

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій

(повне найменування факультету)

Кафедра мікро- та наноелектроніки

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту (роботи)

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему: ”Розробка інтелектуальної вимірювальної системи з використанням апарату нечіткої логіки”

(назва теми)

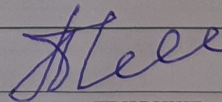
Виконала: студентка IV курсу, групи РТ-419

Спеціальності 152 Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

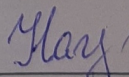
Якість, стандартизація та сертифікація



ЮРЧЕНКО П.Ю.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

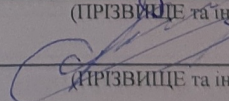
Керівник



НАГОРНА Н.М.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент



МАНУКЯН О.А.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
Кафедра мікро- та наноелектроніки
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) ”Якість, стандартизація та сертифікація”
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Геннадій Сніжної

« 06 » червня 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТКИ

Юрченко Поліни Юріївни

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) ”Розробка інтелектуальної вимірювальної системи з використанням апарату нечіткої логіки”

керівник проєкту (роботи) Нагорна Ніна Миколаївна

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» квітня 2023 року № 103

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 05 червня 2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Вимірювання температури та вологості системою. Шум у каналах типу білого з нормальним розподілом потужності. У системі автоматичного керування необхідно використати PI-регулятор. При дослідженнях та аналізі використати гібридну нечітку нейронну мережу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Розділ 1 Структура і функції інтелектуальних вимірювальних систем.

Розділ 2 Розробка вимірювальної системи з автоматичним контролем та динамічною ідентифікацією параметрів системи керування об'єктом з адаптивним регулюванням температури і вологості.

Розділ 3 Алгоритм і програма апроксимації кінцевої множини вимірюваних даних, спотворених шумом.

Розділ 4 Оптимізація роботи в динамічному режимі адаптивної САК з нейро-нечітким PI-регулятором.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація виконаної роботи (12 слайдів)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

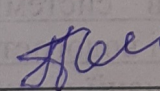
Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	Нагорна Н. М., старш. викл. каф. МІНЕ	 08.05.23	 05.06.23
Нормо-контроль	Коротун А. В., к.ф.-м.н., доцент каф. МІНЕ	 08.05.23	 05.06.23

7. Дата видачі завдання « 08 » травня 2023 року.

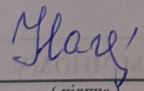
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літературних джерел та ознайомлення зі статтями за заданою тематикою.	08.05.23 – 12.05.23	Виконано
2	Розробка вимірювальної системи з автоматичним контролем та динамічною ідентифікацією параметрів системи керування об'єктом з адаптивним регулюванням температури і вологості.	13.05.23 – 19.05.23	Виконано
3	Розробка системи з автоматичним контролем та динамічною ідентифікацією параметрів системи керування об'єктом з адаптивним регулюванням температури і вологості.	20.05.23 – 26.05.23	Виконано
4	Розробка моделі у системі MATLAB системи з автоматичним контролем та динамічною ідентифікацією параметрів системи керування об'єктом з адаптивним регулюванням температури і вологості.	27.05.23 – 29.05.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки і презентації.	30.05.23 – 04.06.23	Виконано

Студентка

 Поліна ЮРЧЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

 Ніна НАГОРНА
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 79 с., 30 рис., 6 табл., 17 джерел, 5 додатків.

Мета роботи - розібрати класифікацію та структуру вимірювальних систем, вивчити метод підвищення точності вимірювання завдяки інтелектуальним датчикам, оптимізувати роботи в динамічному режимі адаптивної САК з нейро-нечітким PI-регулятором.

Об'єкт дослідження - інтелектуальна вимірювальна система, при розробці якої використовується нечітка логіка.

Методи дослідження – розрахунково-графічний, теоретичний, програмний.

Результати: виконано аналіз перехідних процесів у системі з нейро-нечітким PI-регулятором при входніх впливах типу одиничної функції.

У першому розділі опи структура і функції інтелектуальних вимірювальних систем.

У другому розділі розроблено вимірювальну систему з автоматичним контролем та динамічною ідентифікацією параметрів системи керування об'єктом з адаптивним регулюванням температури і вологості.

У третьому розділі розроблені алгоритм і програма апроксимації кінцевої множини вимірювальних даних, спотворених шумом.

