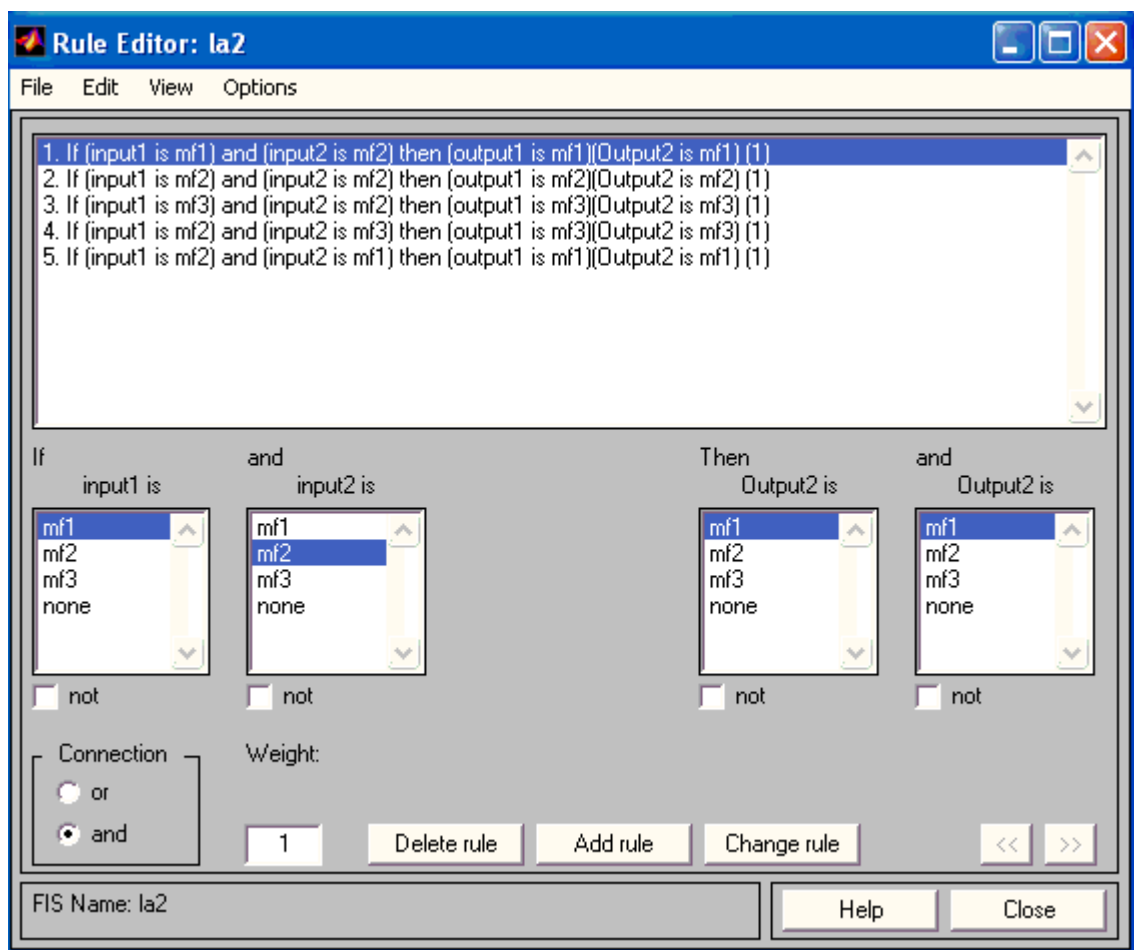


Рисунок 3.14. Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

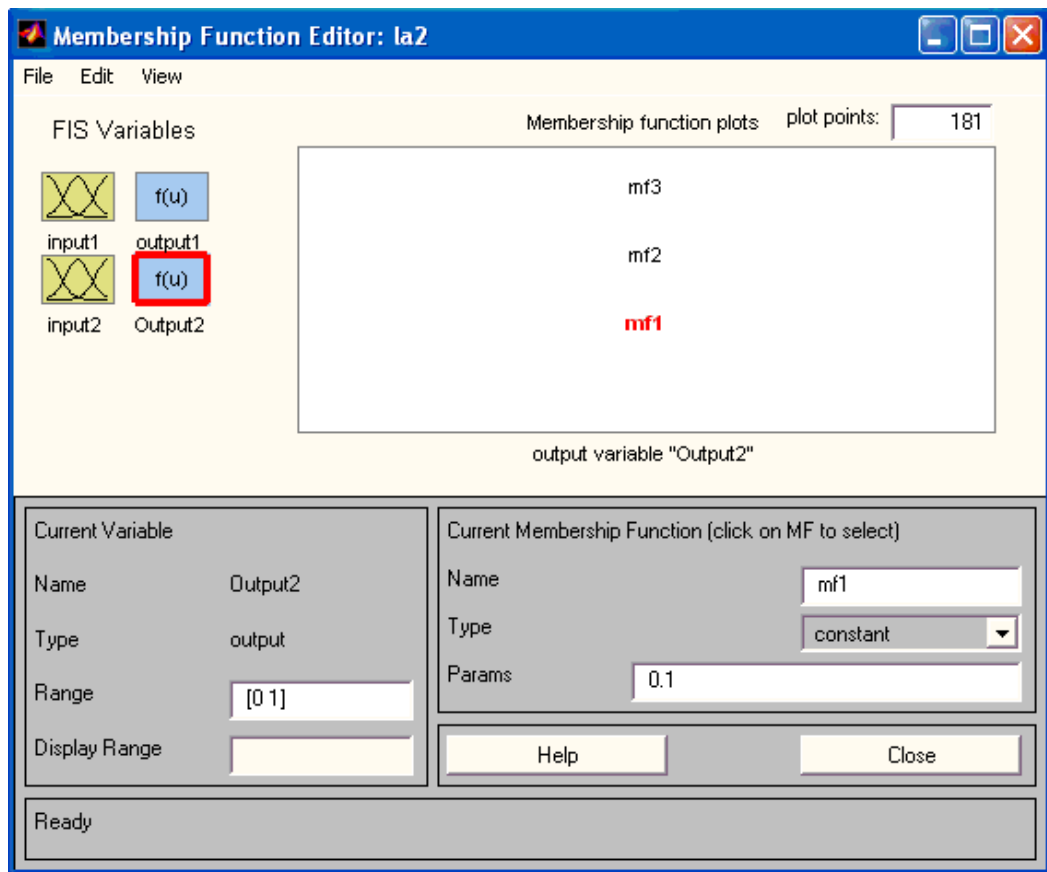


Рисунок 3.15. Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з нечітким регулятором, фрагмент якої представлений на рисунку 3.16. З рисунку 3.16 видно, що управляюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

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

приріст управляючої дії від нечіткого регулятора;
управляюча дія з затримкою за часом .

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.

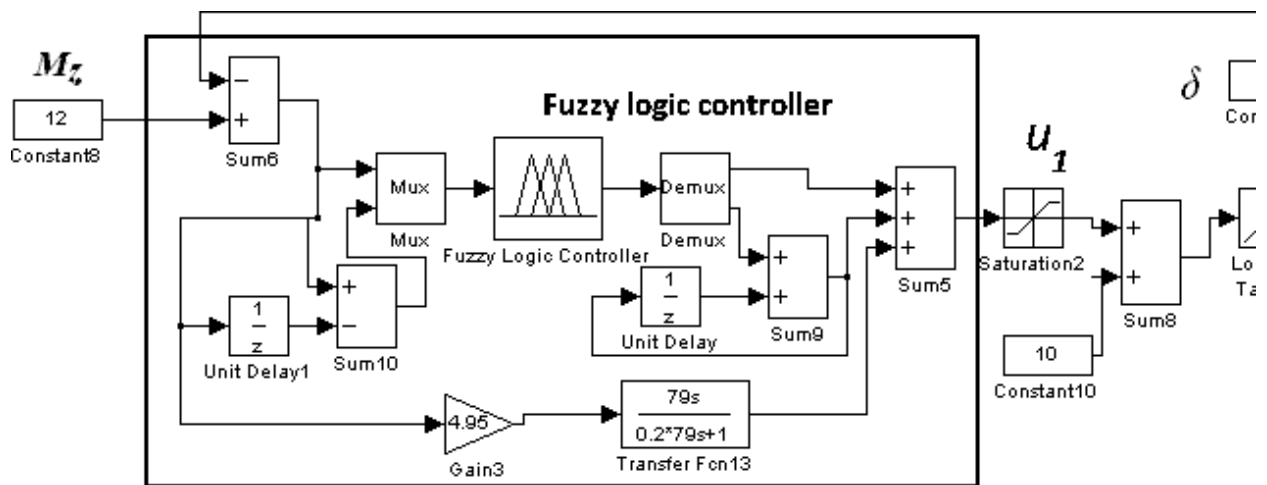


Рисунок 3.16. Фрагмент схеми моделювання САУ з нечітким логічним регулятором

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

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

На рисунку 3.17 представлені відповідні схеми моделювання САУ з ПД регулятором та САУ з нечітким регулятором якій відтворює ПД складову ПД регулятора. Як можна побачити з рисунку диференційна Д- складова однакова в різних системах управління. Такі системи були представлені паралельно для ви значення відповідних перехідних характеристик для порівняльного аналізу за прямими показниками якості регулювання.

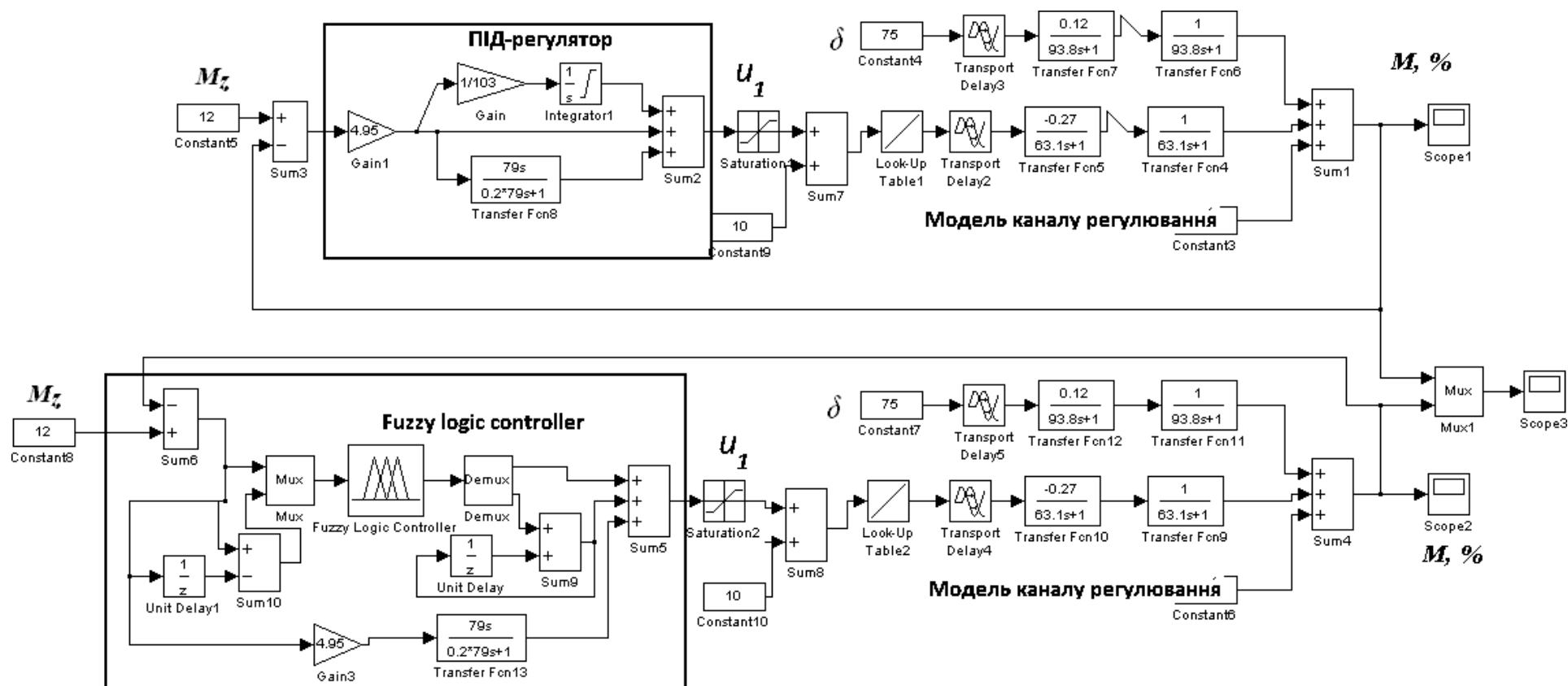


Рисунок 3.17. Структурні схеми моделей САУ з ПІД-регулятором і САУ з нечітким регулятором для отримання графіків перехідних процесів з метою порівняльного аналізу функціонування різних САУ

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

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

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

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

.....

П n : 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 3.18 та 3.19 представлені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам – «приріст управляючого впливу» великий (PE), «приріст управляючого впливу» приблизно нульовий (Z), «приріст управляючого впливу» 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 $\mu_{\Sigma}(z)$.

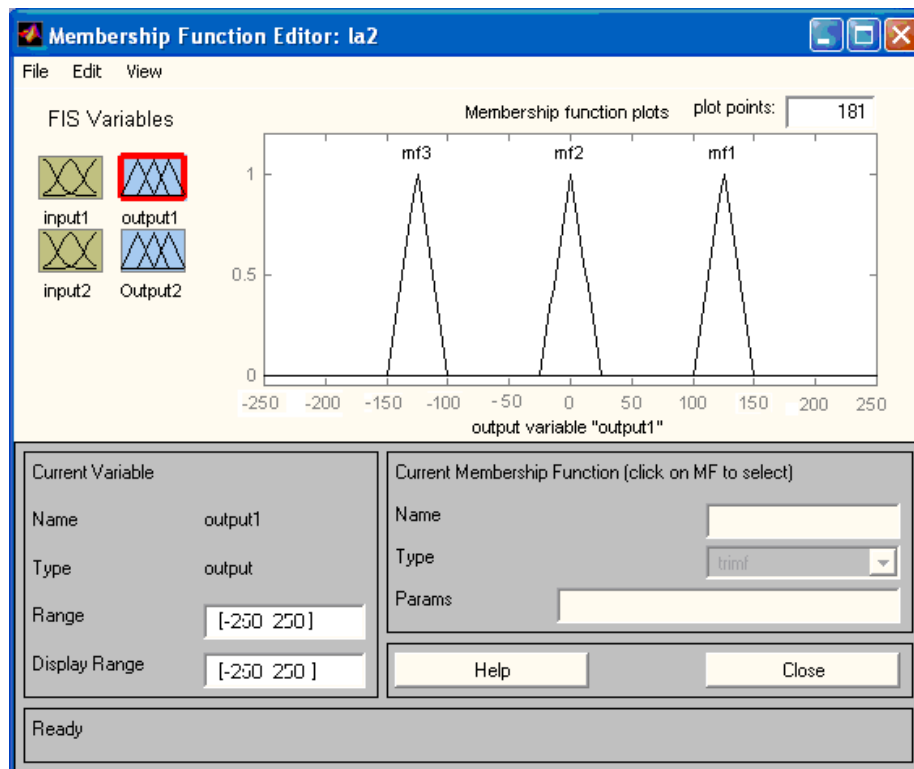


Рисунок 3.18 Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

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 .

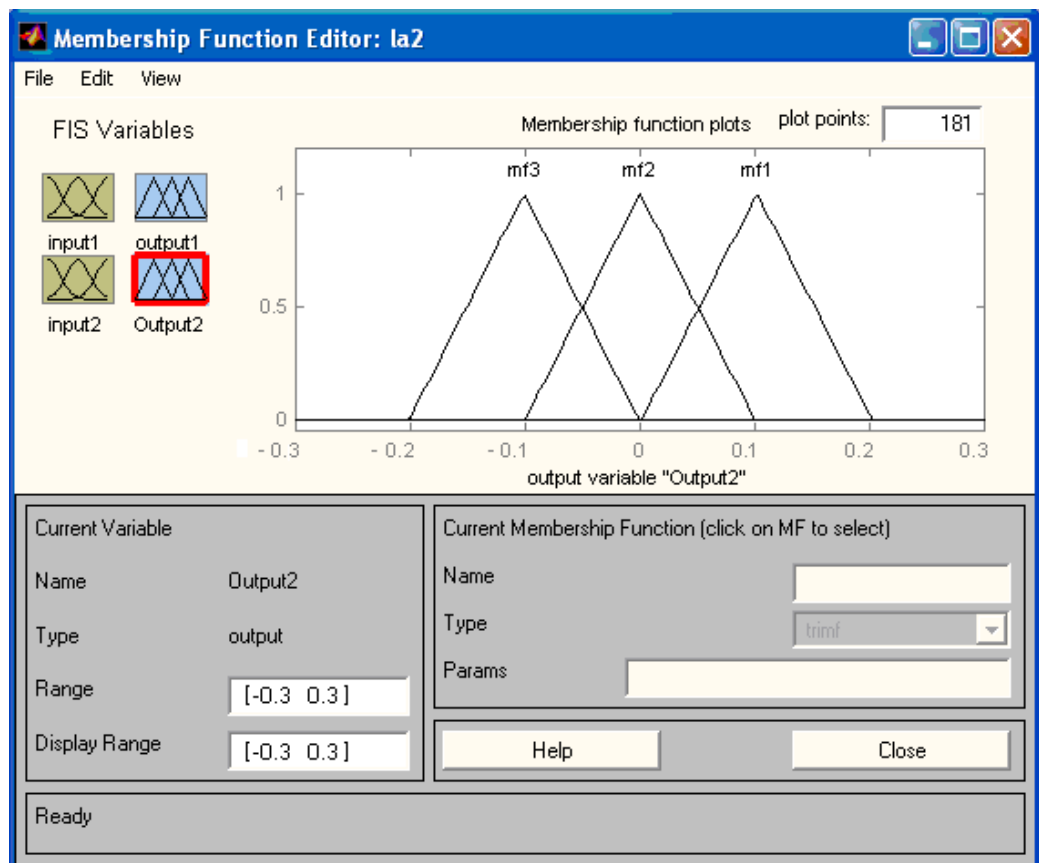


Рисунок 3.20 Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безлічей – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

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

Таким чином, на рисунку 3.21 представлені графіки перехідних процесів при детермінованому збурюванні. Згідно з графіками перехідних процесів можна зробити висновок що завдяки використанню нечіткого регулятора в системі не дало покращати якість регулювання за вологістю продукту на виході сушарки. Таким чином робота далі буде пов'язана з перетворенням системи з нечітким регулятором в нейромережеву систему управління для подальшої процедури оптимізації.

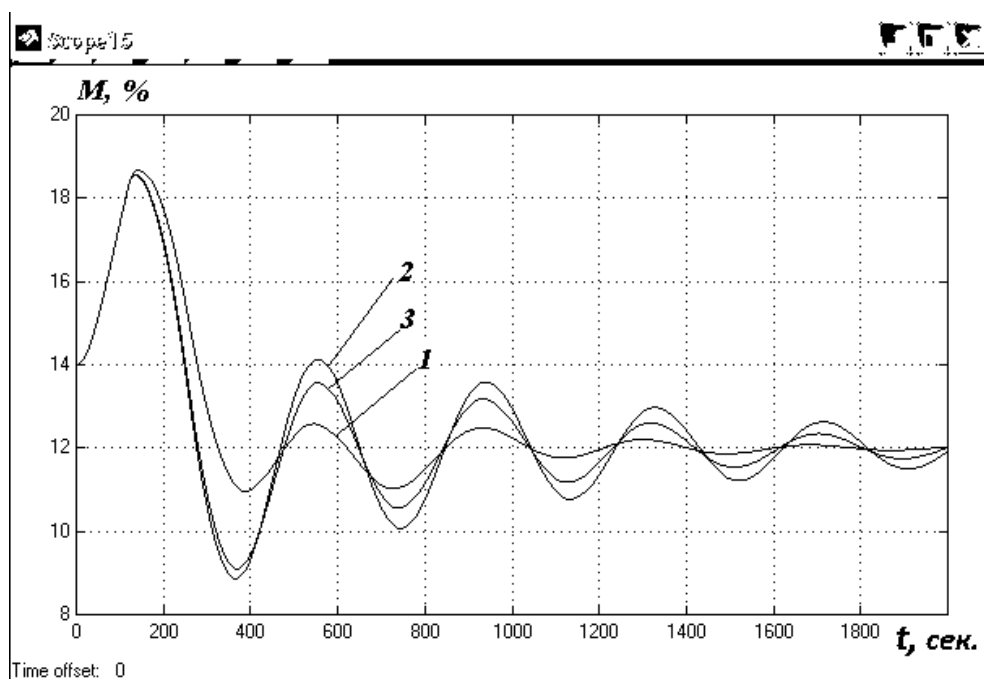


Рисунок 3.21. Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графіки 1– перехідний процес у САУ з ПД регулятором; 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором який функціонує згідно з алгоритмом виведення Мамдані; графік 3 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором з висновком Сугено -0;

3.6 Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління

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

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

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

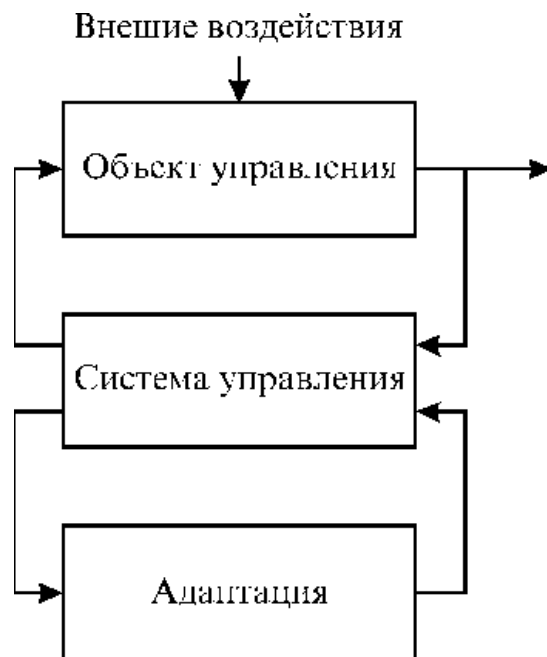


Рисунок 3.22. Загальна схема адаптивної системи керування

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.

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

Використання ШНМ дозволяє вирішувати завдання керування нелінійним об'єктом шляхом створення адаптивної системи управління (СУ) з нейроконтролером (НК), що навчається. Тут під навчанням мається на увазі процес вироблення в СУ бажаної реакції на зовнішні сигнали шляхом багаторазових впливів на систему зовнішнім корегуванням. Зовнішнє коректування здійснюється “учителем”, якому відома бажана реакція СУ на певні впливи. Таким чином, при навчанні “учитель” повідомляє системі додаткову інформацію про те, вірна або невірна її реакція (Рисунок 3.23)

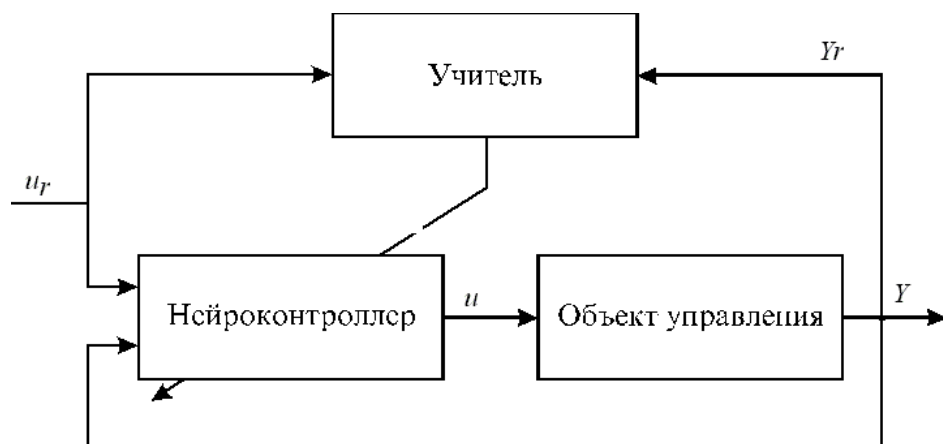


Рисунок 3.23 Загальна схема системи керування з нейроконтролером, що навчається

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

Існує безліч підходів до застосування ШНМ у якості НК. Наприклад, пропонується використовувати ШНМ як нелінійні підсилювачі при

інтегральній, диференціальній та пропорційній частинах ПД-регулятора (рисунок 3.24).

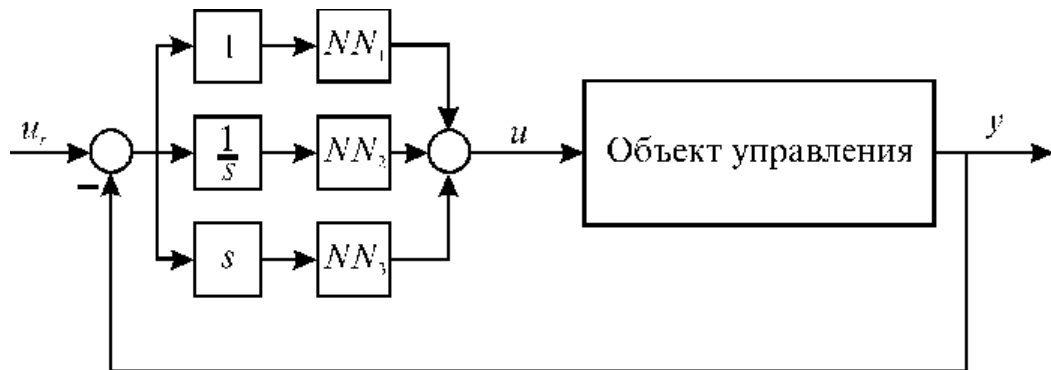


Рисунок 3.24 Система керування з комбінованим ПД-нейрорегулятором

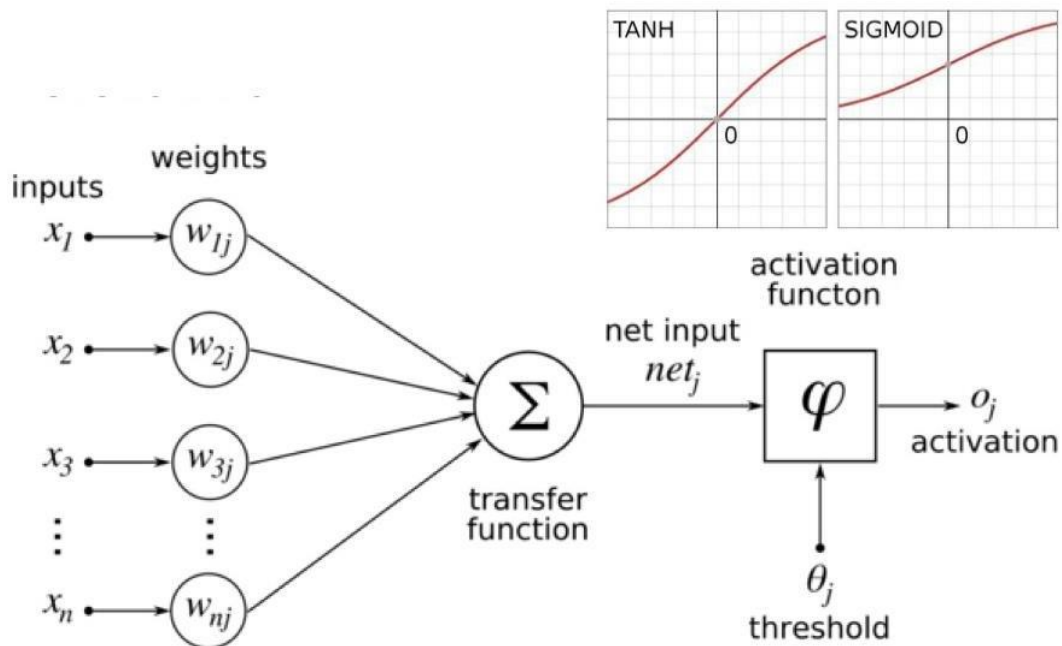
Математична модель, що застосовується у якості нейронелементу у нейромереживому алгоритмі управління, аналогічна відомим найбільш розповсюдженим моделям, які схожі з формальною моделлю нейрона Маккаллоха – Питса. У даній моделі сигнали, що поступили на входи нейроелементу, множаться на свої ваги. Сигнал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

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

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

Графічне представлення моделі нейроелемента з графічним представленням різних функцій активації що диференцовані відображено на рисунку 3.25. Таки нейронелементи будуть складати нейронні мережі які

відтворюють нелінійне перетворення в різних складових регулятора як показано на рисунку 3.24.