У четвертому розділі описані оптимізація роботи в динамічному режимі адаптивної САК з нейро-нечітким PI-регулятором та виконаний аналіз перехідних процесів при входніх впливах типу одиничної функції.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ДАТЧИКИ, ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА,
НЕЧІТКА ЛОГІКА, PI-РЕГУЛЯТОР

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА ПРОЄКТ	2
РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	7
1 СТРУКТУРА І ФУНКЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ.	9
1.1 Інтелектуальні вимірювальні системи.	9
1.2 Структура інтелектуальної вимірювальної системи.	11
1.3 Вимірювальний інтерфейс.	17
1.4 Функції інтелектуальної вимірювальної системи.	19
1.5 Інтелектуальні датчики.	22
1.6 Використання нечіткої логіки у інтелектуальних вимірювальних системах.	25
2 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З АВТОМАТИЧНИМ КОНТРОЛЕМ ТА ДИНАМІЧНОЮ ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ З АДАПТИВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОЛОГОСТІ	28
2.1 Вибір структури вимірювальної системи.	28
2.2 Вибір датчика температури.	29
2.3 Вибір датчика вологості.	33
3 АЛГОРИТМ І ПРОГРАМА АПРОКСИМАЦІЇ КІНЦЕВОЇ МНОЖИНИ ВИМІРЮВАНИХ ДАНИХ, СПОТВОРЕНИХ ШУМОМ.	39
3.1 Постановка задачі по зменшенню шуму у вимірюваному сигналі. ...	39
3.2 Переваги використання гібридної мережі для підвищення рівня сигналу над рівнем шуму.	40
3.3 Використання функції ANFIS у програмі.	41
3.4 Алгоритм апроксимації кінцевої множини вимірюваних даних, спотворених шумом.	42
3.5 Висновки за результатами аналізу.	43
4 ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ В ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ АДАПТИВНОЇ САК З НЕЙРО-НЕЧІТКИМ РІ-РЕГУЛЯТОРОМ.	47
4.1 Вимірювальна система і система автоматичного керування об'єктом.	47
4.2 Обґрунтування використання адаптивних САК на основі нечіткої корекції налаштувань РІ-регулятора.	48
4.3 Системи нечіткого логічного виводу.	48
4.3.1 Нечіткий логічний вивід.	49
4.3.2 Нечіткі бази знань.	50
4.3.3 Алгоритм нечіткого виводу Мамдані.	51
4.4 Нечітка корекція налаштувань параметрів РІ-регулятора.	53
4.5 Розробка програми налаштування параметрів регулятора	

адаптивної САК на базі апарату нечіткої логіки.	54
4.5.1 Постановка задачі.	54
4.5.2 Нечітка корекція налаштувань РІ-регулятора.	54
4.6 Розробка моделі нечіткої адаптивної системи автоматичного керування.	56
ВИСНОВКИ.	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.	61
Додаток А Програма апроксимації кінцевої множини вимірюваних даних, спотворених шумом.	63
Додаток Б Результати аналізу за програмою апроксимації кінцевої множини вимірюваних даних, спотворених шумом.	65
Додаток В Модель системи автоматичного керування та результати аналізу перехідного процесу.	71
Додаток Г Функції приналежності параметрів K_{ob} , T_{ob} у графічному вигляді.	72
Додаток Д Функції приналежності параметрів K_p , T_p у графічному вигляді.	73
Додаток Е Програма розрахунку оптимальних параметрів РІ-регулятора на основі апарату нечіткої логіки.	75

ВСТУП

Однією з найбільш важливих проблем, що виникають при створенні та експлуатації технічних систем, є забезпечення необхідної якості та надійності управління в умовах збурюючих факторів. До них відносяться зміни параметрів регульованого процесу та середовища функціонування системи. Тому для управління складними об'єктами використовуються методи та технології штучного інтелекту як засоби боротьби з невизначеністю зовнішнього середовища.

Бурхливий розвиток інтегральної схемотехніки призвів до створення принципово нових вимірювальних перетворювачів - інтелектуальних датчиків, що містять в одному корпусі перетворювач та мікропроцесор. Це дозволяє виконувати основні операції з перетворення та підвищення достовірності вимірювальної інформації у місці її виникнення.

Використання інтелектуальних датчиків дає можливість по-новому підійти до розподілу функцій між основними елементами систем контролю та управління, зокрема, звільнити центральний процесор від необхідності обробки великих обсягів первинної інформації.

Інтелектуальний датчик дозволяє забезпечити виконання функцій, що підвищують інформативність вихідного сигналу. Наприклад, функцію формування потоку даних з необхідною достовірністю на основі аналізу досить великої кількості окремих результатів щодо недостовірних значень результатів вимірювань.

Інтелектуальний датчик являє собою сукупність апаратних та програмних засобів, що забезпечують відображення властивостей об'єкта контролю або управління у вигляді деякої структури даних, що формуються в результаті обробки вихідного сигналу вимірювального перетворювача за певним алгоритмом.

Можна дати таке визначення інтелектуального датчика: це датчик, що має здатність автоматичної адаптації до джерела сигналу та навколишнього середовища, а також здатність контролювати свої функції, коригувати помилки вимірювань.

Інтелектуальний датчик є електронним пристроєм, заснованим на об'єднанні чутливих елементів, схем перетворення сигналів і засобів мікропроцесорної техніки. Використання мікропроцесорів та однокристальних мікроелектронних обчислювальних машин безпосередньо у складі датчиків забезпечує можливість покращення його метрологічних та експлуатаційних характеристик.

Принцип інтелектуального підходу до створення виконавчих механізмів нового покоління полягає у перенесенні функціонального навантаження від механічних вузлів до інтелектуальних компонентів, які легко перепрограмуються під нові завдання.

Для реалізації інтелектуальних вимірювальних механізмів використовуються чотири основні функціональні блоки:

- інформаційно - електричний функціональний перетворювач, що включає контролер управління рухом і силовий електричний перетворювач;
- електромеханічний функціональний перетворювач, що включає електродвигун і механічний передавальний пристрій;
- електро - інформаційний функціональний перетворювач, що стоїть у лінії зворотного зв'язку вимірювального механізму і включає датчики напруги і струму силового перетворювача;
- механіко - інформаційний функціональний перетворювач, що стоїть у лінії зворотного зв'язку вимірювального механізму і включає датчики переміщення, частоти обертання, моменту, сили.

При використанні нових технологій та методів обробки сигналів на добре відомих принципах вимірювань створюються датчики зі значно кращими властивостями.

1 СТРУКТУРА І ФУНКЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

1.1 Інтелектуальні вимірювальні системи

Відповідно до ДСТУ 2481-94 «Системи оброблення інформації. Інтелектуальні інформаційні технології. Терміни та визначення» [1], інтелектуальна система – це система, яка забезпечує розв’язування неформалізованих задач користувача в деякій предметній галузі та організовує його взаємодію з комп’ютером у звичних поняттях, термінах, образах.

Інтелектуальні вимірювальні системи здатні виконувати всі функції вимірювання та контролю у реальному масштабі часу. Це дозволяє системі здійснювати функції вимірювання та контролю високого рівня без залучення великих та дорогих електронних обчислювальних машин (ЕОМ). При автономному функціонуванні така система забезпечує безперервні вимірювання та контроль заданих параметрів, збирання даних та обробку сигналів. Модульна конструкція дозволяє здійснювати поступове розширення існуючої системи шляхом введення додаткових модулів і зрештою перетворювати її на систему засобів супервізорного або цифрового управління вимірювальним експериментом шляхом включення до неї міні-ЕОМ.

Інтелектуальні вимірювальні системи можуть індивідуально програмуватися на виконання специфічних завдань з використанням програмованого терміналу (програматор) для введення параметрів конфігурування. Системи зазвичай мають засоби представлення інформації: дисплеї візуалізації мнемонічних символів команд, цифрові індикатори, які дають оператору всю необхідну інформацію, і навіть клавіші перемикання видів роботи. Резервний блок живлення забезпечує збереження програми при відключенні живлення на тривалий час.

Інтелектуальні вимірювальні системи мають значні переваги перед традиційними інформаційними вимірювальними системами. До цих переваг відносяться [2]:

- універсальність, оскільки стандартні інтерфейси забезпечують просте підключення до будь-яких систем та обладнання;
- висока надійність на кожному системному рівні, яка за умови застосування чітко визначених та універсальних методів забезпечує безвідмовну роботу;
- висока швидкодія контурів управління процесами вимірювання та контролю будь-якого виробництва, а також висока швидкість збору даних;
- взаємозамінність. Інтелектуальні системи випускаються у вигляді стандартних пристроїв, індивідуально програмованих для їх специфічних функцій. Кожен з таких пристроїв може бути замінено іншим того ж функціонального призначення, тому кожна система може розглядатися як резервна для будь-якого типу систем того ж класу, що знижує кількість додаткових резервних засобів вимірювання, контролю та регулювання та зводить до мінімуму аварійний період у малоімовірному випадку виходу з ладу будь-якого елемента.

Інтелектуальні вимірювальні системи інтегрують у собі найкращі сторони використовуваних раніше систем, тому що більш насичені мікропроцесорною і обчислювальною технікою.

Застосування інтелектуальних вимірювальних систем дозволяє створити алгоритми вимірювань, які враховують робочу, допоміжну і проміжну інформацію про властивості об'єкта вимірювань, умови вимірювань, специфічні вимоги до системи та обмеження, що накладаються. Маючи здатність до перепрограмування та переналаштування відповідно до умов функціонування, що змінюються, інтелектуальні алгоритми дозволяють підвищити швидкодію та метрологічний рівень вимірювань [2].

Прикладом інтелектуальної вимірювальної системи може бути універсальний набір приладів Sonel MIC-10k1UA (рис. 1.1). Комплекс Sonel

MIC-10k1UA може автоматично розраховувати коефіцієнт абсорбції (зволоженості), поляризації (старіння) та коефіцієнт розряду діелектрика [3].



Рисунок 1.1 – Інтелектуальна вимірювальна система Sonel MIC-10k1UA

1.2 Структура інтелектуальної вимірювальної системи

Орієнтовна структурна схема вимірювальної системи показана на рисунку 1.2 [4].