Рисунк 3.25 Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

В якості нелінійних перетворювачів будимо використовувати багат шарові нейронні мережі з відповідними функціями активації. Відомо, що одношарова нейронна мережа має обмежені можливості. Багат шарова чотирьох-шарова вже надлишкова для рішення різних задач. В нашому випадку будемо використовувати багат шарову нейронну мережу у якості нелінійного перетворювача.

Багат шарові нейронні мережі це більш складні мережі.. Такі мережі, крім вхідного і вихідного шарів нейронів, характеризуються ще і прихованим шаром (шарами). Зрозуміти їх розташування просто - ці шари знаходяться між вхідним і вихідним шарами. Але такі багат шарові нейронні мережі мають достатньо поширені відповідні розроблені методи тренування та визначення коефіцієнтів міжнейронних з'єднань. Один із відомих та достатньо поширених методів це алгоритм зворотного поширення помилки який присутній в програмній можливості середовища MATLAB 5.2. За допомогою цього метода можливо налаштувати визначену нейронну мережу за відповідними командами в вікні Command Window середовища MATLAB.

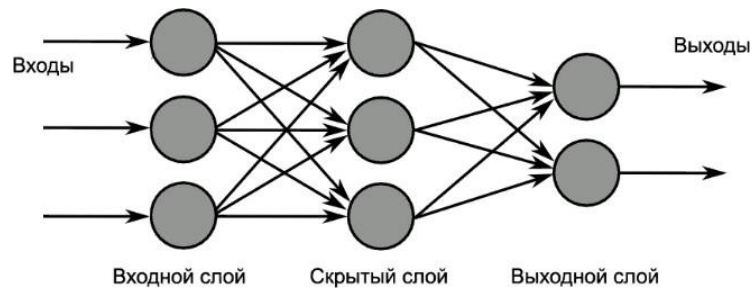


Рис. 3.26 – Багатошарова нейронна мережа яка може використовуватись для нелінійного перетворення сигналів в алгоритмі управління

Для забезпечення роботи алгоритму зворотного поширення помилки необхідно мережі поперемінно у випадковому порядку пред'являються всі тренувальні образи, щоб мережа, образно говорячи, не забувала одні в міру запам'ятовування інших. Для цього в командному вікні MATLAB представляється тренувальний набір вхідних та вихідних значень нейронної мережі у вигляді векторів P та T . У векторі P задається діапазон зміни вхідних сигналів в діапазоні зміни похибки регулювання в нашому випадку від -30 до 30. А у векторі T задається діапазон зміни вихідних сигналів. Так як функція активації обмежує сигнал в діапазоні від -1 до 1 то значення вектора T будуть відповідно від -0,3 до 0,3. Відповідна програма для відтворення багатошарової нейромережі представлена на рисунку 3.27. В перших двох рядках представлені вектора P та T . у третьому рядку представлена команда для визначення нейронної мережі в діапазоні вхідних сигналів від -30 до 30 з двома нейронами в першому шарі та одному нейроні у другому шарі (`newff([-30 30],[2 1])`). В якості функцій активацій вибраний гіперболічний тангенс (сігмоїд) як на першому шарі нейромережі та і на другому (`{'tansig','tansig'}`).

На четвертому рядку програми вказано 100 кроків навчання, в середньому для такої невеликої нейронної мережі це достатня кількість кроків. А потім задається команда `net=train(net, P, T)` для тренування штучної нейронної мережі за відповідним алгоритмом навчання на 100 кроків. Після навчання необхідно виконати тестування визначеної нейронної мережі.

```

» P=[-30 -20 -10 -5 -1 -0.5 0 0.5 1 5 10 30];
» T=[-0.3 -0.2 -0.1 -0.05 -0.01 -0.005 0 0.005 0.01 0.05 0.1 0.3];
» net = newff([-30 30],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.697162/0, Gradient 14.5018/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 1.15893e-005/0, Gradient 0.0125734/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 4.03486e-006/0, Gradient 0.00644655/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 3.25751e-006/0, Gradient 0.114768/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 2.42254e-006/0, Gradient 0.00366591/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
-0.2975 -0.2022 -0.1023 -0.0512 -0.0102 -0.0050 0.0001
Columns 8 through 12
0.0053 0.0104 0.0515 0.1026 0.2985
» gensim(net)

```



```

-.) MATLAB Command Window
File Edit Window Help
[Icons: File Explorer, MATLAB, Command Window, etc.]

» P=[-30 -20 -10 -5 -1 -0.5 0 0.5 1 5 10 30];
» T=[-0.3 -0.2 -0.1 -0.01 -0.005 0 0.005 0.01 0.1 0.2 0.3];
» net = newff([-30 30],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, P, T);
??? Error using ==> network/train
T must have 12 columns.

» P=[-30 -20 -10 -5 -1 -0.5 0 0.5 1 5 10 30];
» T=[-0.3 -0.2 -0.1 -0.05 -0.01 -0.005 0 0.005 0.01 0.05 0.1 0.3];
» net = newff([-30 30],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.697162/0, Gradient 14.5018/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 1.15893e-005/0, Gradient 0.0125734/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 4.03486e-006/0, Gradient 0.00644655/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 3.25751e-006/0, Gradient 0.114768/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 2.42254e-006/0, Gradient 0.00366591/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a = sim(net,p)
??? Undefined function or variable 'p'.

» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
-0.2975 -0.2022 -0.1023 -0.0512 -0.0102 -0.0050 0.0001
Columns 8 through 12
0.0053 0.0104 0.0515 0.1026 0.2985
» gensim(net)
»

```

Рисунок 3.27 Виконавчий код для генерації нейромережі, яка буде відтворювати нелінійне перетворення сигналів в алгоритмі управління

Тестування нейронної мережі виконується при команді $a = \text{sim}(\text{net}, P)$, після цієї команди виводяться фактичні вихідні сигнали згідно з вхідним вектором P . Фактичні вихідні сигнали можна порівняти з заданими сигналами що представлені у векторі T . Згідно з представленою програмою фактичні значення вихідних сигналів непомітно відрізняюся від заданих у векторі T . Точність навчання також представляється на відповідному графіку на рисунку 3.28, де показано зменшення та стабілізацію похибки навчання за 100 кроків.

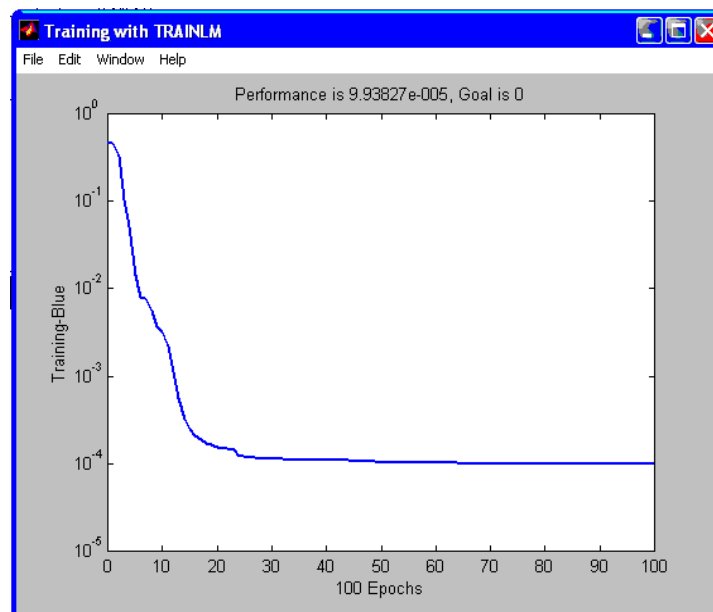


Рисунок 3.28 – Характеристика точності навчання нейромережі яка буде відтворювати нелінійне перетворення сигналів в алгоритмі управління

Остання команда яка вводиться для відтворення нейронної мережі в середовищі Simulink це команда $\text{gensim}(\text{net})$. В результаті виконання цієї команди мережі з'являється нейронна мережа як показано на рисунку 3.29.

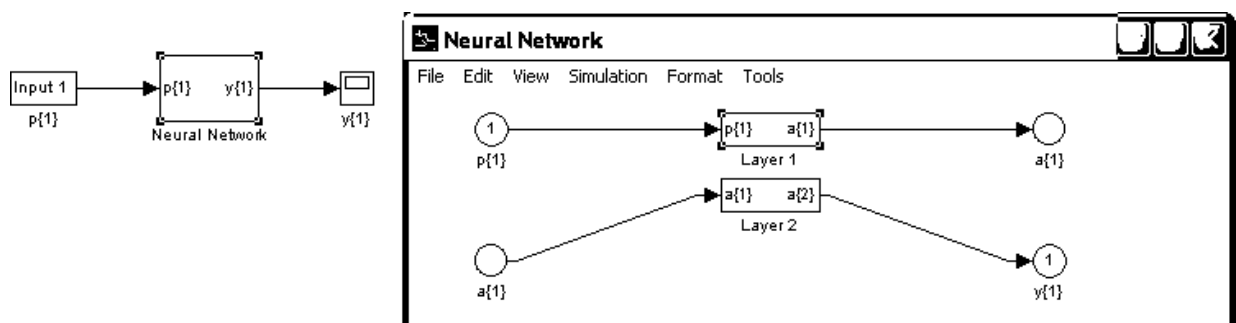


Рисунок 3.29. Відтворена нейронна мережа в середовищі Simulink після виконання відповідної програми

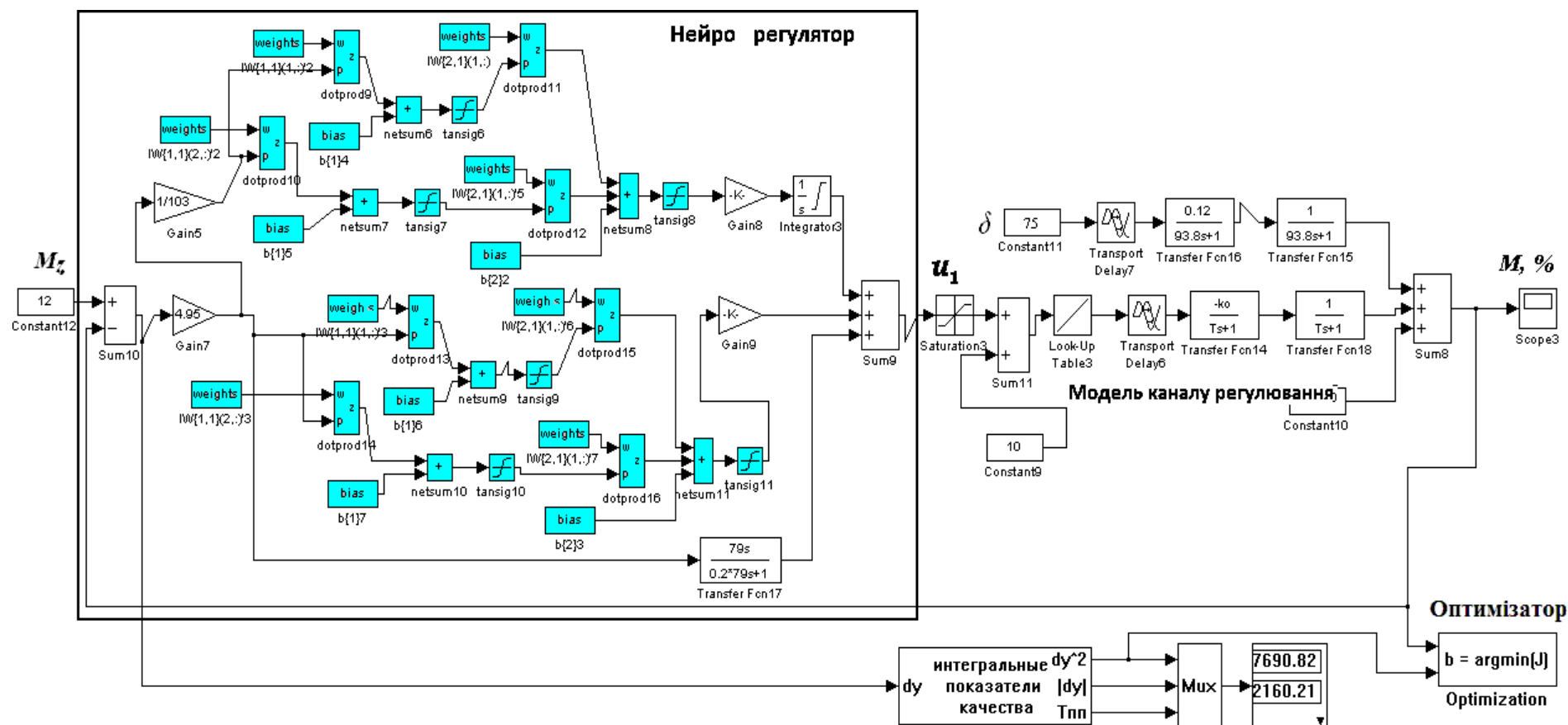


Рисунок 3.30 – Структурна схема моделі САУ з комбінованим регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи управління за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

Згідно з рисунком 3.29 нейронна мережа складається з двох шарів layer 1, layer 2 які будить синтезовані в системі регулювання. Для налаштування таких нелінійних перетворювачів необхідно виконати оптимізацію САР за відповідним критерієм якості регулювання.

В роботі була синтезована модель системи автоматичного управління з гібридним ПІД регулятором та з нелійними перетворювачами структурна схема якої представлена на рисунку 3.30. Оптимізація виконувалась при тих самих умов що і система зі стандартним ПІД регулятором. На рисунку 3.31 представлена вікно початкових параметрів оптимізації САР з гібридним регулятором де показані основні параметри каналу регулювання та параметри налаштувань нелінійних перетворювачів. Значення параметрів складових ПІД регулятора були визначені на етапі оптимізації стандартного ПІД регулятора і при налаштуванні нелінійних перетворювачів вже не оптимізувались.

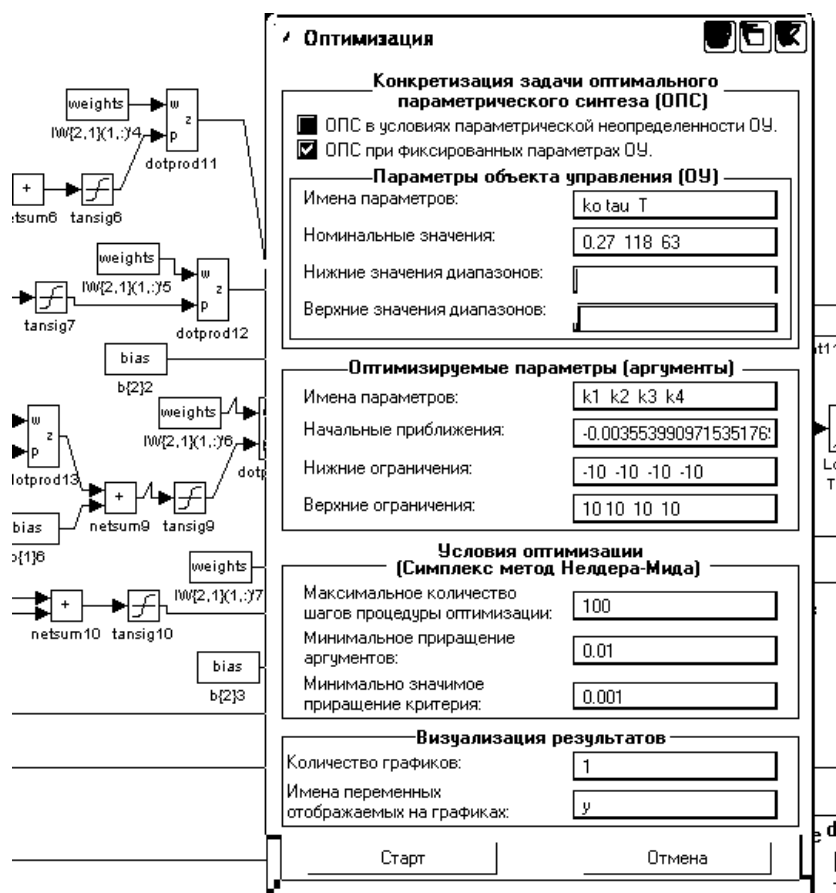


Рисунок 3.31 Вікно вводу початкових параметрів для оптимізації САР з гібридним регулятором

[illegible]

Для визначення принципової придатності САР з комбінованим регулятором було також проведена перевірка системи на грубість. Згідно з цієї перевіркою система є незначно грубою так само як система з традиційним ПІД регулятором. Це можливо побачити якщо порівняти результати представлені на рисунках 3.9 та 3.33 – видно що де які перехідні процеси відповідають системам що знаходяться на границі стійкості. Це

вказує на те що якість регулювання при зміні параметрів системи на $\pm 20\%$ значно погіршується що відповідає не грубій системі.

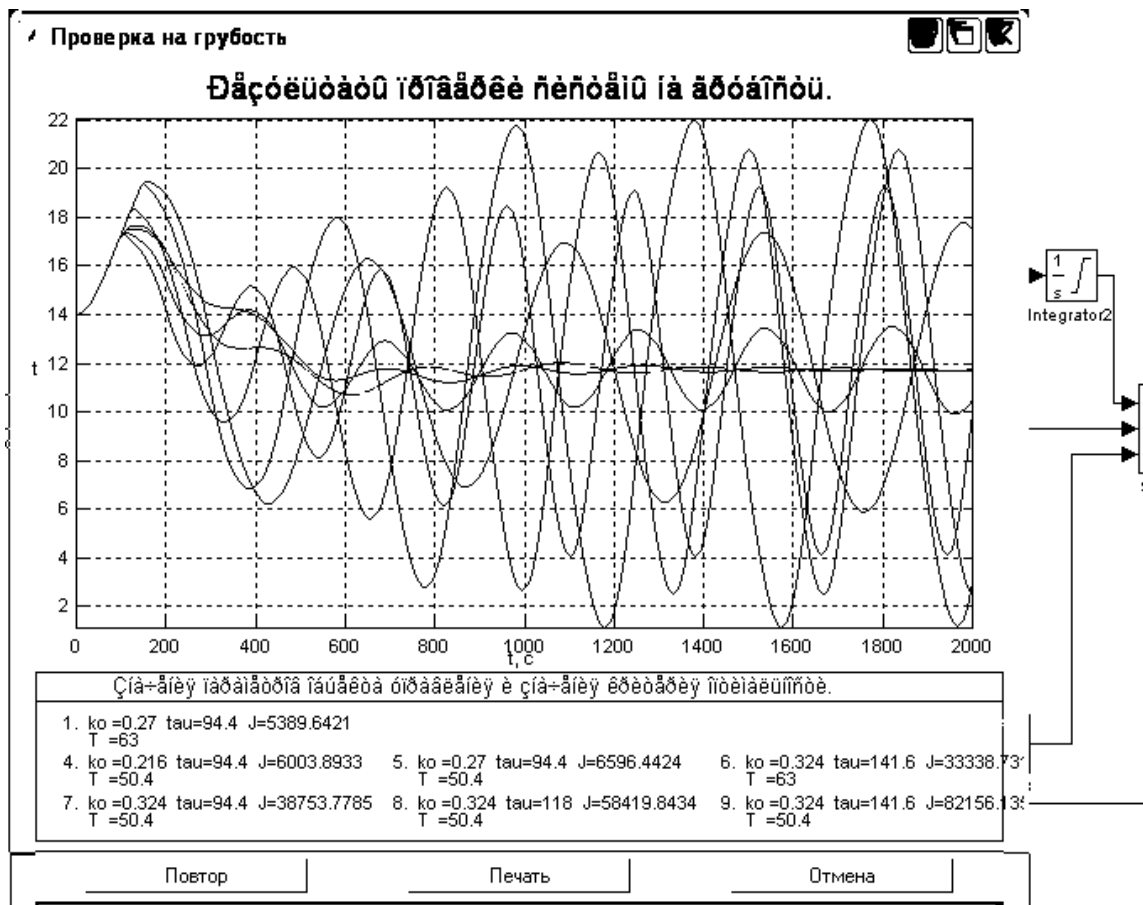


Рис. 3.33 – Вікно результатів перевірки на грубість САР з комбінованим ПІД регулятором

В кінцевому випадку для порівняльного аналізу в результаті моделювання були отримані в одних осях перехідні характеристики в САР зі стандартним ПІД регулятором, в САР з нечітким регулятором та в САР з комбінованим регулятором. Ці характеристики представлені на рисунку 3.34. Як видно з рисунку покращення якості регулювання за рахунок введення нелінійних перетворювачів до алгоритму регулювання покращало якість регулювання – час регулювання помітно зменшився від 2200 секунд до 1700сек але за максимальним динамічним відділенням це не так помітно. Можливо ще покращати якість регулювання за рахунок інших схем нейромережевих алгоритмів управління які далі можна синтезувати у рамках цієї роботи.

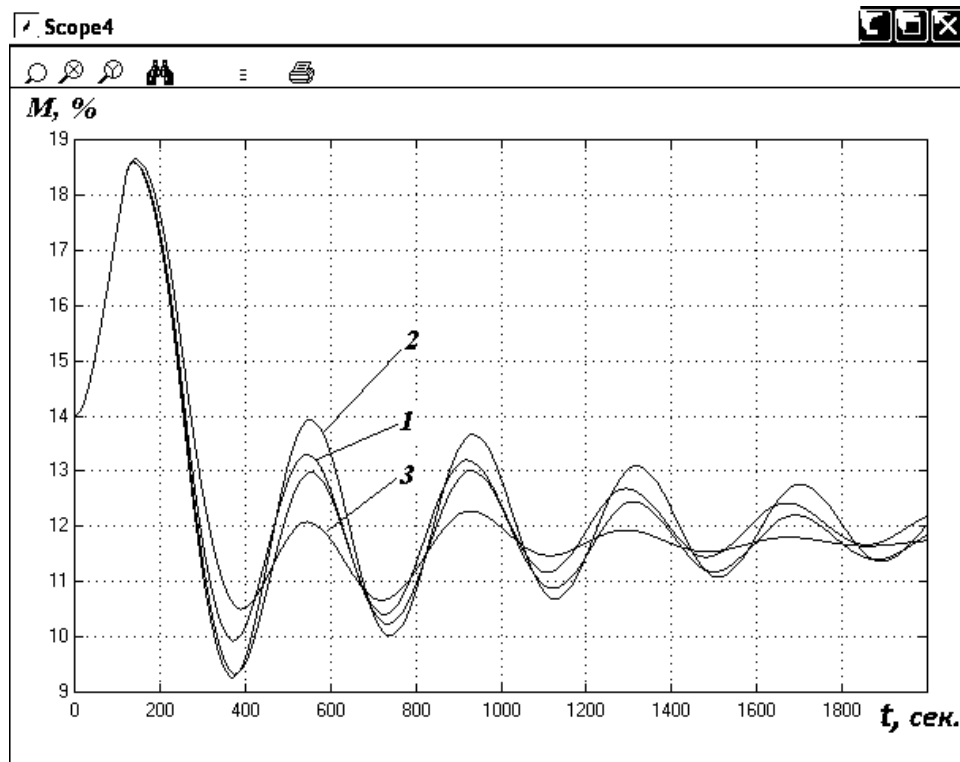


Рисунок 3.34 Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором; графік 3 – перехідний процес у САУ з комбінованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж

3.8 Синтез моделі САУ з нейрорегулятором як з альтернативним варіантом алгоритму управління

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.

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятор визначає приріст управляючої дія як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейрорегулятора 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 3.35.

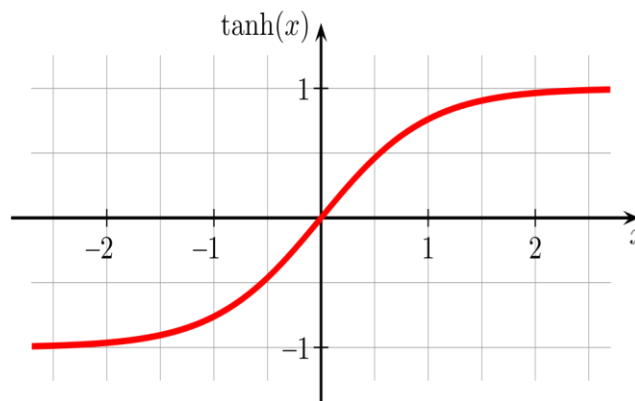


Рисунок 3.35. Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

, де net – вхідний аргумент

В одній з перших робіт з нейроуправління представляється дискретна СУ із НК, що одержує на вхід сигнал керування системою $u_r(k)$ і затримані в кілька разів сигнали з виходу об'єкта керування. У загальному випадку НК такого типу може одержувати і затримані сигнали зі свого виходу (рисунок 3.36). Таким чином, він формує керуючий вплив за наступним законом:

$$\mathbf{u}(k) = NN(\mathbf{y}(k), \mathbf{y}(k-1), \dots, \mathbf{y}(k-l_1), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{u}(k-2), \dots, \mathbf{u}(k-l_2), \mathbf{u}_r(k)), \quad (5)$$

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

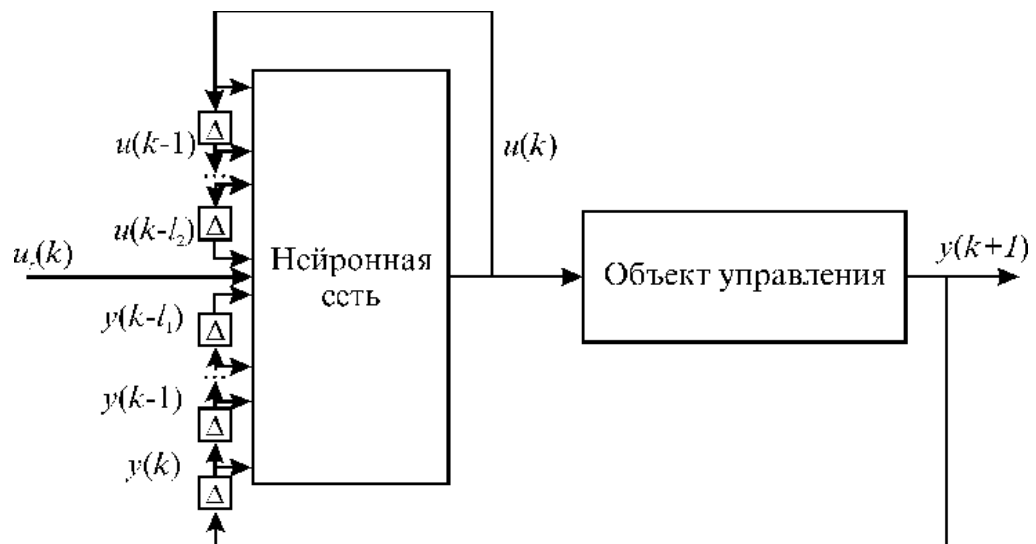


Рисунок 3.36 Система керування з нейроконтролером

Якщо перший тип САУ з комбінованим регулятором є компромісним розв'язком у рамках класичного підходу, то другий тип що представлений на рисунку 3.36 побудований тільки на ШНМ.

В цьому другому випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.37.

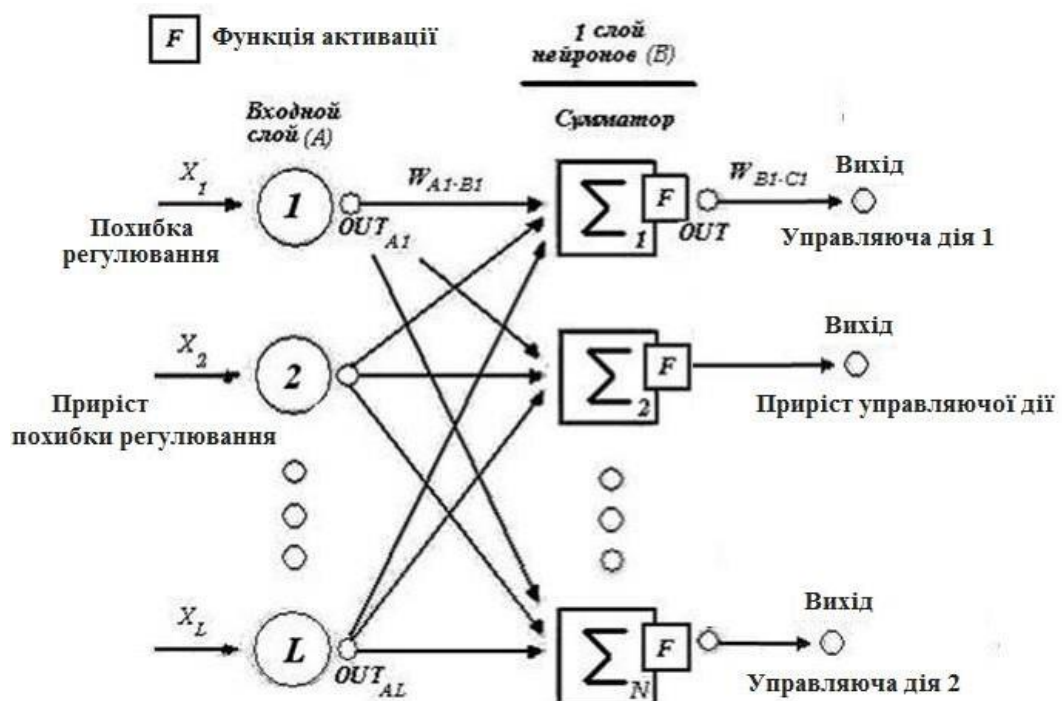


Рис. 3.37 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

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

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

Такий функціонал відповідає за поточний стан системи як показано на рисунку 3.38.