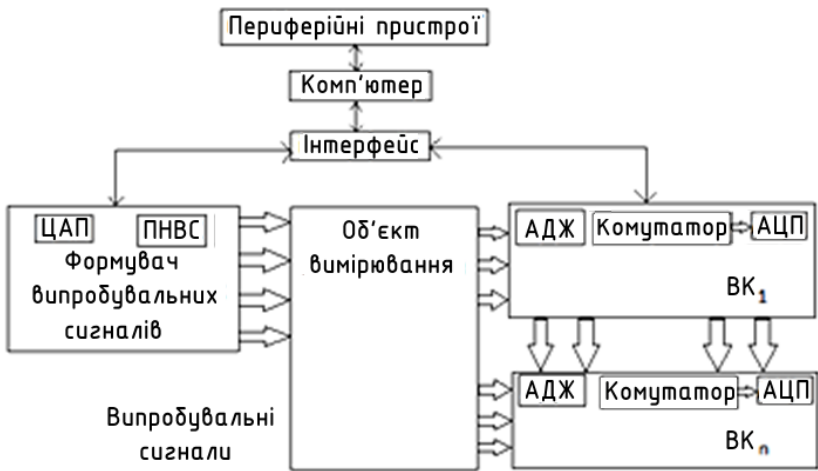


Рисунок 1.2 – Структурна схема вимірювальної системи

Основними частинами вимірювальної системи є:

- комп'ютер з периферійними пристроями;
- програмне забезпечення, що представляє собою сукупність взаємопов'язаних програм, написаних на алгоритмічних мовах різного рівня;
- інтерфейс;
- формувач випробувальних сигналів, що впливає на об'єкт вимірювання з метою отримання вимірювальних сигналів, які виробляють послідовно з'єднані цифроаналоговий перетворювач (ЦАП) і перетворювач «напруга - випробувальний сигнал» (ПНВС);
- вимірювальні канали системи, які призначені для вимірювання і перетворення сигналу в цифрову форму. Структура вимірювального каналу істотно залежить від розв'язуваної задачі. При обробці декількох вимірювальних сигналів одним аналогово-цифровим перетворювачем до складу каналу включають комутатор, призначений для почергового підключення сигналів до входу аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Компонентом каналу є також аналогове джерело живлення (АДЖ).

Вимірювальні системи класифікують за різними ознаками. Залежно від числа вимірювальних каналів вимірювальні системи можуть бути одно-, дво-, три- і багатоканальні. Вимірювальну систему, забезпечену засобами автоматичного отримання і обробки вимірювальної інформації, називають автоматичною системою. За функціональним призначенням інформаційні вимірювальні системи ділять на вимірювальні системи, системи автоматичного контролю, системи технічної діагностики, системи розпізнавання образів, телевимірювальні, вимірювально-обчислювальні комплекси.

Вимірювальна інформаційна система призначена для представлення вимірювальної інформації у вигляді, зручному споживачеві.

За організації алгоритмів функціонування вимірювальні системи ділять на системи з жорстким, заздалегідь заданим алгоритмом функціонування, програмовані і адаптивні.

У жорстких системах алгоритм функціонування вимірювальної системи не змінюється, і будь-яка зміна реалізованої функції вимірювальної системи вимагає зміни її структури. Такі вимірювальні системи мають вузьку спеціалізацію. До вимірювальної системи з жорстким алгоритмом функціонування можна віднести радіолокатор кругового огляду або метеосупутник, траєкторія руху якого обумовлена законами механіки. У програмованих системах алгоритм їх роботи змінюється відповідно до заздалегідь заданої програми, яка складається в залежності від умов функціонування об'єкта дослідження. В адаптивних системах алгоритм роботи змінюється, пристосовуючись до змін вимірюваної величини і умов роботи об'єкта. При побудові адаптивних систем потрібна менша апріорна інформація щодо об'єкта дослідження, яка має велике значення при дослідженні маловивчених процесів і явищ.

Залежно від способу організації передачі інформації між функціональними вузлами системи, розрізняють ланцюжкову, радіальну і магістральну структури вимірювальної системи.

Для вимірювальної системи характерна багаторівнева структура, до переваг якої відносяться:

- уніфікація мікропроцесорів і зв'язків між ними, що дозволяє скоротити час розробки системи і легко перебудовувати її під конкретні завдання;
- наявність розгалуженої мережі підсистем нижнього рівня, що підвищує надійність системи в цілому і дає можливість обробляти дані в режимі реального часу;
- поділ функцій між підсистемами верхнього і нижнього рівнів, що дозволяє знизити вимоги до швидкодії окремих підсистем;
- значне спрощення та уніфікація програмного забезпечення, що дає можливість замінювати або модернізувати окремі підсистеми нижнього рівня, не порушуючи системи в цілому.

За принципом дії розрізняють вимірювальні системи скануючі, багатоточкові, мультипліковані і паралельної дії.

Скануючі вимірювальні системи (рис. 1.3) використовують для дослідження однорідних інформаційних полів: температурних, радіаційних тощо, при цьому датчик системи переміщується у просторі. Такі системи дають можливість визначати значення параметрів в будь-якій точці, лінії рівня, значення, розташування і форму екстремумів тощо.