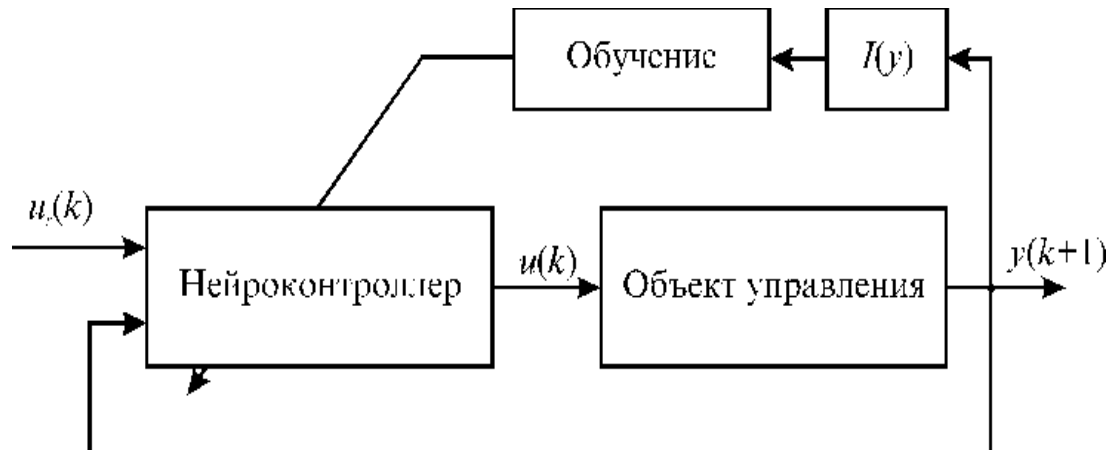


Рисунок 3. 38 Нейромережева система керування з екстремальним показником якості регулювання

Може бути ще один альтернативний варіант нейромережевого алгоритму управління це система з регулятором з прогнозом. Регулятор з прогнозом NN Predictive Controller використовує модель об'єкта управління у вигляді нейронної мережі для того, щоб передбачати його майбутню поведінку. Алгоритм оптимізації обчислює управляючі сигнали, які мінімізують різницю між бажаними і дійсними змінами сигналу на виході моделі і таким чином оптимізує поведінку об'єкта на заданому інтервалі часу.

Проектування нейрорегулятора складається з двох етапів: етап ідентифікації об'єкта управління нейрорегулятора і етапу синтезу закону управління.

На етапі ідентифікації розробляється модель об'єкта у вигляді нейронної мережі, яка на етапі синтезу використовується для синтезу регулятора. Схема підсистеми ідентифікації показана на рис. 3.39.

Вона включає модель об'єкта управління у вигляді нейронної мережі, яка повинна бути навчена в автономному режимі так, щоб мінімізувати помилку між реакціями об'єкта і моделі на послідовність пробних сигналів u . Структурна схема на рисунку 3.40 ілюструє процес управління з прогнозом. Регулятор складається з нейромережевої моделі керованого об'єкта і блоку оптимізації. Блок оптимізації визначає значення, які мінімізують критерій якості управління, а відповідний керуючий сигнал управляє процесом.

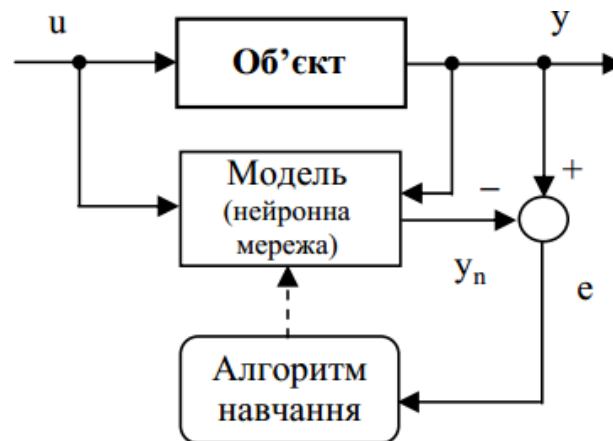


Рис. 3.39 Схема підсистеми ідентифікації

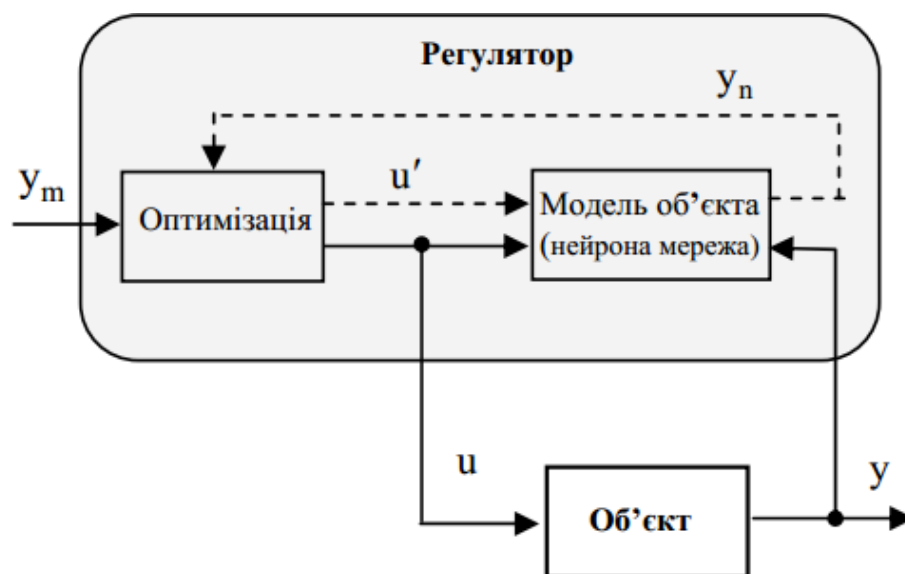


Рис. 3.40 Структурна схема системи з регулятором, що використовує принцип передбачення

Якщо розглядати другий варіант нейромережевого алгоритму управління то нейрорегулятор можливо спочатку налаштувати також за методом

зворотного поширення. В цьому випадку треба визначити кількість визначених похибок регулювання для тренування нейронної мережі. На рисунку 3.41 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.

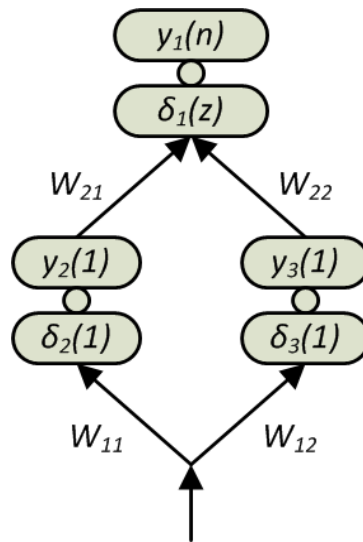


Рисунок 3.41 Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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

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.

Далі створюємо М-файл в середовищі Matlab і в цьому файлі прописуємо команди для створення і навчання нашого нейрорегулятора.

Вхідні і вихідні значення нейрорегулятора були отримані на основі характеристик нечіткого логічного регулятора, отриманих на основі схеми моделювання, представленій на рисунку 3.42.

№	l	u	Δu
1	-20	107	0,1
2	-10	53,5	0,05
3	-5	26,75	0,025
4	-1	5,35	0,005
5	0	0	0-
6	1	-5,34	-0,005
7	5	-25,4	-0,024
8	10	-52,1	-0,05
9	20	-110	-0,1

Таблиця 2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

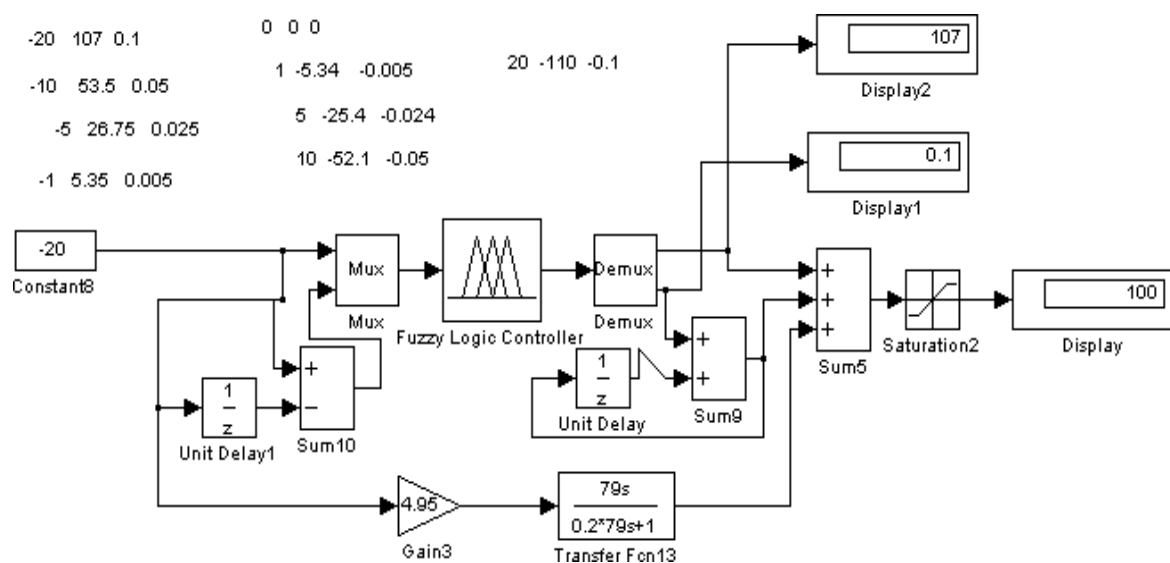


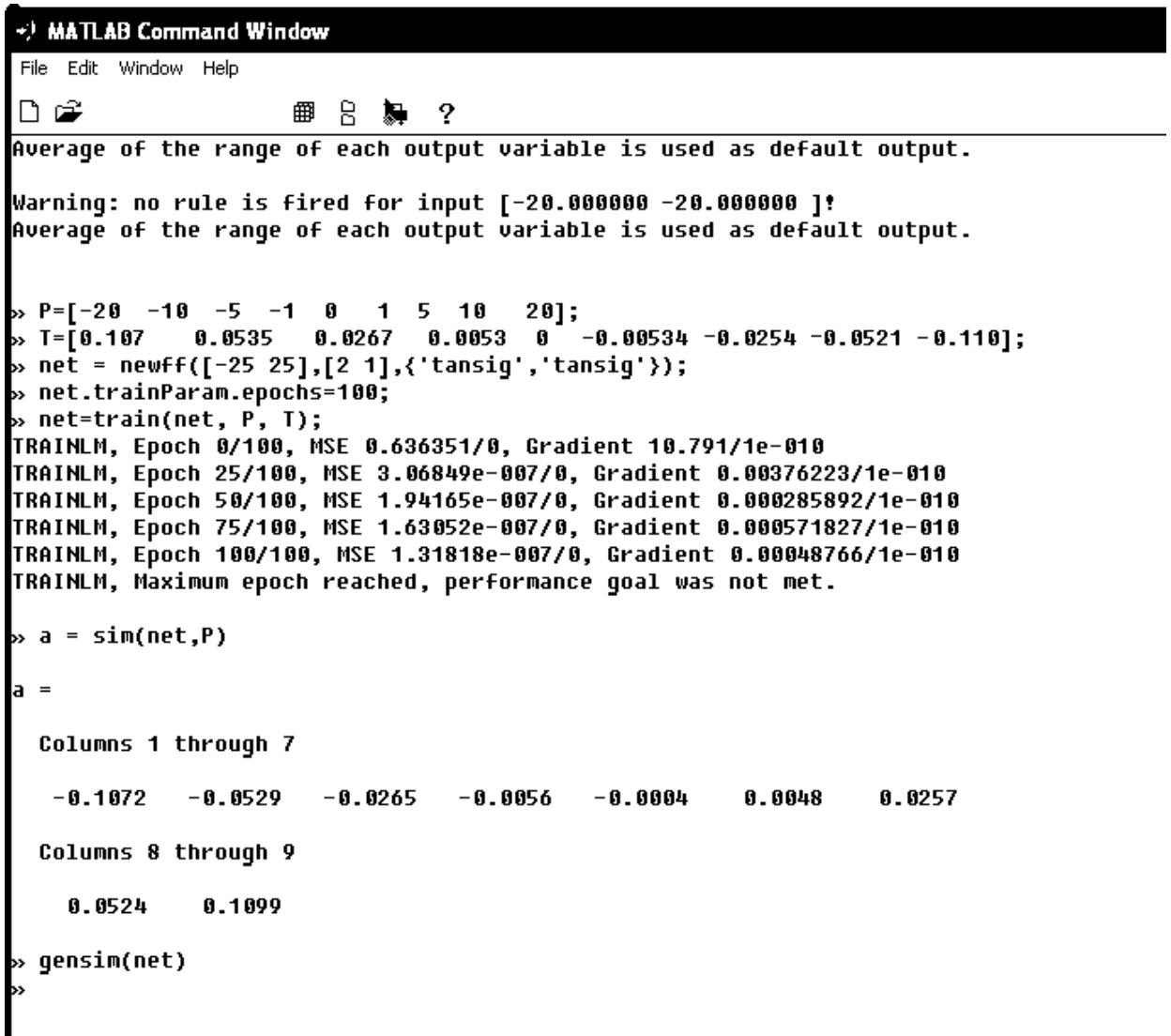
Рисунок. 3.42 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.43 і 3.44 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у командній строчці Matlab – command window, в результаті чого згенерується відповідна нейронна мережа.

```

» P=[-20 -10 -5 -1 0 1 5 10 20];
» T=[-0.107 -0.0535 -0.0267 -0.0053 0 0.00534 0.0254 0.0521 0.110];
» net = newff([-25 25],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.636351/0, Gradient 10.791/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 3.06849e-007/0, Gradient 0.00376223/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 1.94165e-007/0, Gradient 0.000285892/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 1.63052e-007/0, Gradient 0.000571827/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 1.31818e-007/0, Gradient 0.00048766/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
-0.1072 -0.0529 -0.0265 -0.0056 -0.0004 0.0048 0.0257
Columns 8 through 9
0.0524 0.1099
» gensim(net)
»

```



```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
Average of the range of each output variable is used as default output.
Warning: no rule is fired for input [-20.000000 -20.000000]!
Average of the range of each output variable is used as default output.
» P=[-20 -10 -5 -1 0 1 5 10 20];
» T=[-0.107 -0.0535 -0.0267 -0.0053 0 -0.00534 -0.0254 -0.0521 -0.110];
» net = newff([-25 25],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.636351/0, Gradient 10.791/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 3.06849e-007/0, Gradient 0.00376223/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 1.94165e-007/0, Gradient 0.000285892/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 1.63052e-007/0, Gradient 0.000571827/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 1.31818e-007/0, Gradient 0.00048766/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
-0.1072 -0.0529 -0.0265 -0.0056 -0.0004 0.0048 0.0257
Columns 8 through 9
0.0524 0.1099
» gensim(net)
»

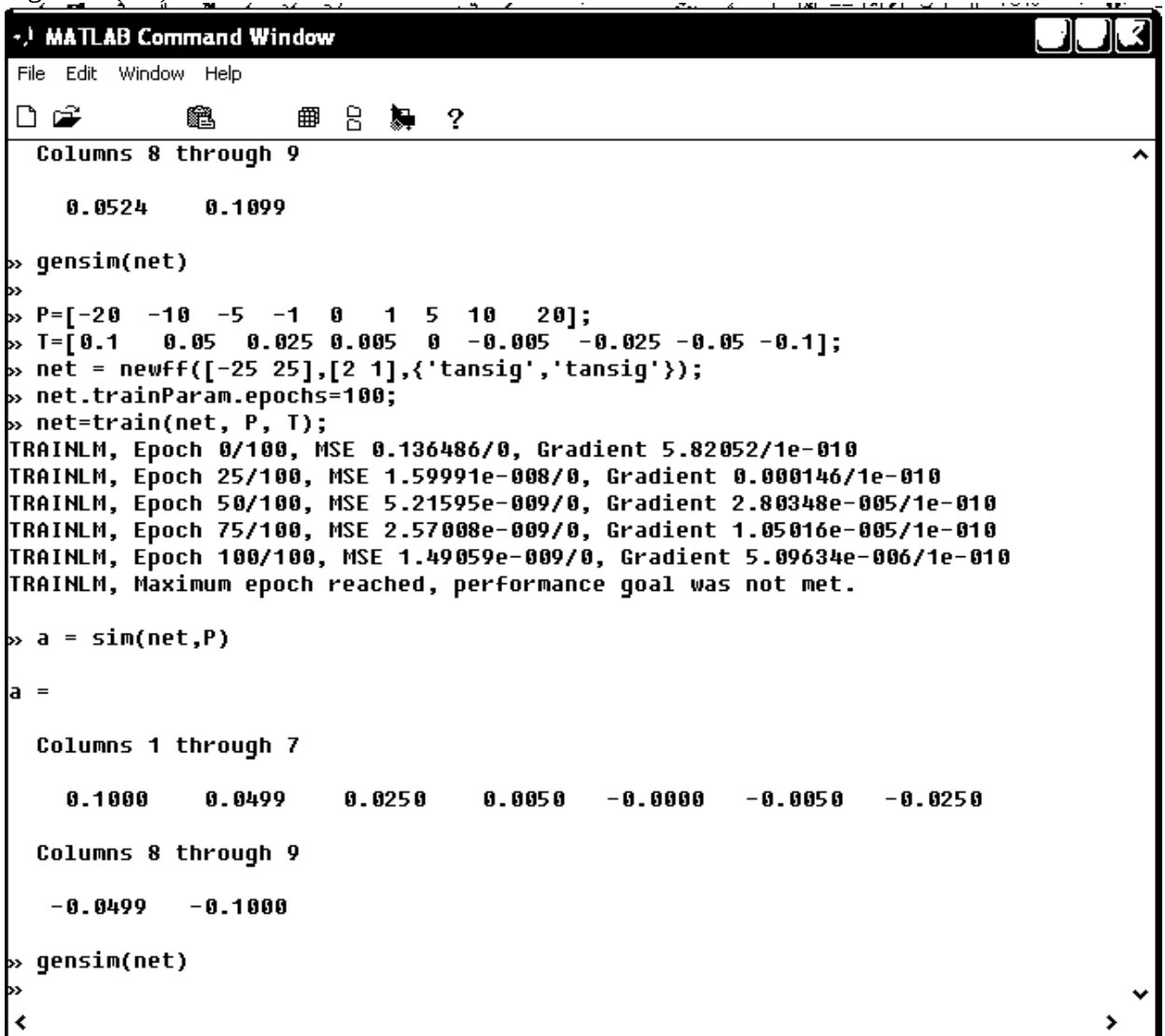
```

Рисунок 3.43 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

» P=[-20 -10 -5 -1 0 1 5 10 20];
» T=[0.1 0.05 0.025 0.005 0 -0.005 -0.025 -0.05 -0.1];
» net = newff([-25 25],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.136486/0, Gradient 5.82052/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 1.59991e-008/0, Gradient 0.000146/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 5.21595e-009/0, Gradient 2.80348e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 2.57008e-009/0, Gradient 1.05016e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 1.49059e-009/0, Gradient 5.09634e-006/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
    0.1000    0.0499    0.0250    0.0050   -0.0000   -0.0050   -0.0250
Columns 8 through 9
   -0.0499   -0.1000
» gensim(net)

```