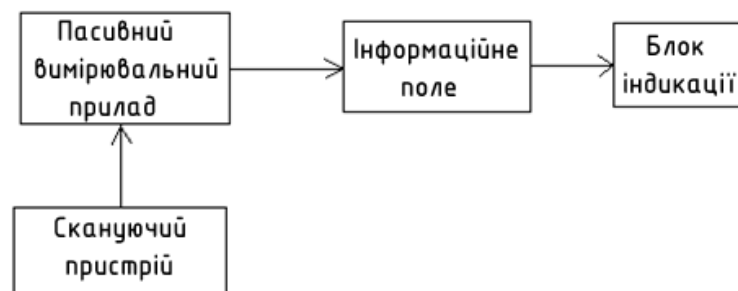


Рисунок 1.3 – Схема скануючої вимірювальної системи

Основним елементом таких систем є скануючий датчик, який може бути контактним або безконтактним.

Залежно від траєкторії руху датчика, скануючі системи бувають з жорстко запрограмованою траєкторією його руху або адаптивні, коли траєкторія сканування може змінитися в залежності від одержуваної інформації.

Скануючі вимірювальні системи можуть використовувати активний датчик або пасивний. Прикладом першої системи служать комп'ютерні томографи, тобто пристрої для дослідження внутрішньої структури об'єкта шляхом отримання за допомогою обчислювальних методів його пошарових зображен і вимірювання фізичних характеристик речовини в будь-якій локальній області за результатами просвічування різними видами проникаючого випромінювання. Прикладом системи, що використовує

пасивний датчик, служить система визначення солоності води, що включає в себе кондуктометр і терморезистор для визначення температури води.

У багатоточкових (мультиплексорних) вимірювальних системах пасивні вимірювальні прилади розміщені відразу у всіх точках інформаційного поля. Підключення датчиків до каналу здійснюється за допомогою системних комутаторів - мультиплексорів. Залежно від кількості фізичних величин, що підлягають вимірюванню, багатоточкові вимірювальні системи мають одно-, дво- і багатоступеневу системи комутаторів. Одноступеневу систему використовують при числі датчиків менше 500, а триступеневу - більше 5000.

Для опитування великої кількості датчиків використовують кілька варіантів. Циклічне опитування, коли датчики опитують послідовно один за одним, застосовують для повільно мінливих параметрів на невеликих об'єктах. Адресне опитування використовують, коли поряд з повільно змінюючими величинами мають місце швидко протікаючі процеси. Ініційоване опитування застосовують в залежності від ваги (значущості) вимірюваного параметра, але за запитом датчика здійснюють його вимір.

Перевагами системи є менша кількість обладнання в порівнянні з вимірювальною системою паралельної дії, можливість нарощування числа вимірюваних параметрів. До недоліків відносяться знижені точність і швидкодія через використання мультиплексорів.

Мультипліковані вимірювальні системи (система з рівновагою, що розгортається або із загальною мірою) застосовують в тому випадку, коли число вимірюваних однотипних параметрів доходить до декількох десятків. Фактично вони являють собою сукупність одноканальних вимірювальних систем, об'єднаних спільною зразковою мірою, пристроями порівняння, одним блоком управління і блоком індикації (рис. 1.4). Ці системи мають менше число елементів, але порівняно з вимірювальною системою паралельної дії, забезпечують практично ту ж швидкодію. Недоліком є ускладнення елементів порівняння.

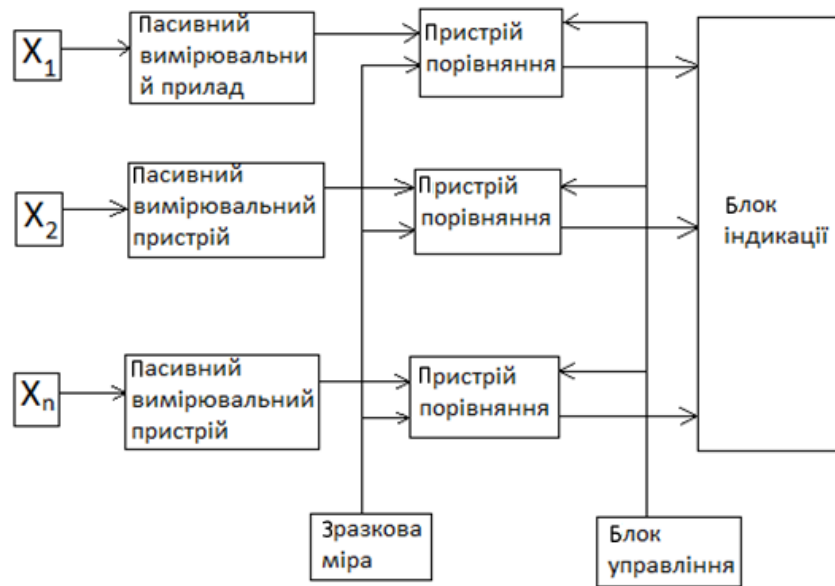


Рисунок 1.4 – Схема мультиплексованої вимірювальної системи

Вимірювальна система паралельної дії є багатоканальною вимірювальною системою з використанням мікропроцесора (рис. 1.5). Це один з найбільш поширених видів систем, який має високу швидкодію, надійність, незалежне управління кожним каналом вимірювання, відсутність комутаторів, можливість обслуговування одного або декількох каналів без переривання роботи всієї системи. Недоліками системи є її підвищені складність і вартість.

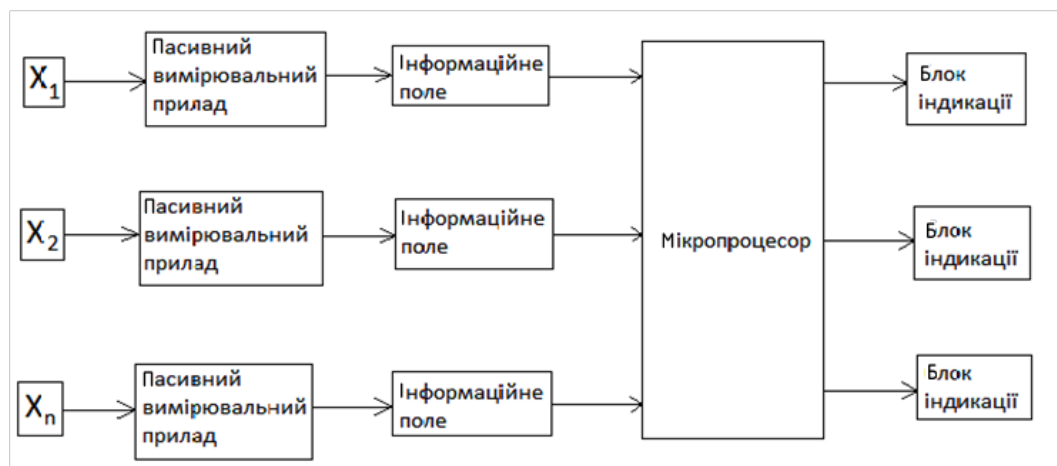


Рисунок 1.5 – Вимірювальна система паралельної дії

1.3 Вимірювальний інтерфейс

Взаємодія модулів в інтелектуальній вимірювальній системі складає основу інтерфейсу [5].

Інтерфейс (від англ. interface – сполучати, узгоджувати) – це пристрій сполучення.

Стосовно інтелектуальної вимірювальної системи під інтерфейсом зазвичай розуміється сукупність механічних, електричних та програмних засобів, що дозволяють об'єднати в єдину систему об'єкт контролю, засоби вимірювань та електронні обчислювальні машини.

Інтерфейси, що використовуються у вимірювальній техніці, прийнято називати вимірювальними інтерфейсами.

Відповідно до видів агрегованих систем розрізняють системно-приладні та системно-модульні інтерфейси.

Стосовно електронної обчислювальної машини існує поняття машинних інтерфейсів, що дозволяють з'єднати центральний процесор ЕОМ з іншими її функціональними блоками і периферійними пристроями.

По відношенню до інтерфейсу кожен модуль інтелектуальної вимірювальної системи може бути контролером, приладом-джерелом або приладом-приймачем інформації.

Контролер здійснює управління обміном, він координує і контролює дії окремих пристроїв, тобто це керуючий модуль.

Передавач (джерело) передає інформацію до інших приладів, а приймач сприймає інформацію з інших модулів. Кожен із модулів інтелектуальної вимірювальної системи може виконувати одну або кілька із зазначених функцій.

Принципово важливим завданням, яке вирішується під час створення інтелектуальної вимірювальної системи, є забезпечення сумісності модулів. Сумісність модулів - це їхня пристосованість до узгодженої спільної роботи в

передбачених поєднаннях. Розрізняють такі види сумісностей: інформаційну, електричну, енергетичну, конструктивну, метрологічну, експлуатаційну. Розглянемо їх докладніше.

Інформаційна сумісність забезпечується уніфікацією та нормуванням видів і параметрів сигналів на входах і виходах модулів, що сполучаються, а також нормуванням алгоритмів обміну даними між ними. Інформаційні взаємозв'язки забезпечуються сигналами кількох різновидів: керуючими, інформаційними, адресними.

Електрична сумісність поширюється на статичні та динамічні параметри електричних сигналів, а також середовище їх поширення та технічну реалізацію приймально-передавальних елементів. Для забезпечення електричної сумісності встановлюють: рівні сигналів та межі їх зміни; значення допустимої ємності та резистивного навантаження пристроїв; допустимі довжини ліній та порядок їх підключення до роз'ємів; засоби та способи забезпечення завадостійкості.

Енергетична сумісність визначає вимоги до виду і параметрів напруги живлення, наприклад, 220 ± 22 В, $115 \pm 11,5$ В, $50 \pm 0,5$ Гц, 400 ± 4 Гц, 27 ± 3 В. Енергетична сумісність є найбільш важливою для вимірювальних систем функціонально-модульної побудови.

Конструктивна сумісність передбачає узгодженість конструктивних параметрів модулів при їхньому спільному використанні або уніфікацію модулів та їх компонування в єдиний конструктивно закінчений комплекс. Уніфікації підлягають габаритні та приєднувальні розміри плат, модулів, шаф, кронштейнів, напрямних каркасів, роз'ємів.

Метрологічна сумісність передбачає однотипність метрологічних характеристик всіх систем вимірів, що використовуються у вимірювальній системі та сумісність результатів вимірювань.