```

Columns 8 through 9
    0.0524    0.1099
» gensim(net)
»
» P=[-20 -10 -5 -1 0 1 5 10 20];
» T=[0.1 0.05 0.025 0.005 0 -0.005 -0.025 -0.05 -0.1];
» net = newff([-25 25],[2 1],{'tansig','tansig'});
» net.trainParam.epochs=100;
» net=train(net, P, T);
TRAINLM, Epoch 0/100, MSE 0.136486/0, Gradient 5.82052/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/100, MSE 1.59991e-008/0, Gradient 0.000146/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/100, MSE 5.21595e-009/0, Gradient 2.80348e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/100, MSE 2.57008e-009/0, Gradient 1.05016e-005/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/100, MSE 1.49059e-009/0, Gradient 5.09634e-006/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a = sim(net,P)
a =
Columns 1 through 7
    0.1000    0.0499    0.0250    0.0050   -0.0000   -0.0050   -0.0250
Columns 8 through 9
   -0.0499   -0.1000
» gensim(net)
»

```

Рисунок 3.44 Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

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

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.45, 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 3.46 та 3.47 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову та II – складову нейрорегулятора вологості окремо.

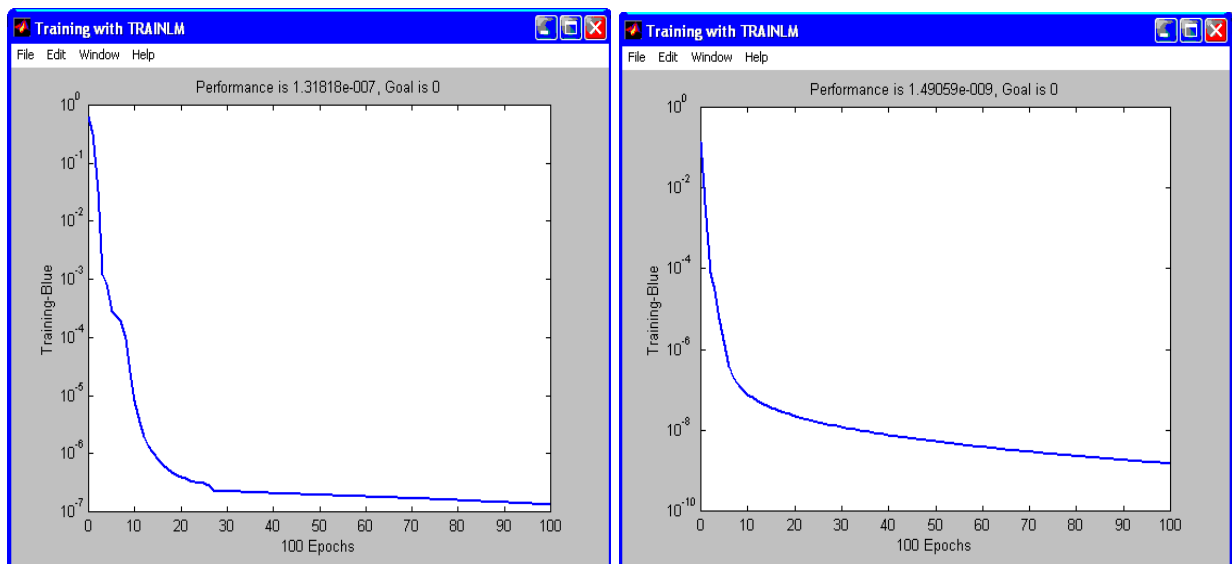


Рисунок 3.45 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Фактичні значення:								
-0.1072	-0.0529	-0.0265	-0.0056	-0.0004	0.0048	0.0257	0.0524	
Бажані значення:								
0.107	0.0535	0.0267	0.0053	0	-0.00534	-0.0254	-0.0521	-0.110

Рисунок 3.46 - бажані та фактичні значення вих. сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює I – складову нейрорегулятора

Фактичні значення:								
0.1000	0.0499	0.0250	0.0050	-0.0000	-0.0050	-0.0250	-0.0499	
Бажані значення:								
0.1	0.05	0.025	0.005	0	-0.005	-0.025	-0.05	-0.1

Рисунок 3.47 - бажані та фактичні значення вих. сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює Π – складову нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених на рисунках 3.46 та 2.47, розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для i -тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі.

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

(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):

(2)

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

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

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 2.23:

$$\delta_1(z) = (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = (-0.0529 - 0.0535) * (-0.0529) * (1 - -0.0529) = 0.00000085$$

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 І – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned}\delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = \\ &= (0.04996 - 0.05) * (0.04996) * (1 - 0.04996) = 0.03330085\end{aligned}$$

Розрахунок помилки для і-тих нейронів прихованого шару:

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

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

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 3.16. У такий спосіб була синтезована модель САУ з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.48.

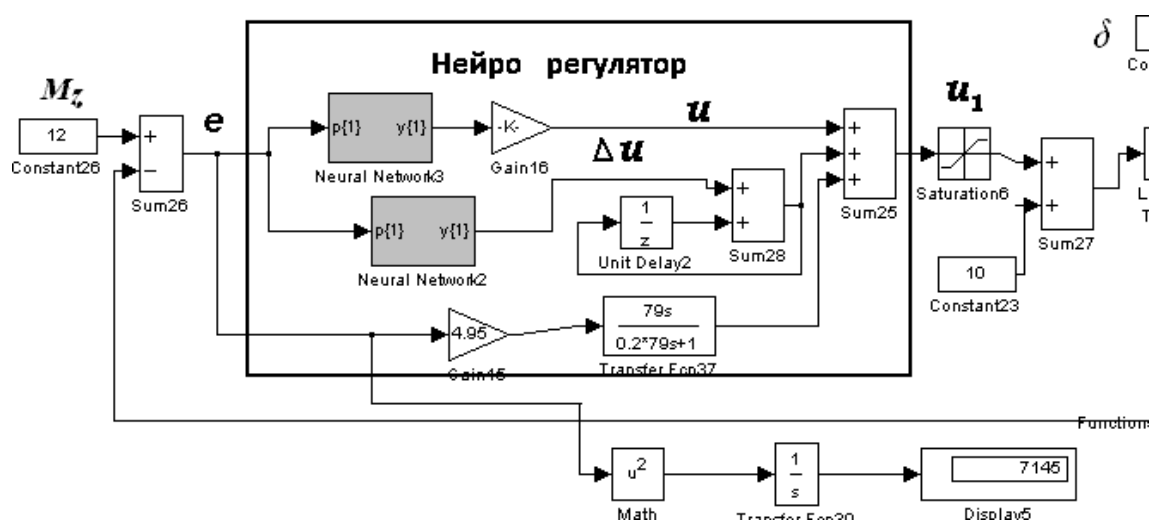
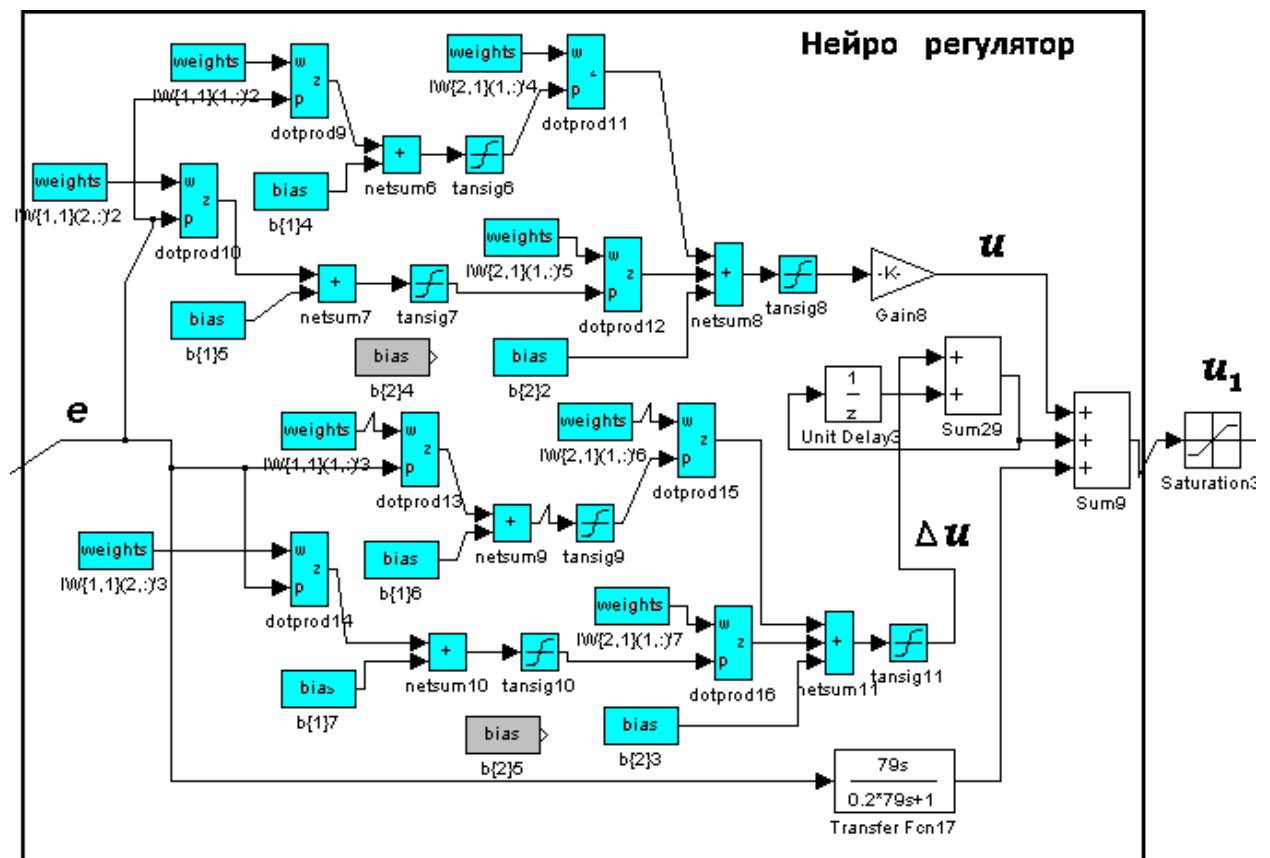


Рисунок 3.48 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.49, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.48.



Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування складає 2000 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПД регулятором, і 1800 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому збуренні значно

більше в САУ з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.50. 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 3.49, 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 ПД-регулятор для визначення остаточного висновку про доцільність застосування різних САУ.

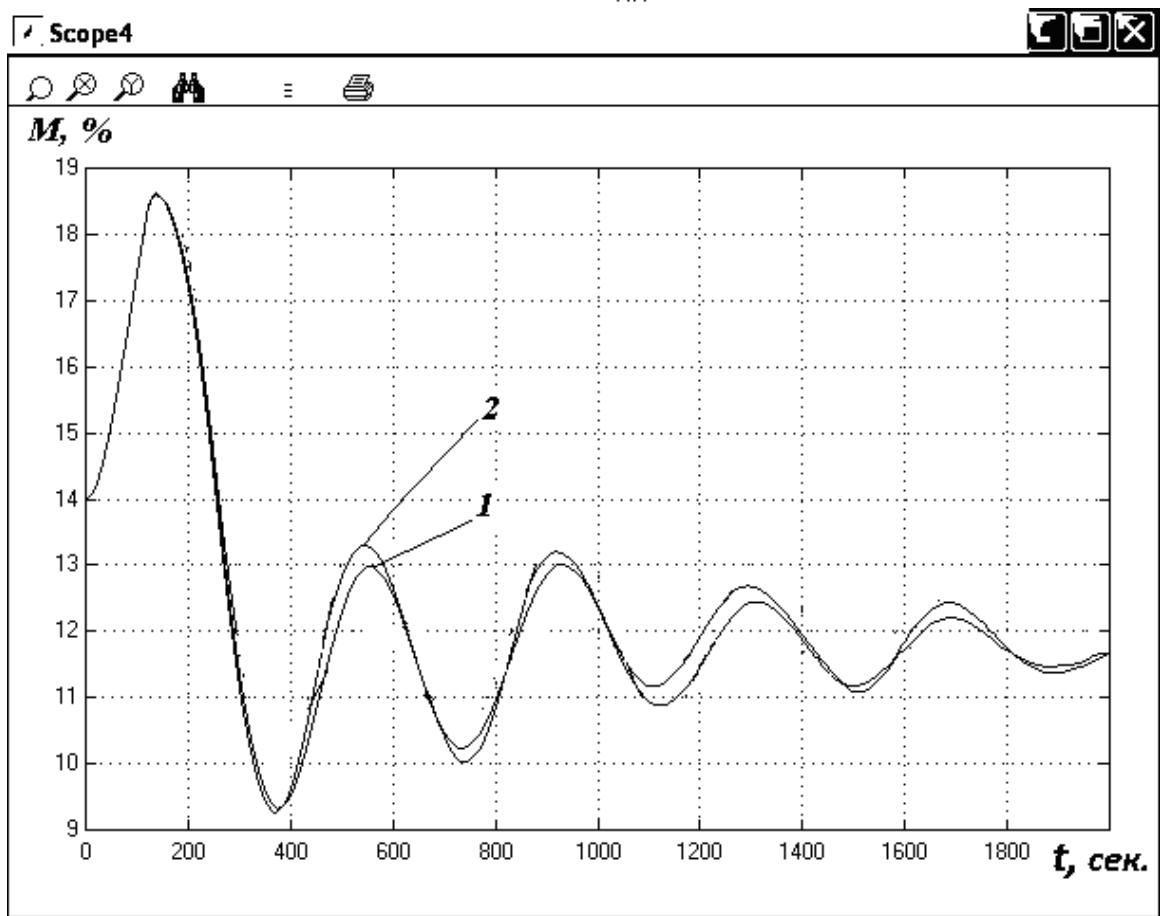


Рисунок 3.50. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором

3.9 Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором

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, структурна схема яка відображена на рисунку 3.51.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленому рисунку 3.53. На рисунку 3.53 представлений результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації САУ з ПД регулятором з визначеному інтегральному критерії якості роботи системи.

Згідно з рисунків 3.7 та 3.53 можна побачити що вдалося значно покращити якість регулювання порівнявши значення інтегральних критеріїв якості роботи системи. Значення інтегрального показника при САУ з ПД регулятором 6472 а при САУ з нейрорегулятором 5257.

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

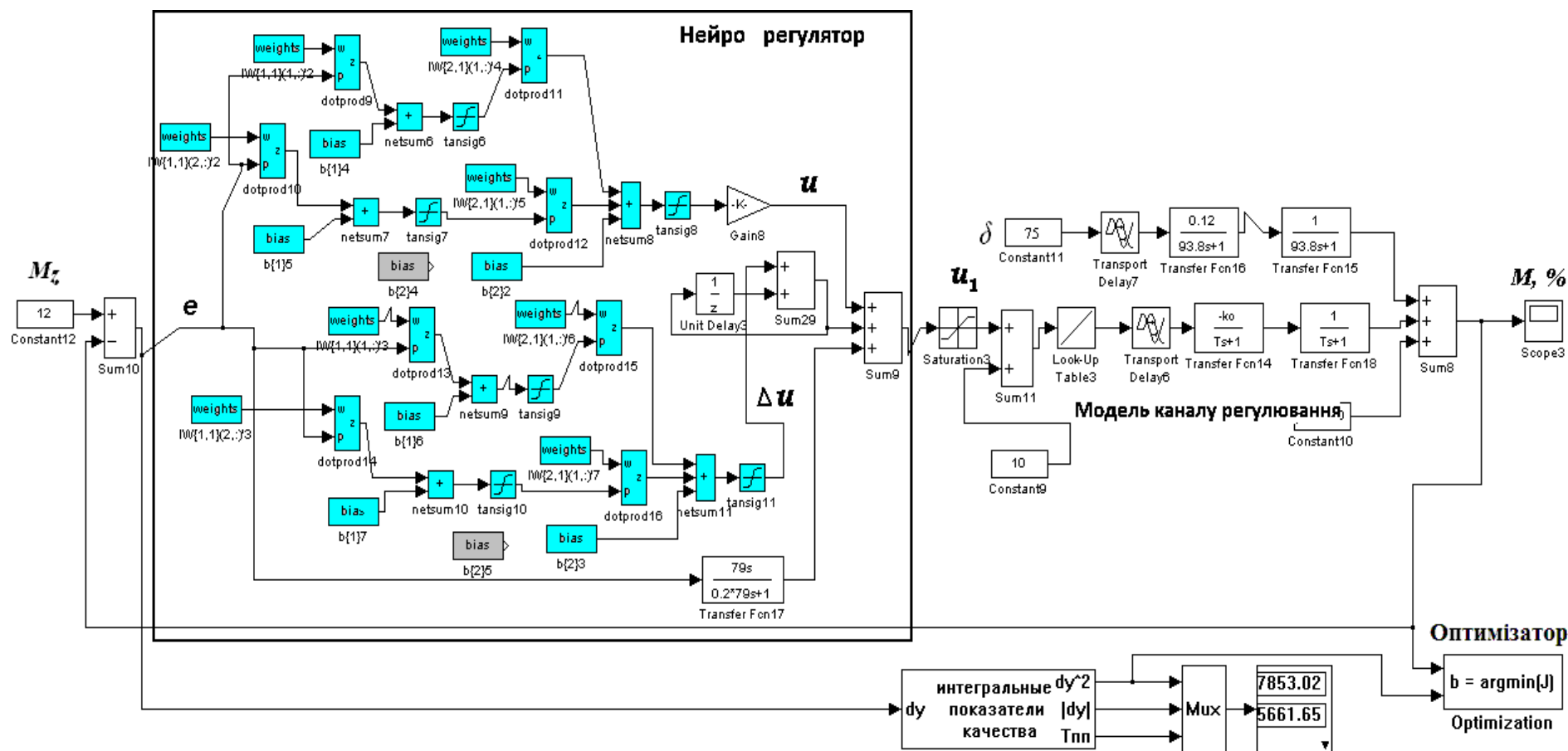


Рисунок 3.51 – Структурна схема моделі САУ з нейронним регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи управління за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

Оптимизация

Конкретизация задачи оптимального параметрического синтеза (ОПС)

☐ ОПС в условиях параметрической неопределенности ОУ.
☒ ОПС при фиксированных параметрах ОУ.

Параметры объекта управления (ОУ)

Имена параметров: ko tau T
 Номинальные значения: 3.4 2.5 12
 Нижние значения диапазонов:
 Верхние значения диапазонов:

Оптимизируемые параметры (аргументы)

Имена параметров: k1 k2 k3 k4
 Начальные приближения: 0.079722609562294294
 Нижние ограничения: -3 -3 -3 -3
 Верхние ограничения: 3 3 3 3

Условия оптимизации (Симплекс метод Нелдера-Мида)

Максимальное количество шагов процедуры оптимизации: 10
 Минимальное приращение аргументов: 0.01
 Минимально значимое приращение критерия: 0.001

Визуализация результатов

Количество графиков: 1
 Имена переменных отображаемых на графиках: y

Старт Отмена

Рисунок 3.52 – Вікно оптимізатора до початку оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

Результати параметричної оптимізації показують, що нейрорегулятор на відмінність від традиційного нечіткого регулятора, має велику можливість налаштування під обраний об'єкт з нелінійною статичною характеристикою каналів регулювання. Для визначення принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора необхідно визначити, чи не втрачає стійкість САУ при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні $\pm 20\%$.

Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САУ (рисунок 3.55).

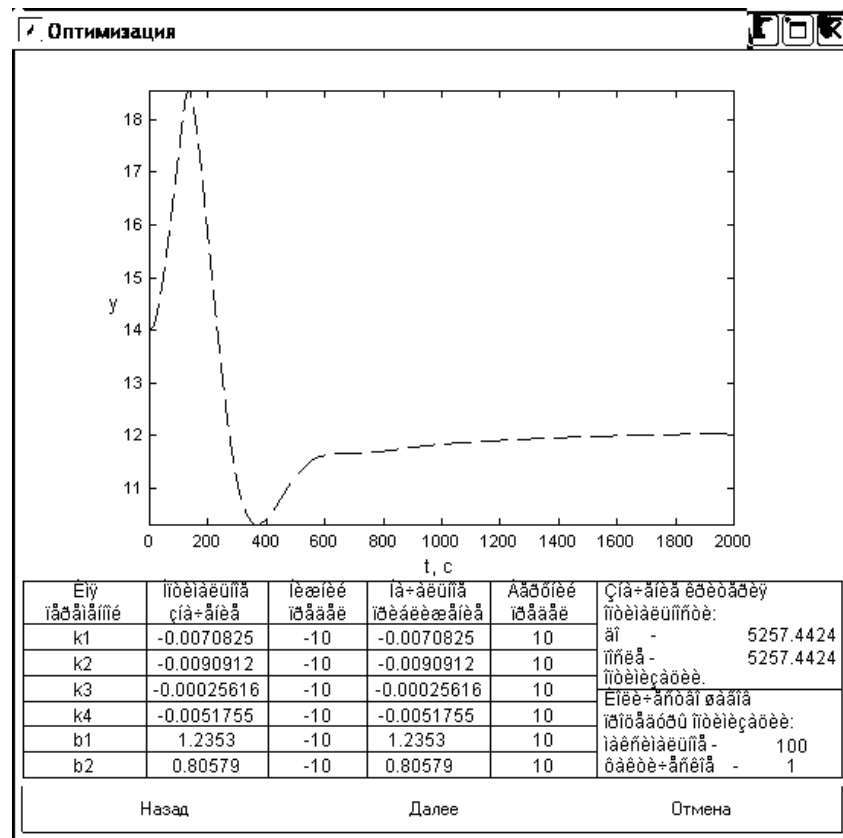


Рисунок 3.53 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

Параметри перевірки системи на грубість представлені на рисунку 3.54. та 3.55. Значення цих параметрів не відрізняються від попереднього випадку коли була виконана перевірка на грубість системи з ПД-регулятором.

Проверка на грубость

Изменяющиеся параметры ОУ:

Имена параметров: ko tau T

Номинальные значения: 0.27 118 63

Нижние значения диапазонов: 0.8*0.27 0.8*118 1

Верхние значения диапазонов: 1.2*0.27 1.2*118

Визуализация результатов:

Количество графиков: 1

Имена переменных отображаемых на графиках: t

Старт Отмена

3.54 Вікно вводу параметрів перевірки системи на грубість САР з ннейрорегулятором

Перевірка системи на грубість САР з нейрорегулятором показала що система, завдяки використанню нейрорегулятора, стало значно грубою порівняно з САР з ПІД регулятором при каналі регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою. Це можна побачити порівнявши результати представлені на рисунках 3.9 та 3.55. Згідно з рисунку 3.9 система з ПІД регулятором незначно груба порівняно з САР нейрорегулятором і це в першу чергу тому що нейрорегулятор є нелінійним елементом системи який в результаті оптимізації можливо підстроїти до роботи з каналом регулювання що характеризується нелінійною статичною характеристикою.

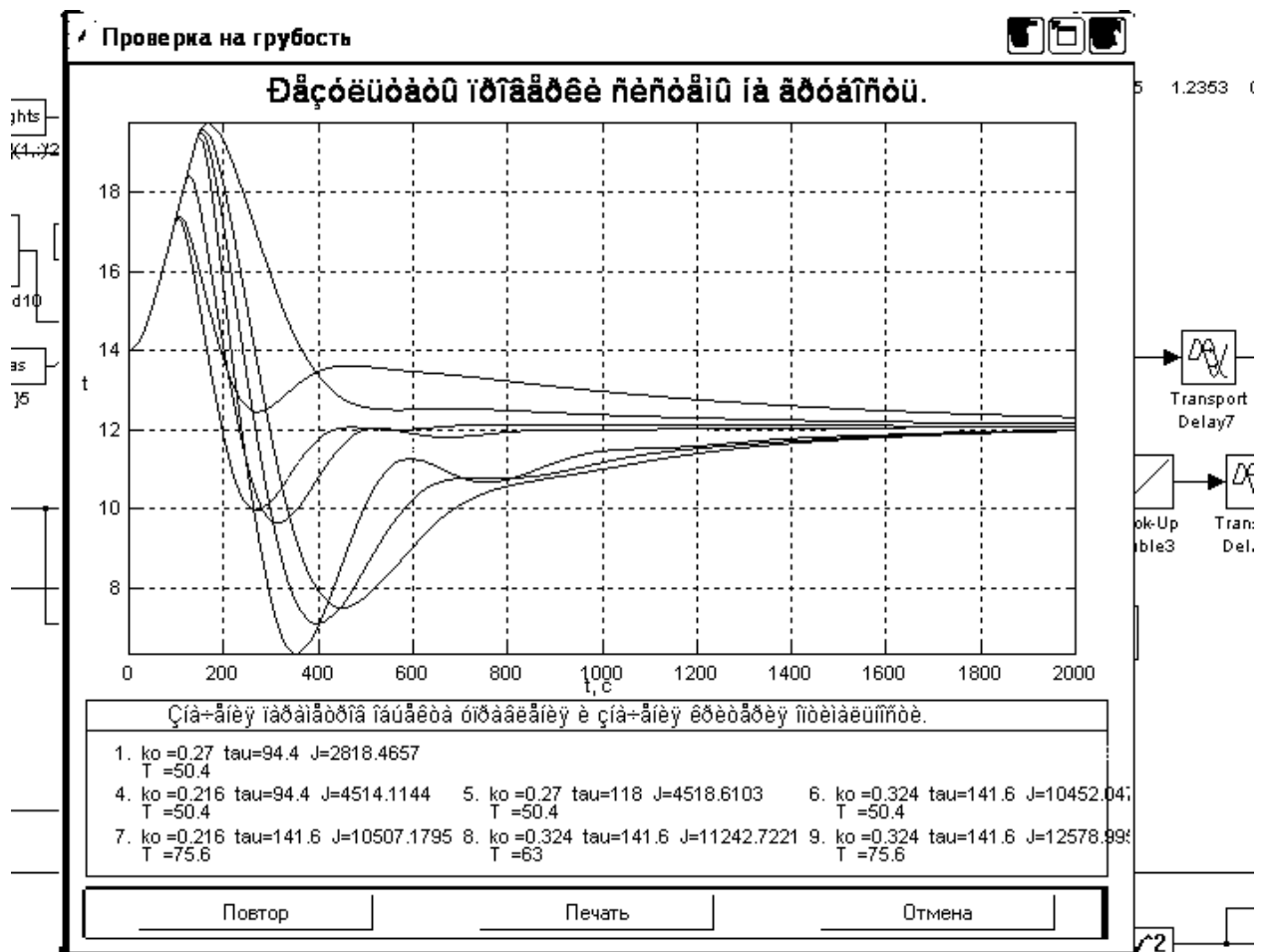


Рис. 3.55 – Вікно результатів перевірки на грубість САР з нейрорегулятором

Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink,

показав, що система не втрачає стійкість при різних параметрах у діапазоні $\pm 20\%$. Отже синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролеру для практичного застосування його у відповідній системі управління.

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

На заключному етапі розробки САУ був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САУ за виходом системи на номінальний режим функціонування. 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.

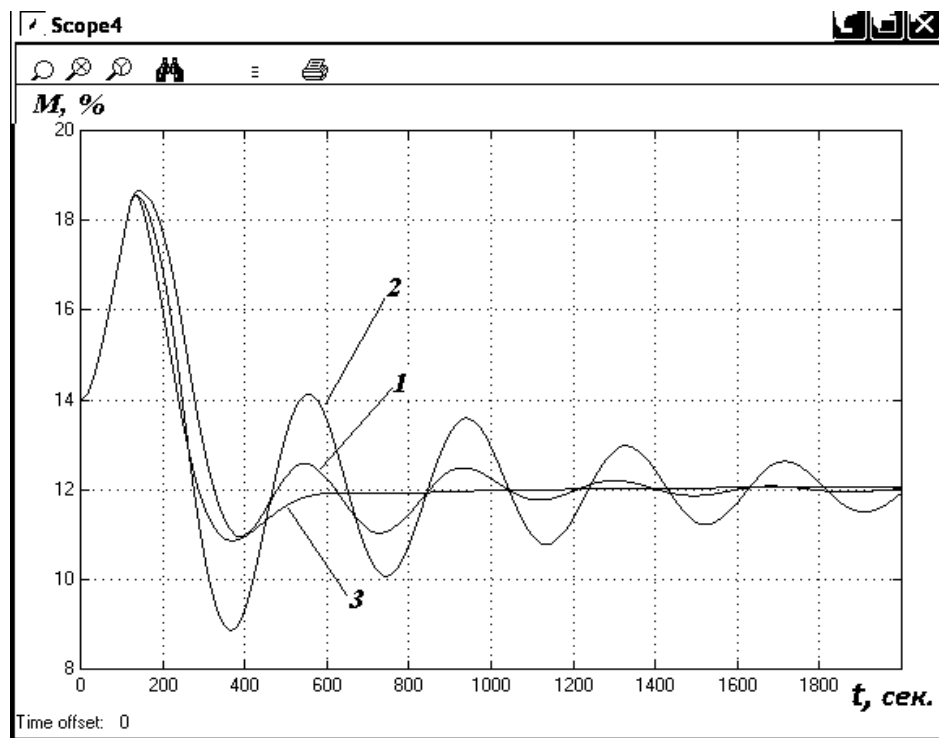


Рисунок 3.56. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором графік; 3 – перехідний процес у САУ з оптимізованим регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж;

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 3.57, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.57 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.

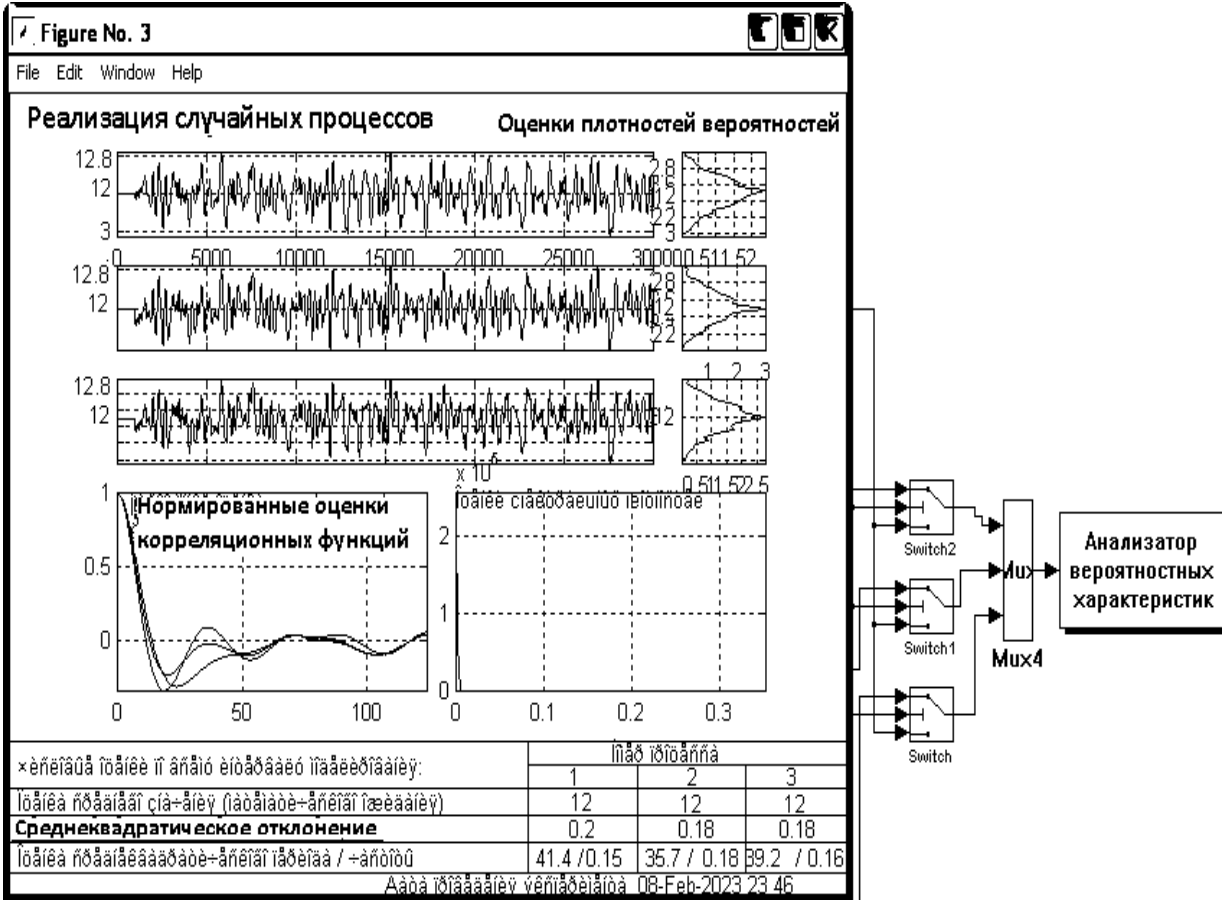


Рисунок 3.57 - Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

Таблиця 3.2 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПІД-регулятором	САУ з нечітким регулятором	САУ з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈ 1400 с	≈ 2000 с	≈ 800 с
Максимальне динамічне відхилення	$\approx 5,5$ %	$\approx 5,5$ %	$\approx 5,5$ %
Інтегральний показник	6472	-	5257
Математичне очікування	12%	12%	12%
Середньоквадратичне відхилення	0,2	0,18	0,18

З таблиці 3.2 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САУ з нейронним регулятором краще функціонує, ніж інші розглянуті САУ. САУ з традиційним ПІД-регулятором і САУ з нечітким регулятором функціонують за якістю регулювання практично ідентично при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

3.11 Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера

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

Спочатку вибираємо Subsystem Paramtrs на блоці регулятора, синтезованого на основі штучної нейронної мережі. У цьому вікні відзначаємо «Treat as atomic unit» і натискаємо кнопку Ок. На функціональному блоці натискаємо праву клавішу миші і вибираємо PLC

Coder / Options. Далі вибираємо, у який тип ПЛК буде згенерований код (Target IDE) і натискаємо клавішу Generate code. Згенерований код для SIMATIC STEP 7 наступний:

```
(*
*
* File: sh7.scl
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem
"shihov7/Subsystem"
*
* Model name           : sh
* Model version        : 1.9
* Model creator        : Udovik
* Model last modified by : lapenkov
* Model last modified on  : Thu Jan 17 01:27:24 2023
* Model sample time     : 0s
* Subsystem name       : sh/Subsystem
* Subsystem sample time : 0s
* Simulink PLC Coder version : 1.3 (R2012a) 29-Dec-2011
* ST code generated on   : Thu Jan 17 01:44:26 2013
*
* Target IDE selection   : Siemens SIMATIC Step 7 5.4
* Test Bench included    : No
*
*)
FUNCTION_BLOCK Subsystem
VAR_INPUT
    ssMethodType: INT;
    In1: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Out1: REAL;
```

END_VAR

VAR

UnitDelay_DSTATE: REAL;

rtb_Sum1_g: REAL;

END_VAR

CASE ssMethodType OF

0:

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

UnitDelay_DSTATE := 0.0;

1:

(* Sum: '<S1>/Add8' incorporates:

* Constant: '<S12>/one'

* Constant: '<S12>/one1'

* Constant: '<S13>/one'

* Constant: '<S13>/one1'

* Constant: '<S14>/one'

* Constant: '<S14>/one1'

* Constant: '<S1>/Constant23'

* Constant: '<S1>/Constant24'

* Constant: '<S1>/Constant32'

* Constant: '<S1>/Constant34'

* Constant: '<S1>/Constant35'

* Constant: '<S1>/Constant36'

* Constant: '<S1>/Constant37'

* DotProduct: '<S2>/Dot Product'

* DotProduct: '<S3>/Dot Product'

* DotProduct: '<S8>/Dot Product'

* DotProduct: '<S9>/Dot Product'

* Gain: '<S12>/Gain'

* Gain: '<S12>/Gain1'

- * Gain: '<S13>/Gain'
- * Gain: '<S13>/Gain1'
- * Gain: '<S14>/Gain'
- * Gain: '<S14>/Gain1'
- * Inport: '<Root>/In1'
- * Math: '<S12>/Exp'
- * Math: '<S12>/Reciprocal'
- * Math: '<S13>/Exp'
- * Math: '<S13>/Reciprocal'
- * Math: '<S14>/Exp'
- * Math: '<S14>/Reciprocal'
- * Sum: '<S14>/Sum'
- * Sum: '<S14>/Sum1'
- * Sum: '<S1>/netsum6'
- * Sum: '<S1>/netsum7'
- * Sum: '<S1>/netsum8'
- * UnitDelay: '<S1>/Unit Delay'
- *
- * About '<S12>/Exp':
- * Operator: exp
- *
- * About '<S12>/Reciprocal':
- * Operator: reciprocal
- *
- * About '<S13>/Exp':
- * Operator: exp
- *
- * About '<S13>/Reciprocal':
- * Operator: reciprocal
- *
- * About '<S14>/Exp':
- * Operator: exp

```

* About '<S14>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal *)
rtb_Sum1_g := (((1.0 / (EXP((((((1.0 / (EXP(((0.013626968820241061 * In1)
+ -1.1191350424041615) * -2.0) + 1.0))) *
2.0) - 1.0) * -0.090802279331460109) + (((1.0 / (EXP((-
0.00999217624493311 * In1) + -0.49391640418486038) *
-2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 0.1663176858009808)) +
0.0029046932421489396) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) + UnitDelay_DSTATE;

```

```

(* Saturate: '<S1>/Saturation' *)
IF rtb_Sum1_g >= 100.0 THEN
    rtb_Sum1_g := 100.0;
ELSIF NOT (rtb_Sum1_g > 0.0) THEN
    rtb_Sum1_g := 0.0;
END_IF;
(* End of Saturate: '<S1>/Saturation' *)

```

```

(* Output: '<Root>/Out1' incorporates:
* Constant: '<S10>/one'
* Constant: '<S1>/Constant29'
* Constant: '<S1>/Constant38'
* Constant: '<S1>/Constant39'
* DotProduct: '<S4>/Dot Product'
* DotProduct: '<S5>/Dot Product'
* DotProduct: '<S6>/Dot Product'
* DotProduct: '<S7>/Dot Product'
* Gain: '<S10>/Gain'
* Gain: '<S10>/Gain1'
* Gain: '<S11>/Gain'
* Gain: '<S11>/Gain1'
* Gain: '<S15>/Gain'
* Gain: '<S15>/Gain1'

```

- * Gain: '<S1>/Gain'
- * Inport: '<Root>/In1'
- * Math: '<S10>/Exp'
- * Math: '<S10>/Reciprocal'
- * Math: '<S11>/Exp'
- * Math: '<S11>/Reciprocal'
- * Math: '<S15>/Exp'
- * Math: '<S15>/Reciprocal'
- * Sum: '<S10>/Sum'
- * Sum: '<S10>/Sum1'
- * Sum: '<S11>/Sum'
- * Sum: '<S11>/Sum1'
- * Sum: '<S15>/Sum'
- * Sum: '<S15>/Sum1'
- * Sum: '<S1>/Add9'
- * Sum: '<S1>/netsum10'
- * Sum: '<S1>/netsum11'
- * Sum: '<S1>/netsum9'
- *
- * About '<S10>/Exp':
- * Operator: exp
- *
- * About '<S10>/Reciprocal':
- * Operator: reciprocal
- *
- * About '<S11>/Exp':
- * Operator: exp
- *
- * About '<S11>/Reciprocal':
- * Operator: reciprocal
- *
- * About '<S15>/Exp':

```

* Operator: exp
*
* About '<S15>/Reciprocal':
* Operator: reciprocal *)
Out1 := (((((1.0 / (EXP((((((1.0 / (EXP(((0.015218714570200064 * In1) +
2.0666739092533777) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) -
1.0) * -7.3307275810928836) + (((1.0 / (EXP(((0.015563587879813916 *
In1) + 2.1007780810576624) * -2.0) + 1.0)) *
2.0) - 1.0) * 7.3655548636428527)) + -0.049757494315143369) * -2.0) +
1.0)) * 2.0) - 1.0) * 100.0) + rtb_Sum1_g;

(* Update for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay' *)
UnitDelay_DSTATE := rtb_Sum1_g;
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Програма представлена структурованою мовою управління Structured Text (ST), за синтаксисом близька до [Pascal](#); Structured Text (ST) — мова програмування стандарту [IEC61131-3](#). Призначена для програмування промислових [контролерів](#) і операторських станцій. Основою St-програми є вираження. Вираження складаються з операндів (констант і змінних) і операторів.