Експлуатаційна сумісність передбачає для всіх елементів системи єдині вимоги щодо надійності, рівня електромагнітних перешкод тощо.

Таблиця 1.1 – Види інтерфейсів

Ознака	Види інтерфейсів
За способом з'єднання функціональних блоків інтелектуальної вимірювальної системи.	Магістральні, радіальні, ланцюжкові, змішані.
За способом передачі інформації в інтелектуальній вимірювальній системі.	Паралельні, послідовні, паралельно-послідовні.
За принципом обміну інформацією.	Синхронні, асинхронні.
За режимом передачі інформації.	Двосторонньо-одночасні, двосторонньо-почергові, одночасні.
За функціональним призначенням.	Системні, мультипроцесорних систем, периферійного обладнання, мереж передачі даних, модулів та приладів, локальних вимірювальних мереж, розподілених систем, локальних мереж, мікроконтролерів.
За конструктивним виконанням.	Міжблочні, внутрішньооблочні, внутрішньоплатні, внутрішньокорпусні.

Поряд із поняттям "інтерфейс" часто використовують поняття "протокол".

Протокол - це задана процедура чи сукупність правил, яка визначає спосіб виконання певного класу функцій відповідними пристроями.

Майже будь-який інтерфейс містить деякі елементи протоколу. У цьому сенсі поняття "інтерфейс" ширше за поняття "протокол".

1.4 Функції інтелектуальної вимірювальної системи

Контролерні функції. Їх можна поділити на ряд підфункцій [6]:

- управління вимірювальним ланцюгом, тобто перемикання каналів та діапазонів підключення зразкових мір;
- керування вимірювальними підсилювачами. Зазвичай ці функції виконуються суто програмними методами, іноді за участю таймера - за допомогою мікропроцесора і портів вводу-виводу;
- керування аналого-цифровим перетворенням;
- керування засобами спілкування з оператором. Сюди входять керування клавіатурою, індикаторами, звуковою сигналізацією та дисплеєм;
- управління реєстраторами, тобто друкуючими пристроями, самописцями, графопобудовниками, накопичувачами на магнітних носіях;
- керування зовнішньою пам'яттю, тобто швидкодіючі накопичувачі на магнітній стрічці в режимі двостороннього обміну на дисках та додаткові зовнішні модулі пам'яті.

Обчислювальні функції. До них відносяться первинна, вторинна та остаточна обробка даних.

Сюди відносяться: калібрування, нормалізація, масштабування, фільтрація, стиснення даних, розпізнавання, усунення помилок, статистична обробка, кореляційний, спектральний, амплітудно-часовий аналіз та ін.

Тестові функції. До цих функцій відносяться виявлення та локалізація несправності, у більшості випадків до типового елемента.

Відомі три класи тестування: перший - із застосуванням зовнішніх мікропроцесорних засобів; другий - повністю автономне тестування; третій – комбіноване.

Для першого класу використовуються спеціальні тестери та мікроелектронна обчислювальна машина. Програми тестування входять до програмного забезпечення тестера або самої системи.

Для другого класу функції тестування найчастіше виконує основний процесор інтелектуальної вимірювальної системи, проте можлива наявність спеціального мікропроцесорного вузла, призначеного лише для автоматичної діагностики. У цьому класі тестування проводиться у двох основних

режимах: визначення працездатності та діагностика несправності. При цьому зберігання програми тестування може бути здійснено або у зовнішньому пристрої пам'яті, якщо воно є в системі, або частіше в тестовому постійному запам'ятовуючому пристрої (ПЗП).

Сервісні функції. Вони розширюють можливості вимірювальних приладів та систем з мікропроцесорами або мікроелектронними обчислювальними машинами, що збільшують обсяг інформації, кількість режимів вимірювань та обробки, кількість параметрів та їх комбінацій, кількість додаткових директив, обсяг візуальної та звукової інформації, кількість альтернативних варіантів вимірювань та обробки.

При цьому можна виділити ряд етапів вимірювання та аналізу із застосуванням діалогу: введення завдання, збирання та попередня обробка первинної інформації, вторинна обробка та інтерпретація результатів, виведення результатів дослідження для інтерпретації документації, архівації та управління.

Розподілена обробка даних. Вона дозволяє розподіляти обчислювальні функції між програмованими контролерами. Можливість розподілу обробки даних забезпечує високу надійність керування вимірювальною інформаційною системою.

Це дозволяє системі здійснювати функції вимірювання та контролю «високого рівня» без використання великих та дорогих комп'ютерів. При автономному функціонуванні така система забезпечує безперервні вимірювання та контроль заданих параметрів, збирання даних та обробку сигналів. Модульна конструкція дозволяє здійснювати поступове розширення існуючої системи шляхом введення додаткових модулів і, нарешті, перетворення її на систему засобів супервізорного або цифрового управління вимірювальним експериментом шляхом включення до неї мінікомп'ютера.