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 нейронної мережі було виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink за відповідним виконавчим кодом. Була розроблена модель САУ з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором були проведена при тих же умовах, що і САУ з традиційним ПД-регулятором.

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 5257 при САУ з нейрорегулятором і 6472 при САУ з традиційним ПД-регулятором.

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

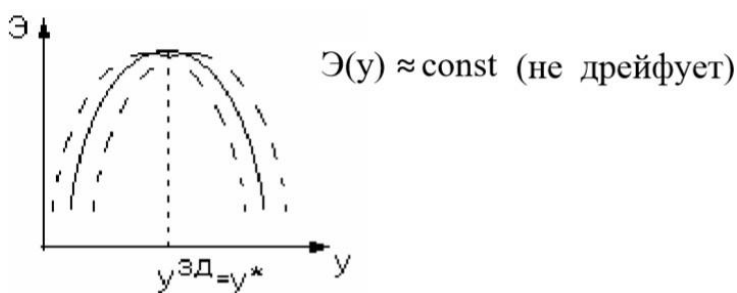
Таким чином, на основі виконаного синтезу і аналізу різних САУ можна зробити заключний висновок, що нейрорегулятор має принципову придатність для практичного використання на базі промислового контролера при об'єктах управління з нелінійними характеристиками за каналам регулювання.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ САК, ЩО РЕАЛІЗУЄ НОВУ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО ПРОСУНУТУ, ФУНКЦІЮ.

4.1. Опис загальних принципів побудови модернізованої системи керування.

У системах регулювання задане значення регульованої змінної або закон його зміни є оптимальними або близькими до оптимальних значень регульованих змінних. У тому випадку, коли в умовах експлуатації, що змінюються, ці оптимальні значення змінюються мало, то для оптимізації режимів роботи технологічного агрегату функції регулювання достатньо [2].

4.1.1. Постановка задачі.



Тобто для окремого випадку, коли дрейфом функції ефективності $\mathcal{E}(y)$ можна знехтувати, то завдання оптимізації вироджується завдання регулювання. Разом про те існують об'єкти, котрим дрейф функції ефективності є значним і нехтувати ним економічно недоцільно. Це означає, що якщо ми хочемо за умов дрейфу екстремуму забезпечувати максимальну ефективність функціонування об'єкта, то заданий режим роботи об'єкта (наприклад, $y^{эд}$) потрібно змінювати. Тобто САУ у разі має реалізувати не тільки функцію регулювання (стабілізувати режим роботи об'єкта на рівні $y^{эд}$), а й має бути доповнена функцією оптимізації, тобто. пошуку такого $y^{эд}$, при якому функція ефективності досягатиме свого екстремуму:

$$y^{эд} = y^* = \operatorname{argmax}(\operatorname{min}) \mathcal{E}(y^{эд}).$$

В цьому випадку об'єкт управління стає об'єктом оптимізації.

У нашому випадку для вирішення задачі оптимізації доцільно використовувати систему екстремального регулювання (СЕР) яка є окремим

випадком САО, що найчастіше використовується в промисловості. Як конкретний варіант вибираємо СЕР із запам'ятовування екстремуму.

4.1.2. Системи оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму.

Дані системи досить часто використовуються у промисловості [2]. Були реалізовані стандартні програми та апаратні оптимізатори (екстремальні регулятори). Розглянемо структурну схему відповідної САО:

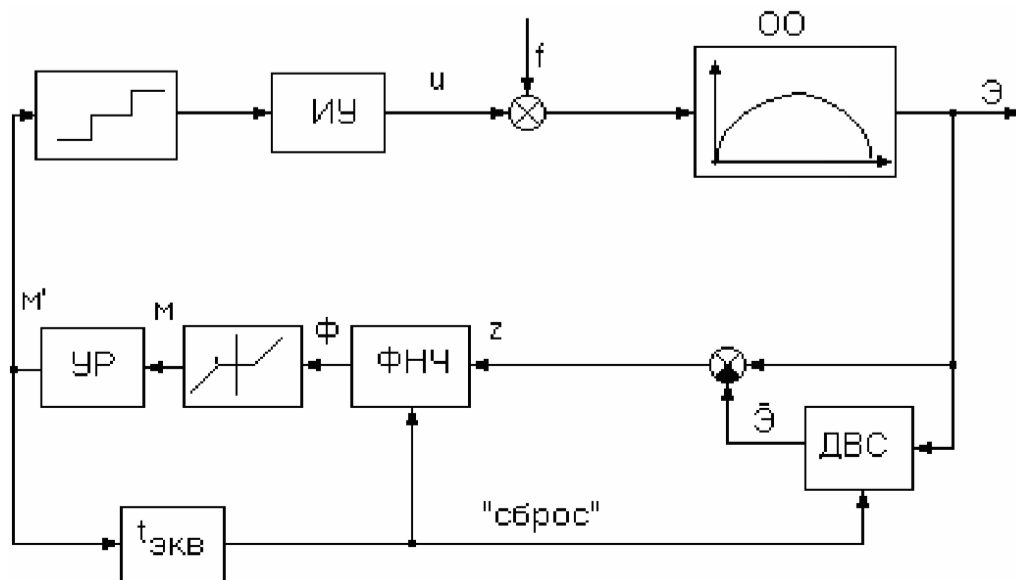


Рис. 4.1. Структурна схема САО із запам'ятовуванням екстремуму (де ДВС – детектор зростаючого сигналу; УР – пристрій реверсу, ФНЧ – фільтр низьких частот).

ДВЗ «пропускає» через себе тільки зростаюче значення Э. У тому випадку, якщо Э починає зменшуватися, то значення Э на виході детектора буде наступним:

$$\text{если } \frac{d\mathcal{E}}{dt} > 0, \text{ то } \mathcal{E}' = \mathcal{E} \qquad \text{если } \frac{d\mathcal{E}}{dt} < 0, \text{ то } \mathcal{E}' = \mathcal{E}^* \Big|_{\frac{d\mathcal{E}}{dt} = 0}$$

ФНЧ і зона нечутливості (ЗН) є захистом від шумів, попереджаючи неправильні реверси. За допомогою їх налаштувань можна впливати на розмах пошукових коливань. Пристрій реверсу видає імпульс на 3-х позиційне реле, яке змушує виконавчий пристрій (інтегратор) змінювати на своєму виході значення впливу, що управляє. Реверс відбувається щоразу при зміні знаку М. Розглянемо часові діаграми роботи системи.

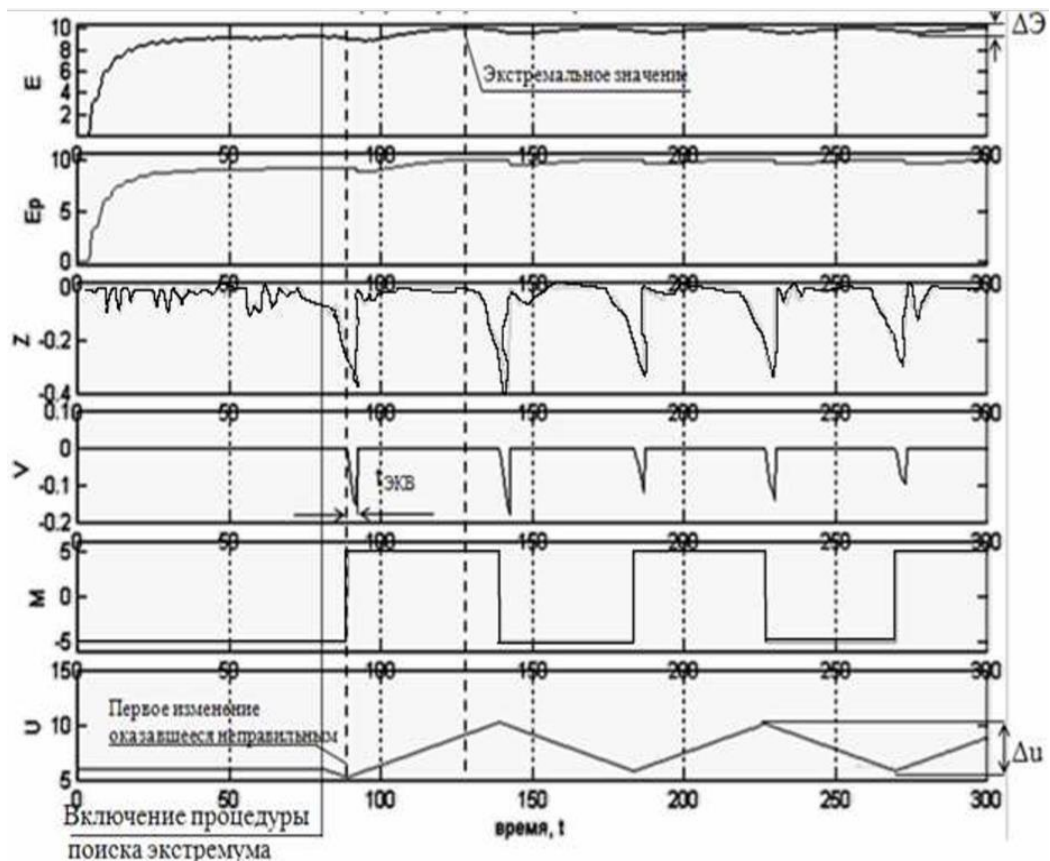


Рис 4.2. Часові діаграми моделювання САО (відображення процедури пошуку екстремуму у часі)

У момент реверсу через ланку запізнення (його значення відповідає еквівалентному запізненню в каналі управління) видається сигнал скидання, який обнуляє ФНЧ, і вихід ДВС записує поточне значення $\mathcal{E}$.

Нехай у момент часу $u = u_0$, а його напрям зміни виявився неправильним, тобто. у бік зменшення $\mathcal{E}$. При цьому сигнал Z і ϕ зростають по модулю (стають «негативнішим»). Після того, як сигнал перевищить ширину зони нечутливості: на виході пристрою реверсу з'явиться імпульс, який змінить стан 3-х позиційного реле і інтегратор почне змінювати сигнал u в протилежному напрямку. Цей напрямок вже буде правильним.

У цьому випадку $\mathcal{E}$ зростатиме, сигнал $\mathcal{E}' \equiv \mathcal{E}$, а сигнали Z , Φ і M дорівнюють нулю. Це триватиме до того часу, поки u стане відповідати $\mathcal{E}^*$, тобто максимальному екстремуму $\mathcal{E}$.

Оскільки в об'єкті та пристрої керування є запізнення, то u продовжуватиме змінюватися в тому ж напрямку. Тоді ДВС перестане

пропускати через себе Θ , запам'ятавши Θ^* . При цьому сигнали Z та Φ почнуть зростати по модулю. Коли Φ досягне зони нечутливості, пристрій реверсу видасть імпульс і змінить стан 3-х позиційного реле, що керує ІУ.

Через $t_{\text{экв}}$ ФНЧ буде обнулено, але в виході ДВС буде записано поточне значення Θ . Змінюючись у напрямі u спочатку викликає збільшення Θ , до Θ^* , та був – його нове зменшення, тобто. робота керуючого пристрою повториться.

Важливо, що в цьому випадку пошук Θ^* здійснюється безперервною зміною u . При цьому ця зміна забезпечується зміною u генерується самої СЕР (самим алгоритмом роботи СЕР). Вона працює у режимі автоколивань.

Слід зазначити, що чим більша амплітуда і частота зміни u (принаймні доти, доки не починаються виявлятися фільтруючі властивості об'єкта оптимізації (ОО)), тим СЕР (обидва варіанти) можуть відстежувати швидші дрейфи екстремумів (і це добре) .

Але велика амплітуда коливань викликає збільшення втрат у пошук, т.к. значення Θ не залишається в Θ^* , а змінюватиметься на околиці екстремуму з тим більшою амплітудою, чим більше амплітуда коливань u , втрати на пошук – погано.

У тому випадку, якщо відомо, що дрейф екстремуму повільний, можна процедуру його пошуку періодично відключати, відновлюючи її примусово через певний час. У момент зупинки значення u доцільно залишити не на останньому значенні, а розрахувати u , наприклад, як середнє коливань для кращого потрапляння в Θ^* .

4.2. Розробка структурної схеми САУ та опис принципу її дії.

На основі САР базової структури розроблено структуру модернізованої САУ, яка передбачає функцію екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Структурна схема САУ представлена на рис. 4.3.

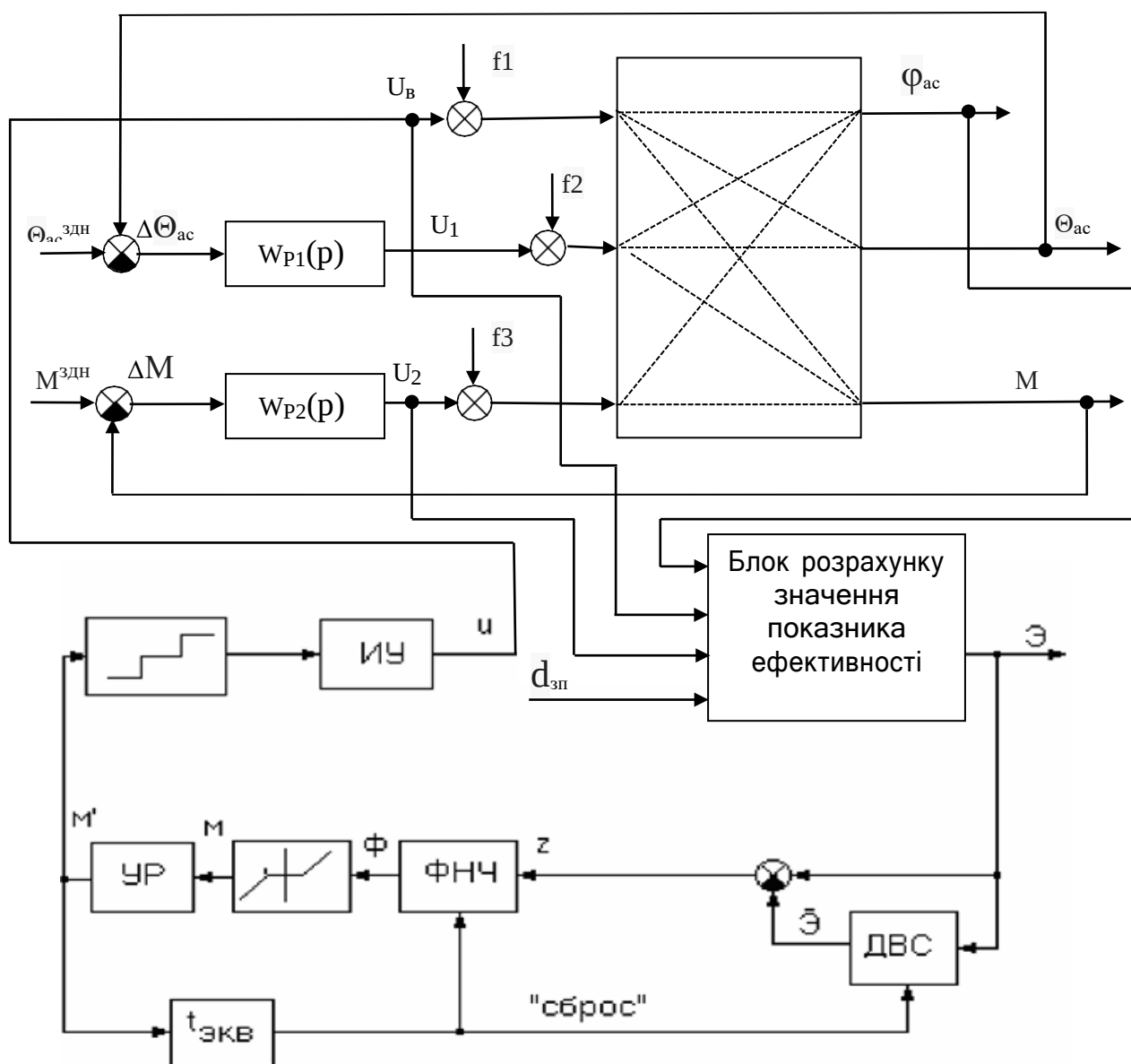


Рис. 4.3. Структурна схема модернізованої системи керування яка додатково реалізує функцію автоматичної оптимізації із запам'ятовуванням екстремуму.

На рисунку:

M - вологість продукту на виході сушарки, %;

Θ_{ac} – температура агенту сушки, °C;

φ_{ac} – відносна вологість агенту сушки на виході з сушарки, %;

$\Theta_{ac}^{здн}$ – задане значення температури агенту сушки, °C;

$M^{здн}$ – задане значення вологості продукту на виході з сушарки, %;

U_b – керуючий вплив, зміна витрат повітря, що надходить у сушарку, %х.р.о.

U_1 – керуючий вплив, зміна положення регулюючого органу подачі пари у калорифери сушарки, %х.р.о.

U_2 – керуючий вплив, зміна швидкості стрічки конвеєра з продуктом, %х.р.о.

$W_{p1}(p)$ – передаточна функція регулятора температури агенту сушки

$W_{p2}(p)$ – передаточна функція регулятора вологості продукту на виході з сушарки;

$d_{зп}$ – вологовміст зовнішнього атмосферного повітря, г/кг;

$f_1 \dots f_3$ – вектори координатних збурень

Показник ефективності Ξ розраховується в «Блок розрахунку значення показника ефективності» спрощено на основі наступного виразу:

$$\Xi = G_{ов}(t) / Q(t)$$

де

$G_{ов}(t)$ – поточна продуктивність установки, кг/год

$Q(t)$ – тепловий потік, який поступає до камери сушіння з сушильним агентом, кДж/с.

Поточна продуктивність установки може розраховуватись у контурі стабілізації кінцевої вологи овочів ($M(t)$) за рахунок зміни швидкості конвеєра і таким чином залежить від поточного значення вологості $G_{ов}(t)=f(M(t))$. Поточна продуктивність установки приблизно може розраховуватися за формулою:

$$G_{\text{ов}}(t) = k_1 * U_2$$

де

U_2 – керуюча дія швидкість конвеєра з продуктом, % х.р.о.

k_1 – узгоджуючий коефіцієнт.

Парові калорифери що встановлені в сушарці формують тепловий потік, який буде поступати до камери сушіння з сушильним агентом Q , кДж/с. Тепловий потік є функцією двох змінних і залежить від їх множення

$$Q(t) = f(G_{\text{са}}(t), \Theta_{\text{ас}}(t)), \text{ кДж/с};$$

$G_{\text{са}}(t)$ – витрата сушильного агента, кг/с ;

$\Theta_{\text{ас}}(t)$ – температура агента сушки яка задана технологією сушіння, °С.

Будемо вважати що контур стабілізації $\Theta_{\text{ас}}$ працює досить швидко и приймемо цю температуру як фіксовану незмінну величину. При фіксованому значенні температури сушильного агента тепловий потік буде залежати тільки від витрати сушильного агента $G_{\text{са}}(t)$. Поточні витрати сушильного агента приблизно може розраховуватися за формулою:

$$G_{\text{са}}(t) = k_2 * U_{\text{в}}$$

де k_2 – узгоджуючий коефіцієнт.

Значення поточної продуктивності сушарки $G_{\text{ов}}(t)$ фактично розраховується в контурі стабілізації вологості продукту на виході з сушарки $M(t)$. В свою чергу вологість $M(t)$ залежить від швидкості випаровування води з продукту $G_{\text{вп}}(t)$ [г/сек]. Чим більше $G_{\text{вп}}(t)$ тим менше стає вологість $M(t)$ і система регулювання збільшує продуктивність $G_{\text{ов}}(t)$. Тобто у критерії можна величину $G_{\text{ов}}(t)$ замінити $G_{\text{вп}}(t)$. Це дозволить зменшити запізнення в розрахунку значення показника ефективності Ξ . І не чекати поки сформується нове значення $G_{\text{ов}}(t)$ в контурі стабілізації $M(t)$.

В цьому випадку показник ефективності Ξ можна розраховувати на основі виразу:

$$\Xi = G_{\text{вп}}(t) / Q(t)$$

Швидкість випаровування вологи з продукту $G_{\text{вп}}(t)$ можна розрахувати наступним чином:

1. Залежність відносної вологості агенту сушки на виході з сушарки від його вологовмісту може бути описано наступним виразом:

$$\varphi_{\text{ca2}} = \begin{cases} \frac{B d_{\text{ca2}} 100}{10^{\frac{7.25 T_{\text{ca2}}}{0.622 + (238 + T_{\text{ca2}})}} (622 + d_{\text{ca2}})}, & T_{\text{ca2}} < T_{\text{в}}^{\text{к}} \\ \frac{d_{\text{ca2}} 100}{(622 + d_{\text{ca2}})}, & T_{\text{ca2}} \geq T_{\text{в}}^{\text{к}} \end{cases},$$

де φ_{ca2} – відносна вологість агенту сушки на виході з сушарки, %;

B – атмосферний тиск повітря, мм. рт. ст.;

$T_{\text{в}}^{\text{к}}$ – температура кипіння води, $^{\circ}\text{C}$;

T_{ca2} – температура агенту сушки на виході з сушарки, $^{\circ}\text{C}$;

d_{ca2} – вологовміст агенту сушки на виході з сушарки, г/кг.

Таким чином вимірюючи значення відносної вологості та температури агенту сушки на виході з сушарки можна розрахувати його вологовміст.

2. Проводимо розрахунок швидкості випаровування вологи з продукту $G_{\text{вп}}(t)$ за наступною формулою:

$$G_{\text{вп}}(t) = d_{\text{ca2}} * G_{\text{ca}}^{\text{с}}(t) - d_{\text{зп}} * G_{\text{ca}}^{\text{с}}(t)$$

де $G_{\text{ca}}^{\text{с}}(t)$ – масові витрати сухої частини зовнішнього повітря що надходить у сушарку, кг/сек.

Цей показник ефективності має екстремальний характер. При зростанні теплового потоку (витрат сушильного агенту при фіксованій температурі) швидкість видалення вологи з овочів теж буде зростати, вологість овочів на виході з сушарки $M(t)$ буде знижуватися і система стабілізації вологості буде збільшувати продуктивність сушарки U_2 . Тобто критерій буде збільшуватися. При подальшому збільшені витрат сушильного агенту можлива ситуація коли швидкість видалення вологи з овочів перестане зростати і може поступово знижуватися, що призведе до стабілізації продуктивності сушарки або її зменшення. Тобто показник якості спочатку буде зростати а потім буде

зменшувати своє значення. Це характерно як при розрахунку показника ефективності на основі $G_{\text{ов}}(t)$ так і на основі $G_{\text{вп}}(t)$.

Задача системи що представлена на рис.4.3 знаходити оптимальне значення витрат сушильного агенту (U_v), при якому обраний показник ефективності Ξ буде приймати максимальне значення.

У розробленій системі передбачено регулювання температури сушильного агенту в сушильній камері та вологості продукту на виході з сушарки. Система стабілізує ці параметри на заданих значеннях. Також у системі реалізовано функцію екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Для її реалізації в блоці «Блок розрахунку значення показника ефективності» на основі формул, представлених вище, проводиться розрахунок поточного значення обраного показника ефективності. Розраховане значення показника ефективності передається в блоки, що реалізують алгоритм роботи екстремальної системи, обробляється там, і виконавчий пристрій (ИУ) формує керуючу дію, що змінює значення витрат сушильного агенту (U_v). Алгоритм роботи системи описано у п.п. 4.1.2 та передбачає її роботу в режимі автоколиваний. Керуюча дія змінюється таким чином, що поточне значення показника ефективності коливається в області екстремального значення.

4.3. Обґрунтування настроювальних параметрів нових алгоритмів управління.

Параметри регуляторів температури та вологості продукту на виході з сушарки залишимо колишніми отриманими раніше при проведенні оптимального параметричного синтезу.

Настроювальні параметри екстремальної системи регулювання із запам'ятовуванням екстремуму задаватимемо на основі динамічних властивостей каналу $U_v - \varphi_{\text{ca2}}(t)$ та абсолютних значень показника ефективності (для розрахунку настроювальних параметром зони нечутливості).

4.4 Розробка схеми імітаційного моделювання САУ і дослідження її роботи

4.4.1. Доопрацювання математичної моделі ОР до моделі ОО на вирішення завдання оптимального управління.

У пункті 1.2 наведено тільки варіанти систем регулювання кінцевої вологості овочів у сушарці. Тому використовуючи літературні данні [1] і досвід розробки динамічних моделей, була реалізована модель динаміки сушарки овочів як об'єкту керування (рис. 4.4).

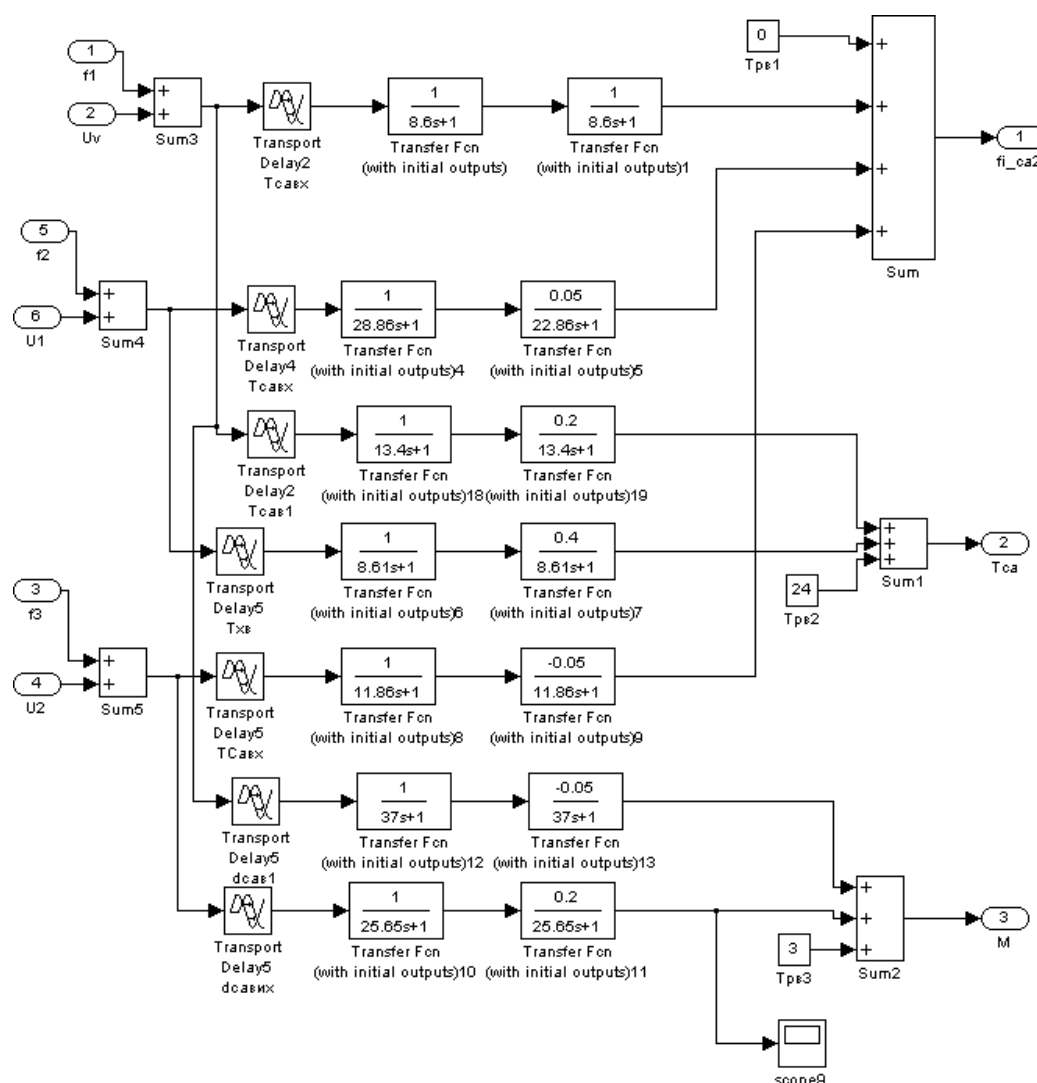


Рис. 4.4. Схема моделювання сушарки овочів як об'єкта керування.

Модель сушарки як ОК реалізована відповідно до структурної схеми зображеної на рис.2.3. В моделі ОК передбачені канали регулювання температури агенту сушіння та вологості овочів на виході з зерносушарки. Також реалізовані моделі перехресних каналів та наближена модель залежності відносної вологості агенту сушіння на виході з сушарки від частоти обертів вентилятору, що прокачує повітря скрізь сушарку.

На основі моделі було реалізовано моделі САР температури сушильного агенту та вологості овочів на виході з сушарки (рис.4.5). Налаштування ПД регуляторів виконувались з використанням методики А.П. Копеловича. Результати моделювання САР наведено на рис. 4.6 та 4.7.

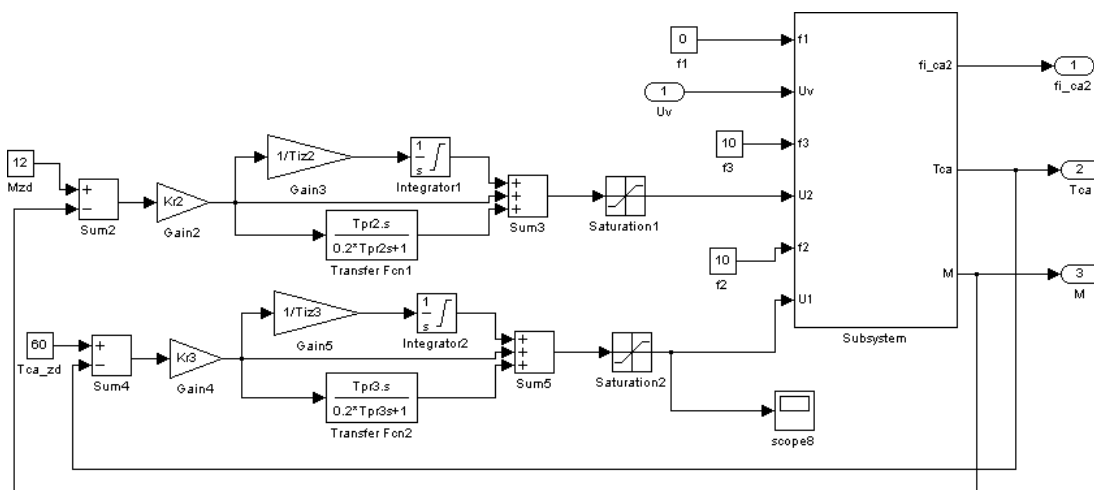


Рис. 4.5. Схема моделювання САР сушарки овочів.

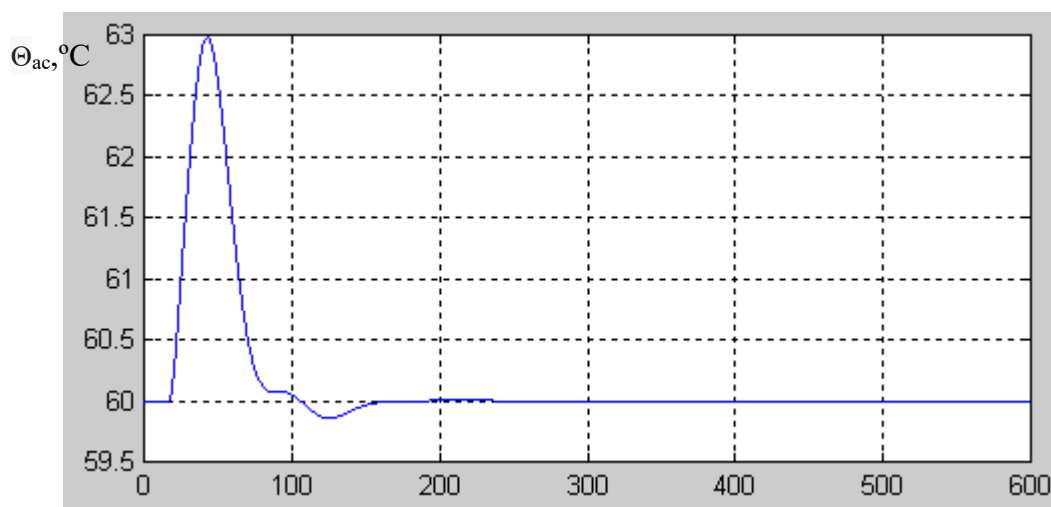


Рис. 4.6. Результати моделювання САР температури агенту сушіння.

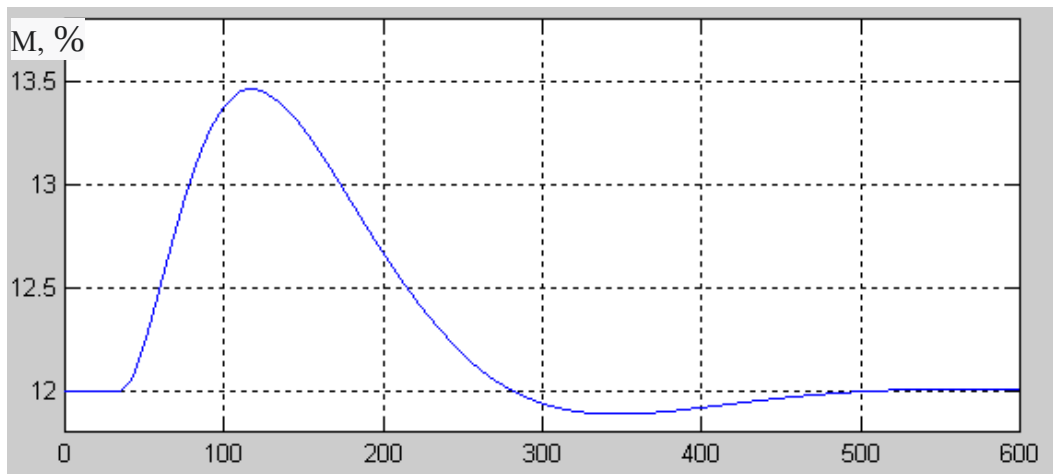


Рис. 4.7. Результати моделювання САР вологості продукту на виході з сушарки

Для побудови екстремальної системи оптимізації з запам'ятовуванням екстремуму модель ОР була дороблена. Розроблена система регулювання не відображає нелінійні властивості об'єкта регулювання, тому існуюча модель ОК була доповнена спрощеною моделлю показника ефективності. Модель ефективності представлена наступною нелінійною квадратичною залежністю:

$$\Theta = a * (U_B - U_{B_e})^2 + \Theta_e$$

де

U_{B_e} і Θ_e – координати екстремуму;

a – коефіцієнт крутості параболи.

Повна схема моделювання об'єкту оптимізації представлена на рис. 4.9.

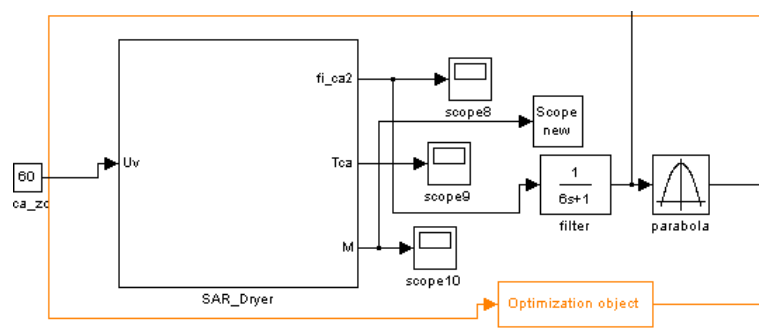


Рис. 4.8. Загальний вид схеми моделювання об'єкту оптимізації (ОО).

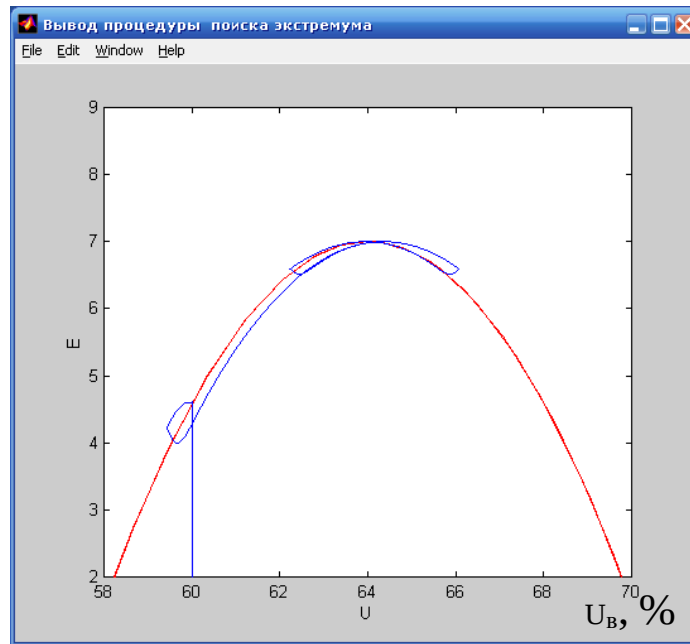


Рис. 4.10. Графік зміни показника ефективності $\Xi(U_B)$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації.

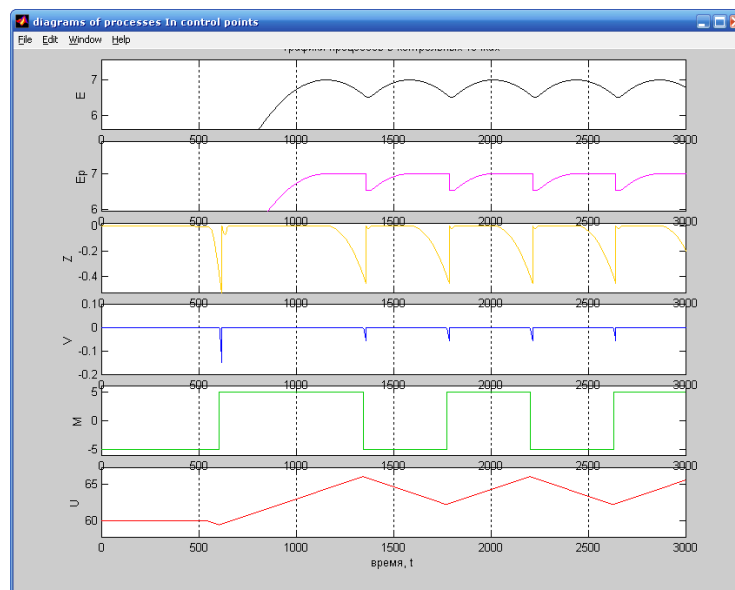


Рис. 4.11. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації.

На рис. 4.14 – 4.17 представлені результати моделювання екстремальної системи оптимізації при дрейфі екстремуму функції ефективності. Як видно з результатів моделювання система працює коректно, вона відстежує зміну положення екстремуму функції ефективності як при дрейфі по осі ординат, так і при дрейфі положення екстремуму по осі абсцис

і по осі ординат одночасно. Поточне значення показника ефективності у всіх випадках коливається навколо свого екстремального значення.

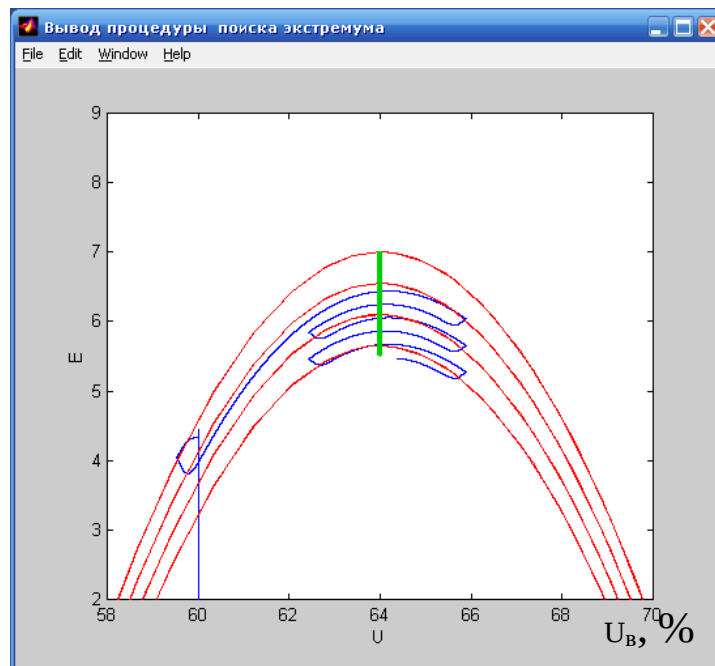


Рис. 4.12. Графік зміни показника ефективності $\Xi(U_B)$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

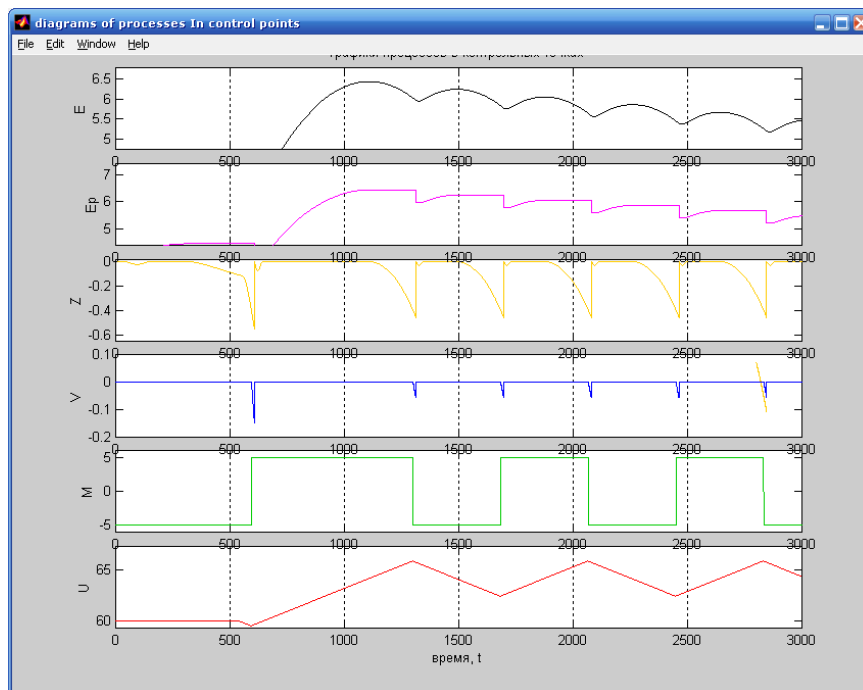


Рис. 4.13. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

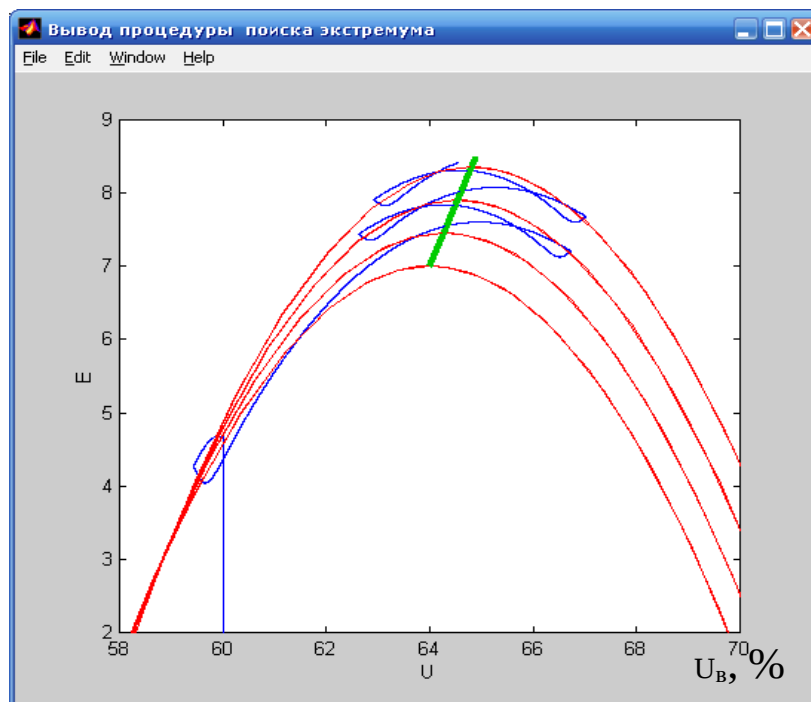


Рис. 4.14. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(U_B)$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

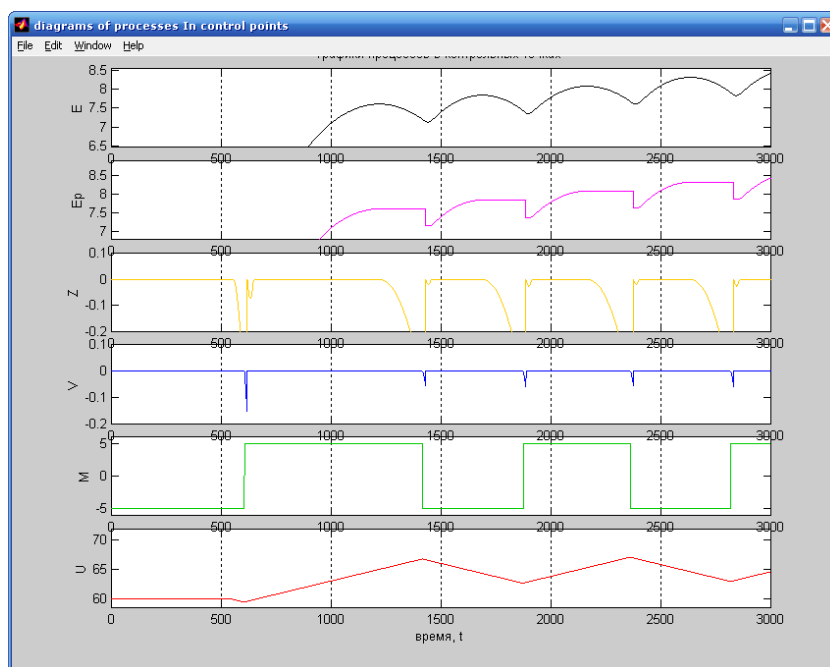


Рис. 4.15. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

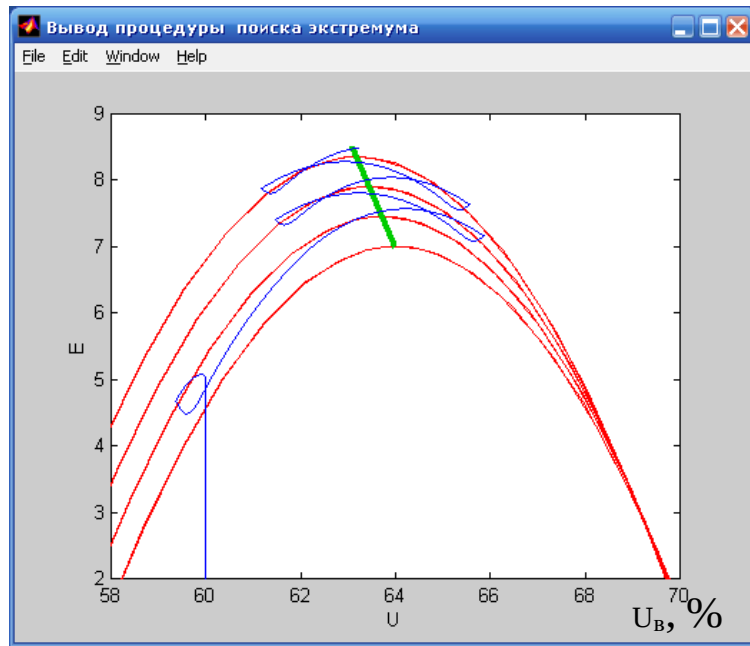


Рис. 4.16. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(U_B)$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації і дрейфі екстремуму.

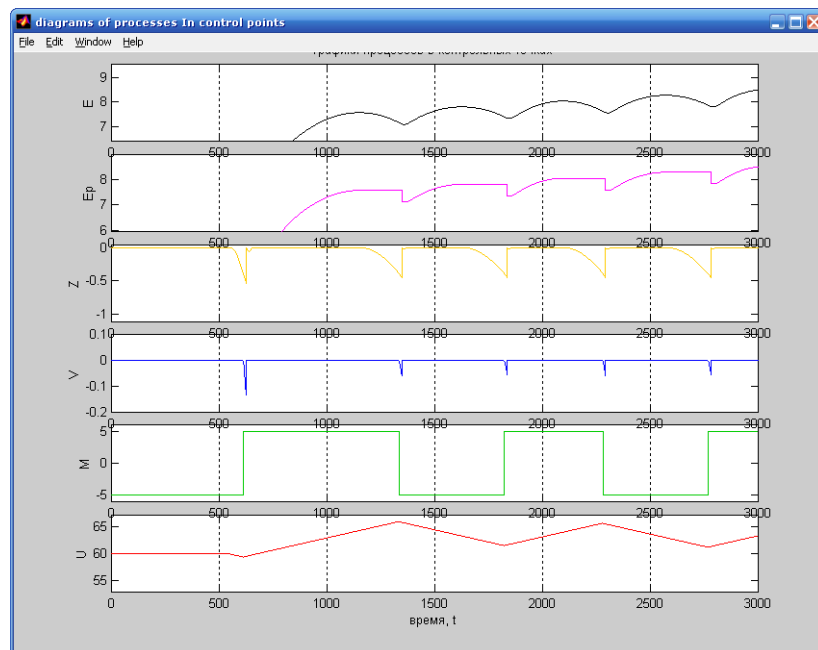


Рис. 4.17. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації при дрейфі екстремуму.

На рис. 4.18 – 4.21 представлені результати моделювання екстремальної системи оптимізації при різних значення зони нечутливості, при її зменшенні в два рази (рис. 4.15 і 4.16) та при її збільшенні відносно

номінального значення. Як видно з результатів моделювання система працює коректно, вона знаходить положення екстремуму функції ефективності але при великих значеннях зони нечутливості втрати на пошук більші.

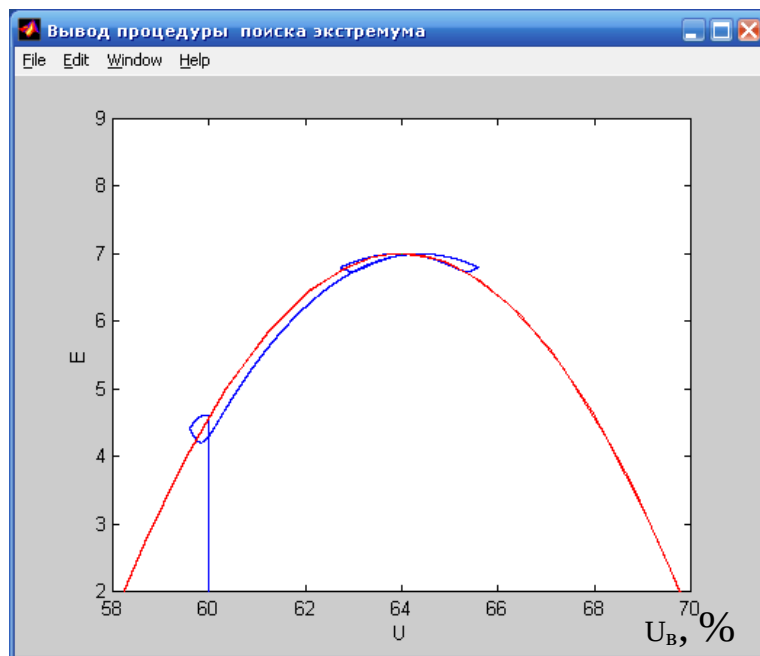


Рис. 4.18. Графік зміни показника ефективності $\mathcal{E}(U_B)$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації зі зменшеною зоною нечутливості.

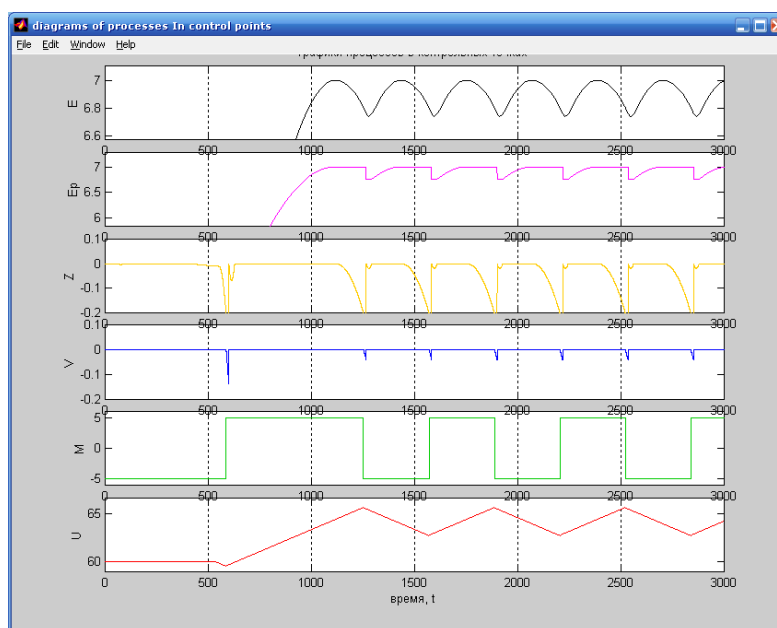


Рис. 4.19. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації зі зменшеною зоною нечутливості.

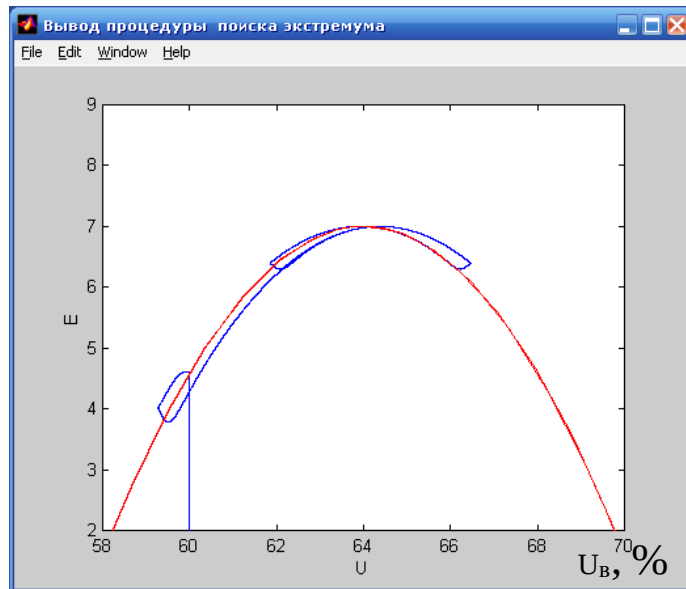


Рис. 4.20. Графік зміни показника ефективності $\Xi(U_B)$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації зі збільшеною зоною нечутливості.

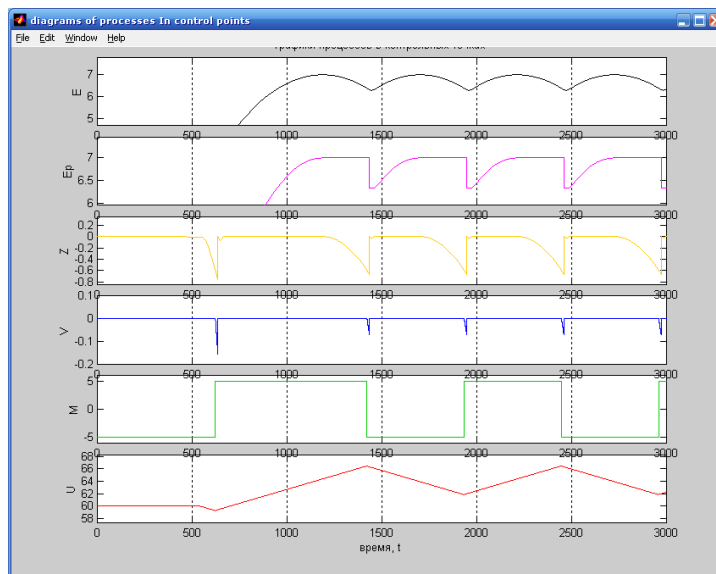


Рис. 4.21. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації зі збільшеною зоною нечутливості.

На рис. 4.21 – 4.23 представлені результати моделювання екстремальної системи оптимізації при збільшенні значення крутизни параболі в 1.5 рази відносно номінального значення.

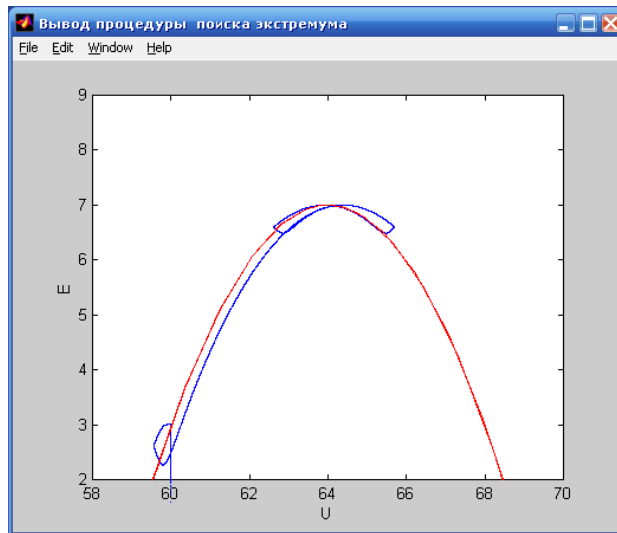


Рис. 4.22. Графік зміни показника ефективності $\Xi(U_B)$ (фазовий портрет) під час роботи системи оптимізації зі збільшеною крутизною параболи.

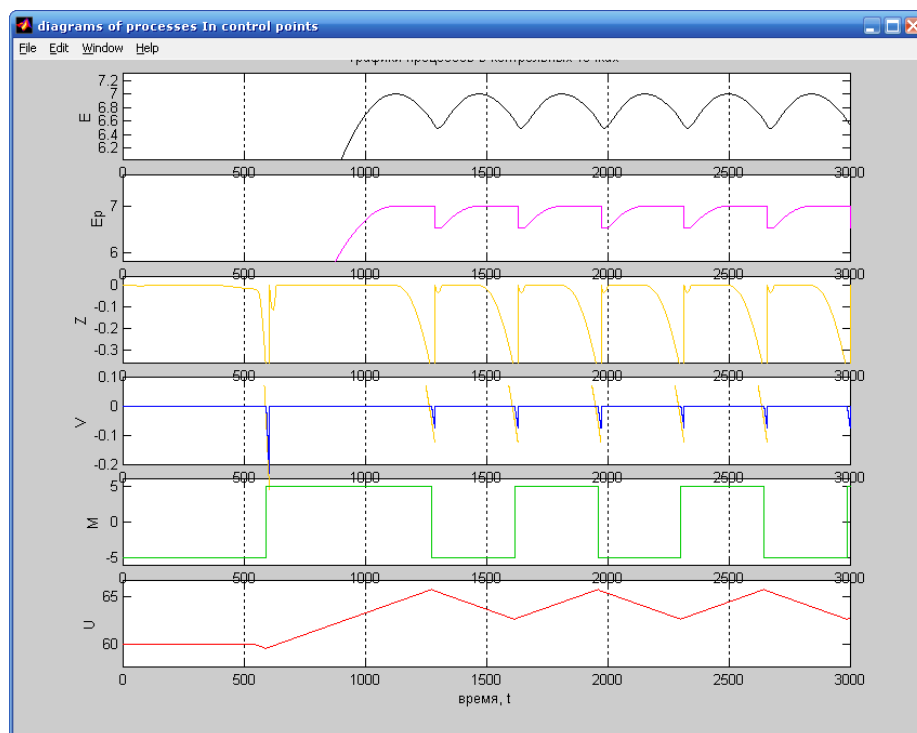


Рис. 4.23. Динаміка зміни основних координат під час роботи системи оптимізації зі збільшеною крутизною параболи

Система працює коректно, але при збільшенні крутизни параболи збільшуються і втрати на пошук.

ВИСНОВКИ за розділом

У 4 розділі роботи розроблено та досліджено модернізовану САК процесом сушіння овочів у стрічковій сушарці. САК реалізує нову функцію оптимізації витрат сушильного агенту з метою мінімізувати питомі витрати теплової енергії на сушіння. Для вирішення цієї задачі було розроблено критерій оптимальності. Функція оптимізації реалізована на основі алгоритмів екстремального регулювання із запам'ятовуванням екстремуму. Реалізація цієї функції забезпечує підвищення ефективності процесу сушіння овочів в умовах змінних властивостей сировини та параметрів енергоносіїв за рахунок відстеження дрейфуючого значення екстремуму функції ефективності та підтримки поточного значення показника ефективності в околиці екстремального значення.

У роботі з використанням метода імітаційного моделювання було проведено низку досліджень розробленої системи. Результати досліджень показали працездатність системи у різних режимах роботи та її ефективність.

РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ

5.1 Аналіз вхідних і вихідних сигналів і вибір топології побудови системи

Оскільки ПЛК та допоміжне устаткування розташовуються в одному приміщенні компактно, тому виберемо централізовану схему розміщення модулів системи керування.

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

Виконавши аналіз САР (розділ 2), та схем автоматизації, складемо таблицю (табл. 5.1) зі списком параметрів, які повинні вводитись і виводитись з контролера.

Таблиця 5.1 Список параметрів, які вводяться і виводяться із контролера

№ пп	Назва параметра	Умовне позначення	Вид сигналу A/D	Тип сигналу I/O	Діапазон сигналу на вході/виході контролера	Позначен ня на схемах
1	Температура агенту сушіння під стрічкою №1	Tsa1	A	I	(4-20 мА)	AI1
2	Температура агенту сушіння над стрічкою №1	Tsa2	A	I	(4-20 мА)	AI2
3	Температура агенту сушіння під стрічкою №2	Tsa3	A	I	(4-20 мА)	AI3
4	Температура агенту сушіння над стрічкою №2	Tsa4	A	I	(4-20 мА)	AI4
5	Температура агенту сушіння під стрічкою №3	Tsa5	A	I	(4-20 мА)	AI5
6	Температура	Tsa6	A	I	(4-20 мА)	AI6

	агенту сушіння над стрічкою №3					
7	Температура агенту сушіння під стрічкою №4	Tsa7	A	I	(4-20 мА)	AI7
8	Температура агенту сушіння над стрічкою №4	Tsa8	A	I	(4-20 мА)	AI8
9	Температура агенту сушіння під стрічкою №5	Tsa9	A	I	(4-20 мА)	AI9
10	Температура агенту сушіння над стрічкою №5	Tsa10	A	I	(4-20 мА)	AI10
11	Вологість фруктів на виході сушарки	Wf	A	I	(4-20 мА)	AI11
12	Положення ВМ 4в	GE1	A	I	(4-20 мА)	AI12
13	Положення ВМ 5в	GE2	A	I	(4-20 мА)	AI13
14	Керуюча дія відкриття клапану пару 4в	U_f_1	A	O	(4-20 мА)	AO1
15	Керуюча дія ступінь відкриття клапану пару 5в	U_f_2	A	O	(4-20 мА)	AO2
16	Керуюча дія зміна швидкості стрічки з продуктом	U_f_3	A	O	(4-20 мА)	AO3
17	Сигнал керування електродвигуном стрічок №1 та №2 M1	M1	D	O	«відкритий колектор»	DO1
18	Сигнал с доп. контакта пускателя ЕД стрічок №1 та №2 M1	M1_KM	D	I	«сухий контакт»	DI1
19	Сигнал	M2	D	O	«відкритий	DO2

	керування електродвигуном стрічки №3				колектор»	
20	Сигнал с доп. контакта пускача ЕД стрічки №3 М2	M2_KM	D	I	«сухий контакт»	DI2
21	Сигнал керування електродвигуном стрічок №4 та №5 М3	M3	D	O	«відкритий колектор»	DO3
22	Сигнал с доп. контакта пускача ЕД стрічок №4 та №5 М3	M3_KM	D	I	«сухий контакт»	DI3
23	Сигнал кнопки авт. пуска	SB_pusk	D	I	«сухий контакт»	DI4
24	Сигнал кнопки авт. останова	SB_stop	D	I	«сухий контакт»	DI5
25	Сигнал керування звук. сигнал.	HA	D	O	«відкритий колектор»	DO4

Кількість каналів вводу/виводу:

AI – 13, AO – 3, DI – 5, DO – 4

5.2. Розробка технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування.

Технічну структуру системи управління розробимо на базі контролера Simatic S7-300.

Для реалізації системи управління в модулях УЗО контролера повинні бути передбачені: 13 - аналогових входів, 3 - аналогових виходи, 5 – дискретних входів і 4 - дискретних виходів. Виходячи з сформованої таблиці та середньої складності алгоритмів керування, для реалізації системи управління скористаємося контролером CPU 313C-2DP з модулями УЗО SM 331 - AI8 (2шт), SM 332 - AO4.

Компактний центральний процесор CPU 313C-2DP 6ES7313-6CG04-0AB0 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.
- Мікро карта пам'яті (до 8 Мбайт), яка у ролі завантажувальної пам'яті, а також збереження архіву проекту (з коментарями і таблицею символів), архівування даних і управління рецептами.
- Гнучкі можливості розширення; підключення до 31 модуля S7-300 (4-рядна конфігурація).
- Інтерфейс MPI; дозволяє встановлювати одночасно до 8 з'єднань з програмованими контролерами S7-300/400, программаторами, комп'ютерами та панелями операторів. Одне з цих сполук зарезервовано для PG-, одне - для OP функцій зв'язку.

MPI дозволяє створювати найпростіші мережеві структури з об'єднанням до 16 центральних процесорів і підтримкою механізму передачі глобальних даних .

- Інтерфейс PROFIBUS DP ; інтерфейс ведучого або веденого DP пристрої для роботи в системах розподіленого вводу -виводу. З точки зору користувача системи локального і розподіленого вводу - виводу повністю ідентичні. Для них використовуються однакові способи конфігурування , адресації та програмування.

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

Аналоговий модуль вводу SM 331; AI 8 x 13 Bit (6ES7331-1KF01-0AB0) Номер для замовлення 6ES7331-1KF01-0AB0

Характеристики

Аналоговий модуль введення SM 331; AI 8 x 13 Bit володіє наступними властивостями:

- 8 входів
- дозвіл вимірюваного значення 12 бітів + знак
- обраний вид виміру:
 - напруга - струм - опір - термоопір
- гальванічна розв'язка щодо інтерфейсу з задньою шиною

На Рисунку 5.1. показані деякі приклади підключення для різних видів вимірювань на каналах 4 - 7.

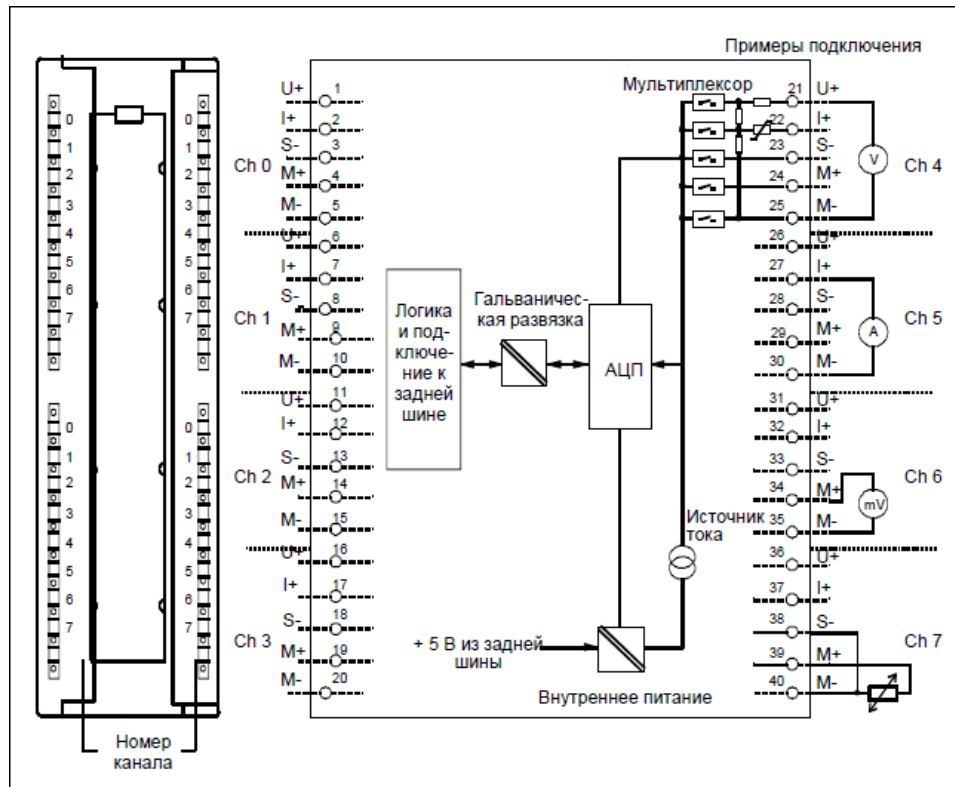


Рис.5.1. Схема підключення і принципова схема SM 331; AI 8 x 13 Bit

При підключенні датчиків струму і напруги треба, щоб не було перевищено максимально допустима синфазна напруга UCM 2 В між входами. Тому для запобігання помилкових вимірів з'єднайте один з одним окремі клеми M-. Немає необхідності з'єднувати між собою клеми M-при вимірюванні опорів і термометрів опору.

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

Технические данные SM 331; AI 8 x 13 Bit

Размеры и вес		Формирование аналоговых значений		
Размеры Ш x В x Г (в миллиметрах)	40 x 125 x 117	Принцип измерения	интегрирующий	
Вес	ок. 250 г	Время интегрирования/ разрешение (на канал)		
Особые данные модуля		- параметризуемое - подавление помех для частоты f1 в Гц - время интегрирования в миллисекундах - основное время преобразования включая время интегрирования в миллисекундах - дополнительное время преобразования при измерении сопротивления, в мс - Разрешающая способность в битах (вкл. перегрузку)	Да	60
Поддержка режима тактовой синхронизации	Нет		60	50
Количество входов	8		66	55
для датчиков сопротивления	8		13 бит	13 бит
Длина кабеля		Подавление помех, границы ошибок		
экранированного	макс. 200 м макс. 50 м при 50 мВ	Подавление помех для f = n (f1 ± 1 %), (f1 = частота помех) n = 1, 2		
Напряжения, токи, потенциалы		- синфазная помеха (U_{см} < 2 В) - противофазная помеха (пиковое значение помехи < номинального значения входного диапазона)		
Ток постоянной величины для датчиков сопротивления		Перекрестная помеха между входами		
- Термометр сопротивления и измерение сопротивления 0 ... 600 Ом - измерение сопротивления 0 ... 6 кОм	0,83 мА 0,25 мА			
Гальваническая развязка				
- между каналами и задней шиной - между каналами	Да Нет			
Допустимая разность потенциалов				
- между входами (U_{см}) - между входами и M_{internal} (U_{ISO})	= 2,0 В = 75 В / ~ 60 В			
Изоляция проверена при	= 500 В			
Потребление тока				
из задней шины	макс. 90 мА			
Мощность потерь модуля	тип. 0,4 Вт			

Аналоговый модуль вывода SM 332; АО 4 x 12 Bit (6ES7332-5HD01-0AB0)

Характеристики

Аналоговый модуль вывода SM 332; АО 4 x 12 Bit володіє наступними

властивостями:

- 4 вихідних каналу
- окремі вихідні канали можуть бути параметризовані як

Технические данные SM 332; АО 4 x 12 Bit

Размеры и вес		Формирование аналоговых значений	
Размеры Ш x В x Г (в миллиметрах)	40 x 125 x 117	Разрешающая способность, включая знак	
Вес	ок. 220 г	± 10 В; ± 20 мА; 11 битов + знак - от 4 до 20 мА; от 1 до 5 В - от 0 до 10 В; от 0 до 20 мА 12 битов	
Особые данные модуля		Время преобразования (на канал)	макс. 0,8 мс
Поддержка режима тактовой синхронизации	Нет	Время установления	
Количество выходов	4	- для омической нагрузки 0,2 мс - для емкостной нагрузки 3,3 мс - для индуктивной нагрузки 0,5 мс (1 мГн)	3,3 мс (10 мГн)
Длина кабеля		Подавление помех, границы ошибок	
экранированного макс. 200 м		Перекрестная помеха между выходами	> 40 дБ
Напряжения, токи, потенциалы		Граница эксплуатационной ошибки (во всем диапазоне температур, относительно выходного диапазона)	
Номинальное напряжение на нагрузке L +	= 24 В	- потенциальные выходы ± 0,5 % - токовые выходы ± 0,6 %	
защита от обратной полярности	Да	Основная ошибка (предельная эксплуатационная ошибка при 25° C, относительно выходного диапазона)	
Гальваническая развязка		- потенциальные выходы ± 0,4 % - токовые выходы ± 0,5 %	
между каналами и задней шиной	Да	Температурная ошибка (относительно выходного диапазона)	± 0,002 %/K
между каналами и блоком питания электроники	Да	Ошибка линеаризации (относительно выходного диапазона)	± 0,05 %
между каналами	Нет	Повторяемость (в установившемся режиме 25° C, относительно выходного диапазона)	± 0,05 %
между каналами и напряжением на нагрузке L+	Да	Пульсации на выходе; диапазон от 0 до 50 кГц (относительно выходного диапазона)	± 0,05 %
Допустимая разность потенциалов		Состояние, прерывания, диагностика	
- между S- и M_{ANA} (U_{CM}) = 3 В - между M_{ANA} и M_{Internal} (U_{ISO}) = 75 В / ~ 60 В		Прерывания	
Изоляция проверена при	= 500 В	диагностическое прерывание	параметризуемое
Потребление тока		Диагностические функции	параметризуемые
- из задней шины макс. 60 мА - из источника питания нагрузки L+ (без нагрузки) макс. 240 мА		- индикатор групповой ошибки - считывание диагностической информации	красный светодиод (SF) возможно
Мощность потерь модуля	тип. 3 Вт	Возможность применения заменяющего значения	Да, параметризуемая

Контроль обрыву проводу

Аналоговый модуль вывода SM 332; АО 4 x 12 Bit

виконує контроль

обриву проводу тільки для струмових виходів.

Перевірка на коротке замикання

Аналоговий модуль виведення SM 332; АО 4 x 12 Bit

виконує перевірку на

коротке замикання тільки для потенційних виходів.

5.3. Програмне конфігурування контролера

У середовищі Simatic Manager Step7 створюємо проект і додаємо до його складу станцію контролера S7-300. У програмі «Hardware» виконуємо конфігурування обраного контролера і модулів УСО. Загальний вид вікна програми «Hardware» з встановленим контролером і модулями УСО представлений на рис. 5.3 При конфігуруванні необхідні модулі вибиралися з каталогу елементів, що входить в програму «Hardware».

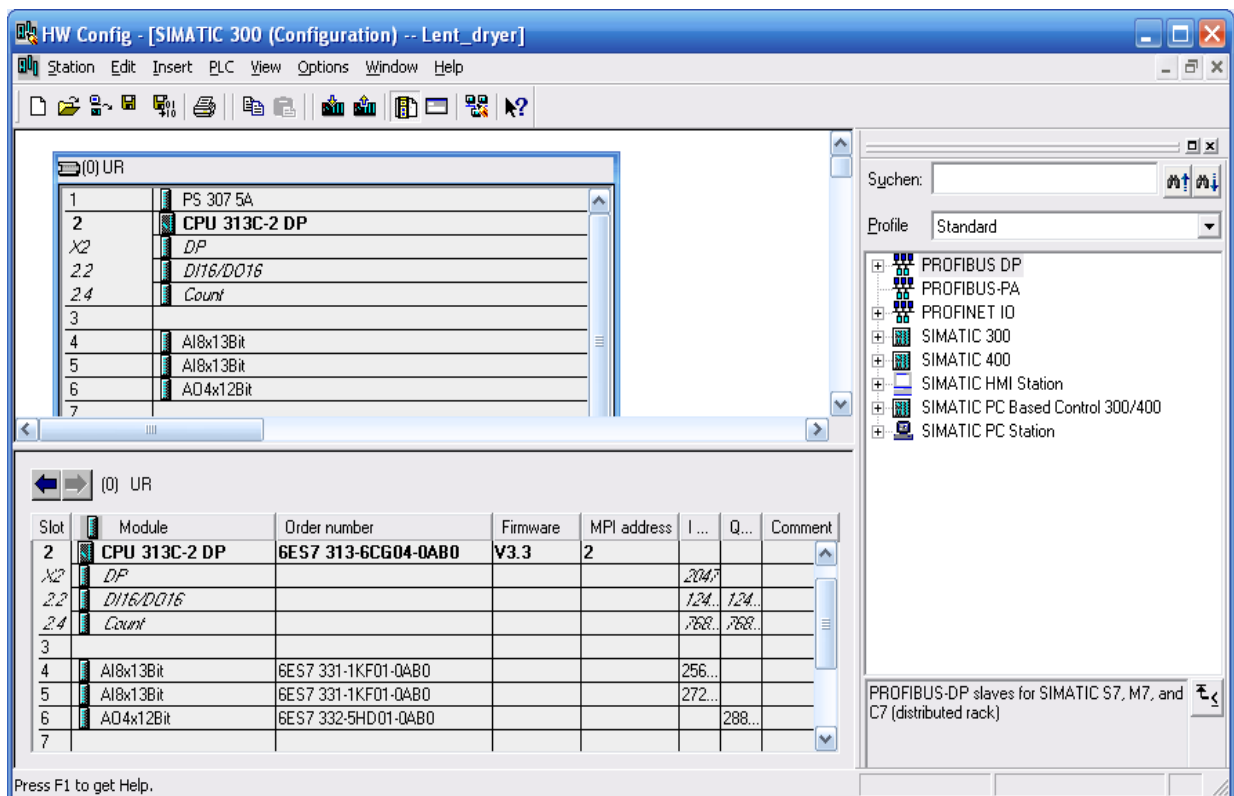


Рис.5.3 Загальний вид вікна програми «Hardware»

Конфігурування типів і діапазонів виміру для аналогових модулів представлено на рис. 5.4.

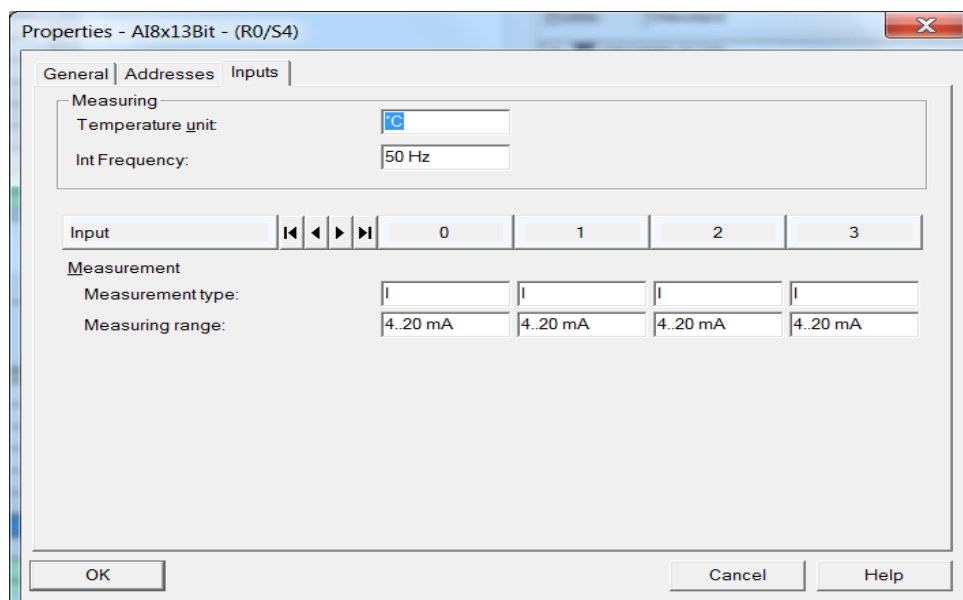


Рис.5.4. Загальний вигляд вікна конфігурування модуля аналогового вводу.

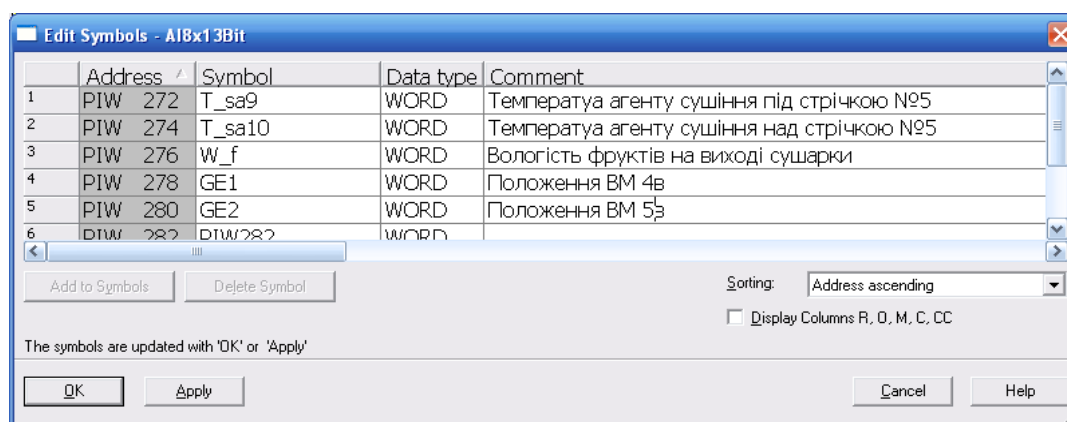
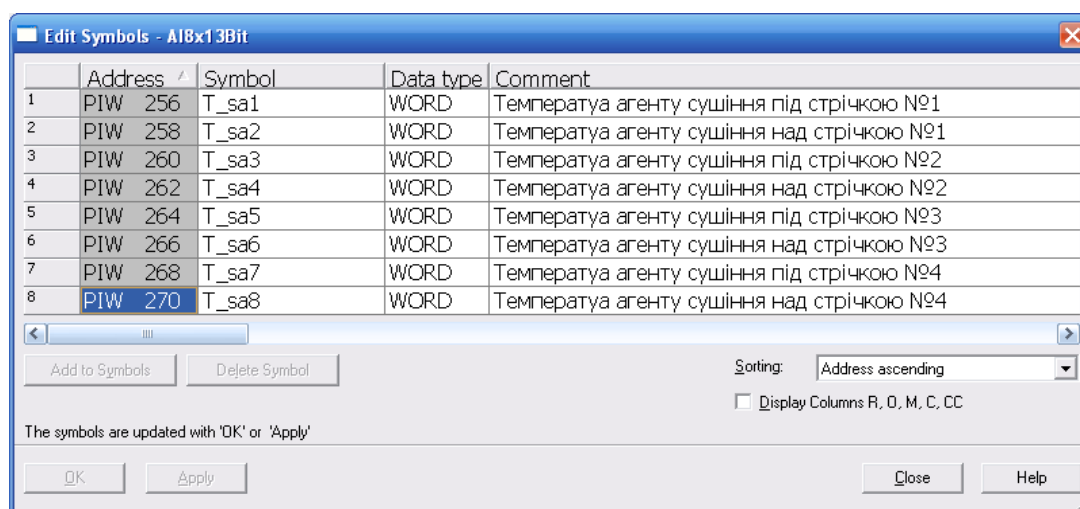


Рис.5.5. Загальний вигляд вікон завдання символічних імен входів аналогових модулів.

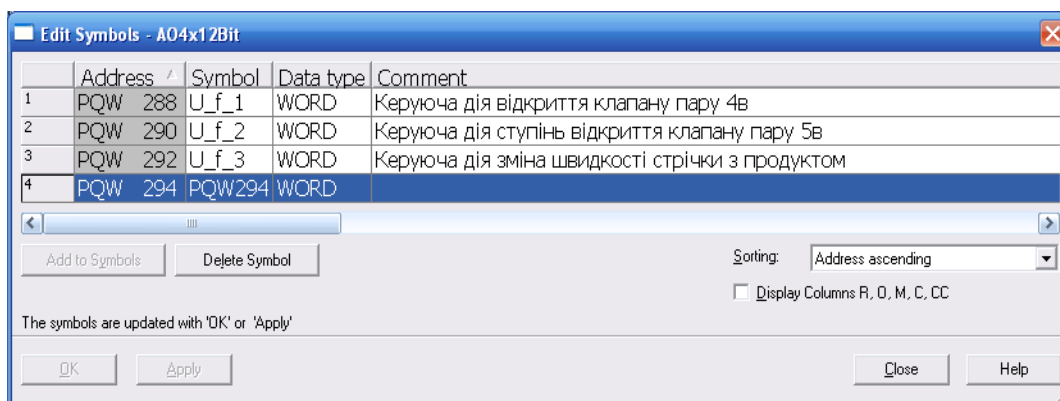


Рис.5.6 . Загальний вигляд вікон завдання символічних імен виходів аналогового модулю

На рис. 5.5, 5.6 представлено редагування імен символічних змінних, які створюються для периферійних входів/виходів. Всі об'єкти програми зі своїми символічними іменами зберігаються у таблиці символів.

Symbol Editor - [S7 Program (Symbols) -- Lent_dryerSIMATIC 300VCPU 313C-2 DP]					
Symbol Table Edit Insert View Options Window Help					
[Icons] [All Symbols] [Icons]					
	Statu	Symbol	Address	Data typ	Comment
4		Q124.7	Q 124.7	BOOL	
4		Q125.0	Q 125.0	BOOL	
4		Q125.1	Q 125.1	BOOL	
4		Q125.2	Q 125.2	BOOL	
5		Q125.3	Q 125.3	BOOL	
5		Q125.4	Q 125.4	BOOL	
5		Q125.5	Q 125.5	BOOL	
5		Q125.6	Q 125.6	BOOL	
5		Q125.7	Q 125.7	BOOL	
5		SAR	FB 5	FB 5	
5		SB_p	I 124.3	BOOL	Сигнал кнопки авт. пуска
5		SB_st	I 124.4	BOOL	Сигнал кнопки авт. останова
5		T_sa1	PIW 256	WORD	Температура агенту сушіння під стрічкою №1
5		T_sa10	PIW 274	WORD	Температура агенту сушіння над стрічкою №5
6		T_sa2	PIW 258	WORD	Температура агенту сушіння над стрічкою №1
6		T_sa3	PIW 260	WORD	Температура агенту сушіння під стрічкою №2
6		T_sa4	PIW 262	WORD	Температура агенту сушіння над стрічкою №2
6		T_sa5	PIW 264	WORD	Температура агенту сушіння під стрічкою №3
6		T_sa6	PIW 266	WORD	Температура агенту сушіння над стрічкою №3
6		T_sa7	PIW 268	WORD	Температура агенту сушіння під стрічкою №4
6		T_sa8	PIW 270	WORD	Температура агенту сушіння над стрічкою №4
6		T_sa9	PIW 272	WORD	Температура агенту сушіння під стрічкою №5
6		TCONT_CP	FB 58	FB 58	temperature PID controller with pulse generator and self-tuning
6		TON	SFB 4	SFB 4	Generate an On Delay
7		U_f_1	PQW 288	WORD	Керуюча дія відкриття клапану пару 4в
7		U_f_2	PQW 290	WORD	Керуюча дія ступінь відкриття клапану пару 5в
7		U_f_3	PQW 292	WORD	Керуюча дія зміна швидкості стрічки з продуктом
7		Valve	FB 1	FB 1	
7		Valve_c	FB 7	FB 7	
7		W_f	PIW 276	WORD	Вологість фруктів на виході сушарки

Рис.5.7. Фрагмент таблиці символів.

Автоматизоване робоче місце оператора реалізується на базі

персонального комп'ютера. Зв'язок комп'ютера з контролером виконується по мережі MPI через спеціальну комунікаційну плату CP 5611. Процедура програмної конфігурації мережі представлена на рисунках нижче.

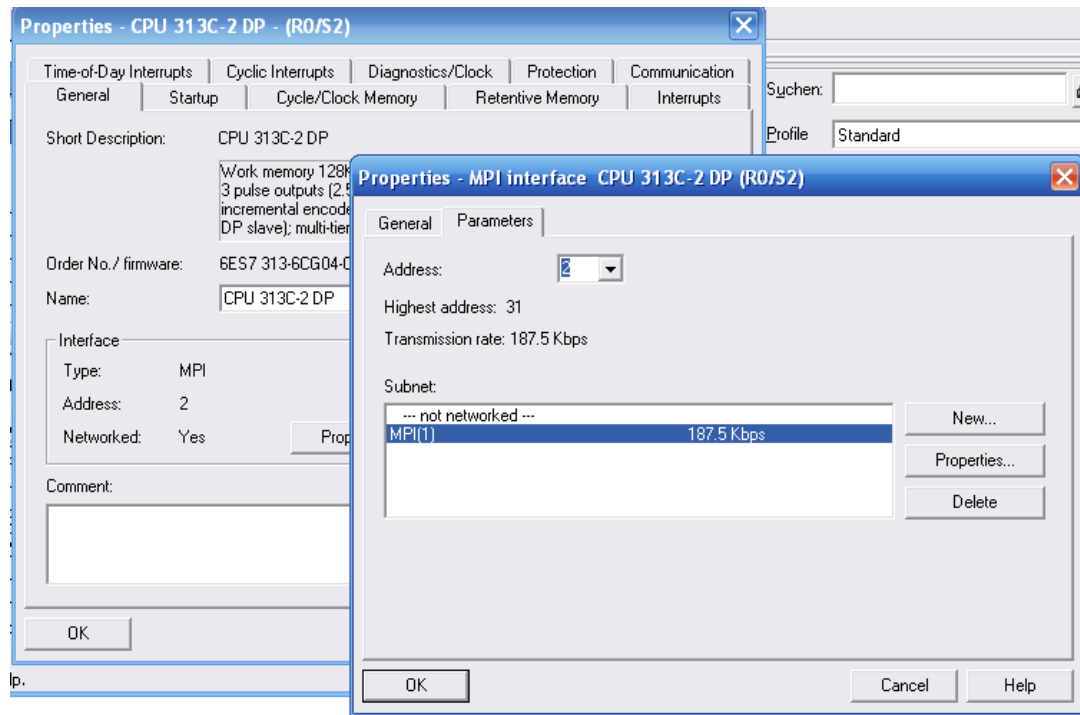


Рис.5.8. Приклад підключення контролера S7-300 до мережі MPI.

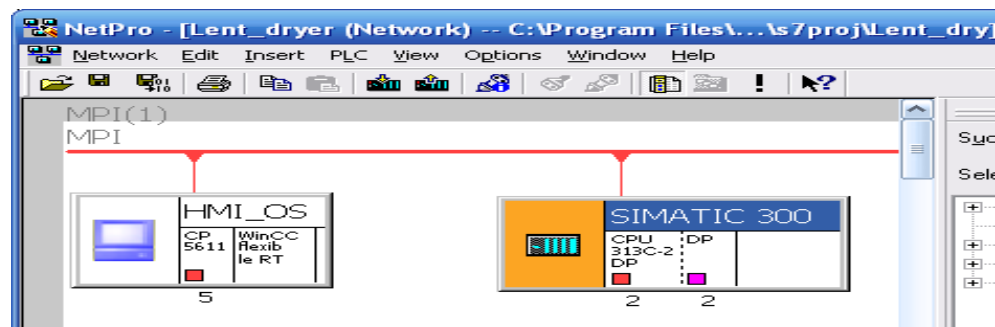


Рис. 5.9 Ілюстрація структури мережі в програмі "Net Pro".

5.4 Розробка програми, що реалізує алгоритми регулювання

5.4.1. Програмна реалізація алгоритмів регулювання та їх тестування на моделі ОК.

Модель САР реалізована у функціональному блоці FB5, розрахунок

якого виконується кожну 0.1 сек. в організаційному блоці OB35. На рис.5.10 представлений фрагмент вікна OB35 з функцією виклику FB5.

```
OB35 : "Cyclic Interrupt"
Comment:
Network 1: Title:
Comment:
CALL "SAR" , "DB_SAR" FB5 / DB5
```

Рис.5.10. Фрагмент вікна OB35.

Модель САР запрограмована з використанням функціональних блоків типових динамічних ланок з бібліотеки " Modular PID Control " (FB9 - LAG1ST і FB4 - DEAD_T) і типових регуляторів FB58 із стандартної бібліотеки " Standard Library " . Входи і виходи регуляторів прив'язані не тільки до моделі ОУ , а й до адрес входів і виходів (через модулі управління клапанами) контролера , що дозволяє перевести їх роботу з моделі ОУ на управління реальним об'єктом. Додатково для регуляторів передбачена функція безударного перемикання режимів РУЧ \ АВТ . На рис. 5.11 представлений список статичних змінних блоку FB5 . На рис. 5.12 представлений фрагмент програми що реалізує модель ОУ . А на рис.5.13 представлений фрагмент програми, що реалізує регулятор.

Керуючі впливи, що формуються регуляторами, надходять на вхід моделі ОУ через модулі управління відповідними регулюючими клапанами. Функціональні блоки управління регулюючими клапанами (бібліотечний блок FB7) розташовані в FB3. Обмін даними між функціональними блоками FB5 і FB3 реалізується через блоки даних DB1 і DB7 . Розрахунок функціонально блоку FB3 виконується в основному організаційному блоці OB1. Фрагмент коду функціонального блоку FB3 з викликом функціональних блоків управління регулюючими клапанами представлений на 5.14

Name	Data Type	Address
chzpl	DEAD_T	0.0
apzv11	LAG1ST	22.0
apzv12	LAG1ST	52.0
PID_T1	TCONT_CP	82.0
PID_T2	TCONT_CP	578.0
PID_Wf	TCONT_CP	1074.0

Рис.5.11. Фрагмент таблиці статичних змінних функціонального блоку FB5.

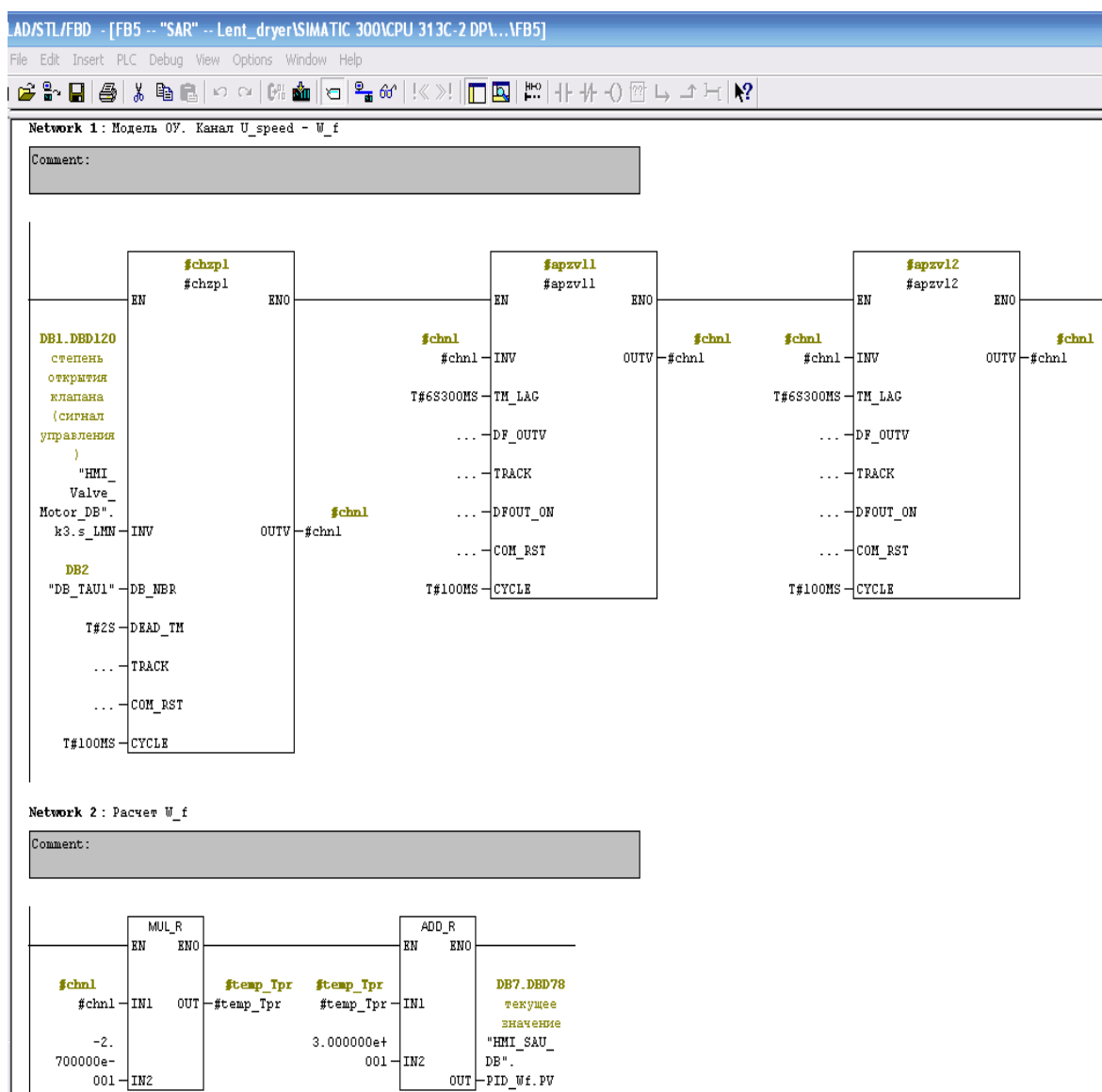


Рис.5.12. Фрагмент програми яка реалізує модель ОУ.

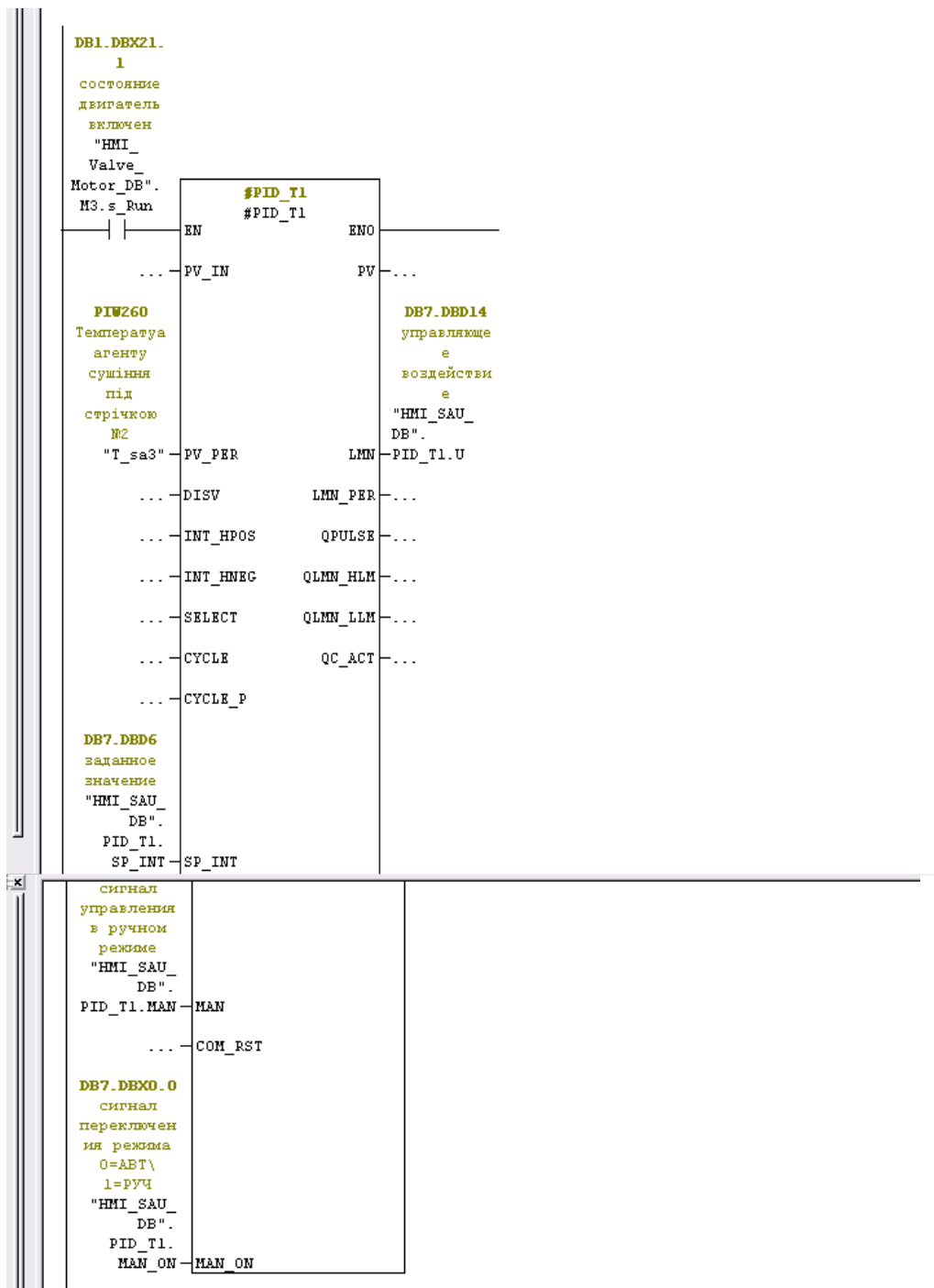


Рис.5.13. Фрагмент програми реалізує регулятор вологості в сушарці.

Результати тестування програми, проведені в режимі емуляції контролера, підтвердили правильність програмної реалізації і працездатність алгоритмів регулювання.

Динаміка зміни вологості на виході з сушарки наведена на рис. 5.15.

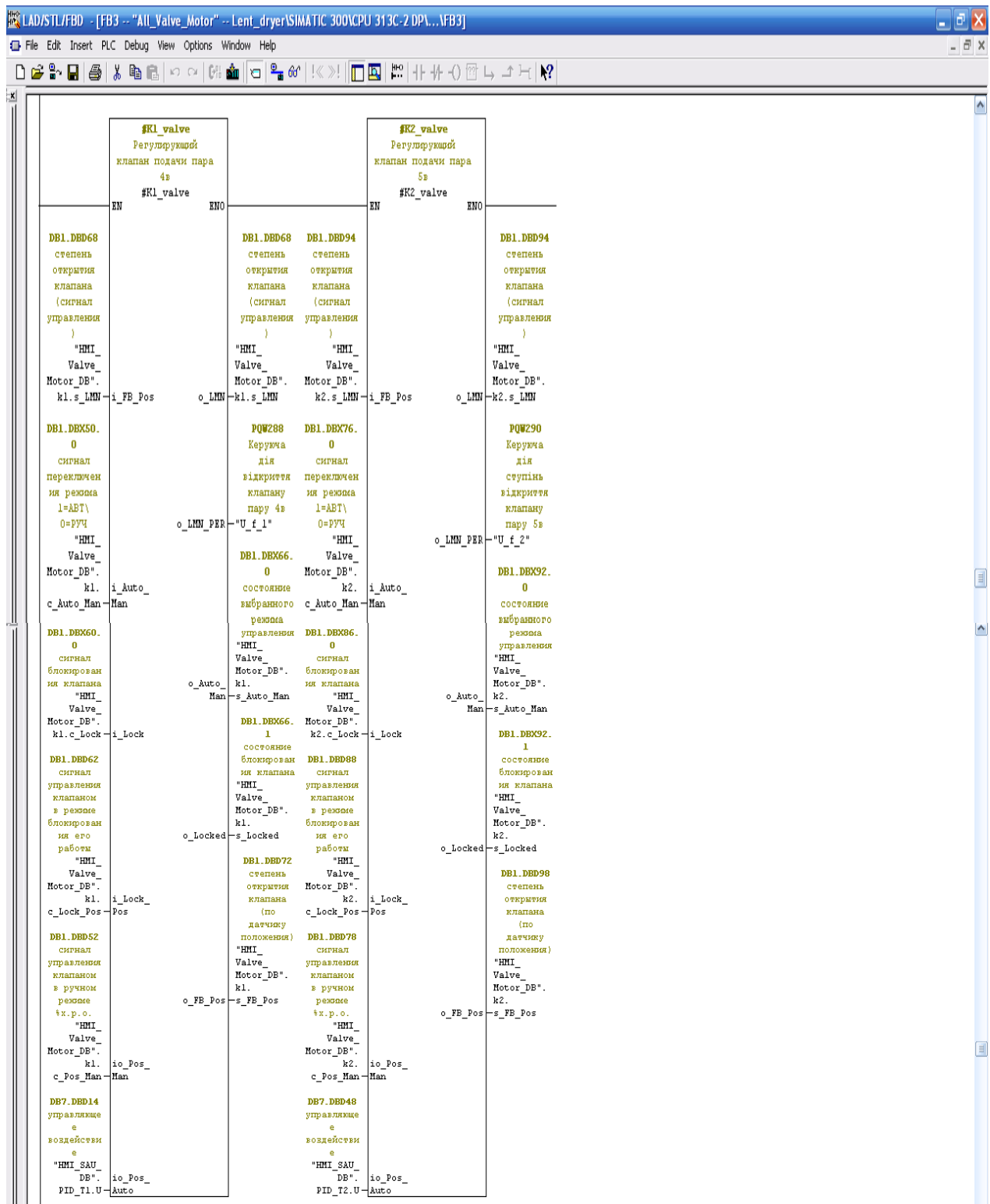


Рис.5.14. Фрагмент програми розрахунку функціонального блоку управління регулюючими клапанами, реалізованого в FB3.

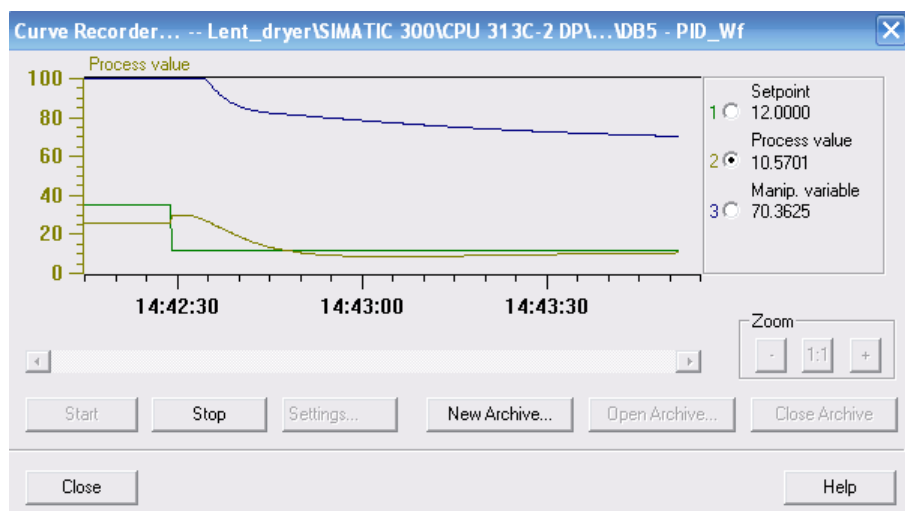


Рис.5.15. Динаміка зміни вологості .

ВИСНОВКИ за розділом

В результаті виконання даного розділу були означені основні характеристики контролерів фірми Siemens сімейства S7-300 та принципи їх програмування.

Отриманий практичний досвід програмного конфігурування контролерів сімейства S7-300 в середовищі Simatic Step 7 дозволив розробити програми логічного управління і регулювання для управління процесом сушіння плодів у багато стрічковій сушарці.

Розроблена технічна структура і програмне забезпечення контролерно-комп'ютерної мережі, проведено тестування її роботоспроможності.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено науково-технічну задачу, яка полягає у синтезі моделей систем управління процесу сушіння овочів та фруктів у стрічковій сушарці. Отримані теоретичні та науково-практичні результати в області підвищення ефективності функціонування стрічкових сушарок.

Основні результати і висновки магістерської роботи полягають в наступному:

1. Проведено аналіз типових систем керування процесами сушіння овочів та фруктів, на підставі яких обґрунтовано задачі розробки моделей більш складних та нетрадиційних систем керування зокрема на основі математичного апарату штучних нейронних мереж;

2. Синтезовані моделі систем управління підвищеної динамічної точності і систем автоматичної оптимізації режимів функціонування установки для сушення продуктів;

3. Розроблені моделі нейромережових систем автоматичного управління процесами сушення продуктів;

4. Проаналізована ефективність та якість регулювання розроблених моделей систем шляхом їх імітаційного моделювання та зроблені висновки щодо принципової придатності нейромережових алгоритмів управління та системи автоматичної оптимізації;

5. Розглянуті основні рішення до впровадження на підприємстві розроблених моделей систем автоматичного управління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tarasenko, T., et al. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ СУШІННЯ ОВОЧІВ ТА ФРУКТІВ. Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies, 2015, 17.4: .с.148-157.
2. Калина, В. С. et al. Огляд методів сушки плодоовочевої сировини. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки, (19, т. 1), 2019, .с. 32-40.
3. Топчєєв Ю.І., Атлас для проектування систем автоматичного регулювання, М.: Машинобудування, 1989. - 752 с
4. Бессекерський В.А., Попов Є.П. Теорія систем автоматичного регулювання [Текст] / М.: Видавництво "Наука", 1972. - 768 с., Стор. 397.
5. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів спеціальностей 7.092501 денної та заочної форми навчання. - Одеса: ОНАХТ, 2002 р.
6. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів спеціальностей 7.092501 денної та заочної форми навчання, 1 частина – Одеса: ОНАХТ, 2006 р.
7. Хобін В.А. Конспект курсу лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів спеціальностей 7.092501 денної та заочної форми навчання, 2 частина – Одеса: ОНАХТ, 2007 р.
8. Копелович А.П. Інженерні методи розрахунку при виборі автоматичних регуляторів [Текст] / М.: Держ.науково-технічне вид-во літератури з чорної та кольорової металургії, 1960 - 190 с.
9. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» – Одеса: ОНАХТ, 2000. – 16 с.

10. Хобін В.А. - Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Теорія автоматичного управління" - Одеса: ОНАХТ, 2000. - 16 с.
11. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту [Текст] / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
12. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
13. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
14. 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.
15. Круглов В.В. Нечітка логіка та штучні нейронні мережі [Текст] / Круглов В.В., Длі М.І., Голунов Р.Ю. - М.: Фізматліт, 2001. - 302 с.
16. Архангельський В.І. і др. Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] – К. : техніка, 1999. – 364с.
17. 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.
18. Сергей А. Терехов Лаборатория Искусственных Нейронных Сетей НТО-2, ВНИИТФ, Снежинск / [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
<https://b-ok.org/book/530233/94a2fe>, <https://www.twirpx.com/file/600450/>,
<https://studfiles.net/preview/986654/>
19. Штучні нейронні мережі [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Штучна_нейронна_мережа
20. Генетичний алгоритм [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Генетичний_алгоритм
21. Нечітка логіка [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Нечітка_логіка

22. Фазифікація [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/Фазифікація>

23. Дефазифікація [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/Дефазифікація>

24. Система нечіткого виведення [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/Система_нечіткого_виведення