1.5 Інтелектуальні датчики

Датчик - конструктивно відокремлений первинний вимірювальний перетворювач, від якого надходять сигнали вимірювальної інформації (він "дає" інформацію). Потрібно врахувати, що первинний перетворювач може перебувати у вимірювальному ланцюзі будь-якого засобу вимірювань і не обов'язково має бути датчиком, тобто конструктивно відокремленим.

Отже, датчик - це вимірювальний перетворювач, що сприймає вхідну величину і еквівалентний, що формує їй в інформаційному сенсі вимірювальний сигнал. Датчик - відокремлена, часто винесена до об'єкта дослідження конструкція, віддалена від решти вимірювальної апаратури. Датчик – компактний, конструктивно оформлений окремо елемент.

За кількістю виконуваних датчиком функцій можна розділити на однофункціональні і багатофункціональні ($m = 2, 3...$).

Багатофункціональні датчики можуть, окрім основної функції (сприйняття величини та формування вимірювального сигналу), виконувати ряд додаткових функцій, таких як, наприклад, функції фільтрації, обробки аналогових сигналів тощо для сприйняття та перетворення кількох вхідних величин. Однак термін «багатофункціональний датчик» доцільніше віднести до датчиків, кожен з яких виконує кілька вимірювальних функцій. Датчики багатофункціональні, як і багатовимірні, за своїми властивостями наближаються до вимірювальних систем.

Багатофункціональні датчики інколи називають інтелектуальними. До таких датчиків, мабуть, можна віднести аналогові та цифрові датчики з підсумовуванням сигналів, з режимами роботи, що перебудовуються, і параметрами, з функціональним аналого-цифровим перетворенням, метрологічним обслуговуванням тощо. Широкими функціональними можливостями повинні володіти датчики з вбудованими мікропроцесорами. У первинних вимірювальних перетворювачах засобів вимірювань, у яких

склад і компонування не обмежені, мікропроцесори з успіхом використовуються вже зараз.

Датчики багато в чому визначають якість засобу вимірів. Без знань метрологічних характеристик датчик може бути використаний як вимірювальний перетворювач.

До основних нормованих метрологічних характеристик слід віднести:

- похибку сприйняття та перетворення (бажано знати випадкову, систематичну, статичну, динамічну складові та закон розподілу ймовірностей);
- характеристику (функцію) перетворення датчика, що представляє зв'язок вхідних величин з вихідною величиною: $y = f(x)$ та її лінійність;
- діапазон сприйняття та перетворення вхідної величини;
- чутливість;
- частотні та динамічні характеристики (перехідна, амплітудно-фазова, амплітудно-частотна характеристики; час реакції; постійна часу тощо).

До основних систематичних похибок датчика слід віднести такі похибки:

1) похибки значення міри. Наприклад, забруднення суміші води з льодом щодо «нульової» температури термopари;

2) похибки щодо характеристик датчика. Наприклад, щодо функції перетворення тензодатчиків встановлюють похибку одного датчика з виготовленої партії. Якийсь конкретний датчик може мати відмінну від випробуваного датчика характеристику;

3) методичні похибки. До них відносяться, наприклад, спотворення температури об'єкта вимірювання за рахунок теплопровідності датчика температури, "саморозігрів" термометра опору "вимірювальним" струмом тощо.

У деяких випадках бажано знати розмір складової похибки від впливу кожної зовнішньої впливної величини. Це знання може бути використане для вжиття спеціальних заходів для зменшення похибок.

Основні причини виникнення випадкових похибок у датчиках.

По-перше, похибки, пов'язані із змінами власних параметрів датчика. Прикладом може бути варіація порога чутливості у потенціометричного датчика. Поріг чутливості датчика визначається як максимальна зміна вимірюваної величини, яка не викликає зміни вихідного сигналу датчика, що виявляється. Якщо датчик має елемент з гістерезисними властивостями, то вихідний сигнал залежить від попередніх умов експлуатації.

По-друге, похибки через появу у вимірювальному ланцюгу датчиків паразитних сигналів випадкового характеру (теплові шуми, наведення від зовнішніх електромагнітних полів, часовий дрейф сигналів та параметрів елементів датчика тощо).

Характеристика перетворення датчика повинна визначатися для кількох значень вхідної величини, найчастіше для трьох: $x = 0$; $x = 0,5$; $x = 1$. Більш детальне уявлення показників буває необхідно при нелінійному її характері.

Інтелектуальні датчики можуть коригувати похибки, які виникають при зміні впливів зовнішнього середовища, за рахунок наявності в них функцій метрологічного самоконтролю. Структурна схема інтелектуального датчика, який використовується у вимірювальних системах, представлена на рис. 1.6:

Використання інтелектуальних датчиків у вимірювальних системах дозволяє передати частину функцій управління функціям контролю. Тому сприяє наявність блоку обчислювального пристрою у структурі інтелектуального датчика.

У якості обчислювальних пристроїв найчастіше використовуються мікропроцесори або мікроконтролери. За рахунок цього інтелектуальні датчики можуть обробляти виміряну інформацію та обмінюватися нею з сервером вимірювальної системи через цифровий інтерфейс.

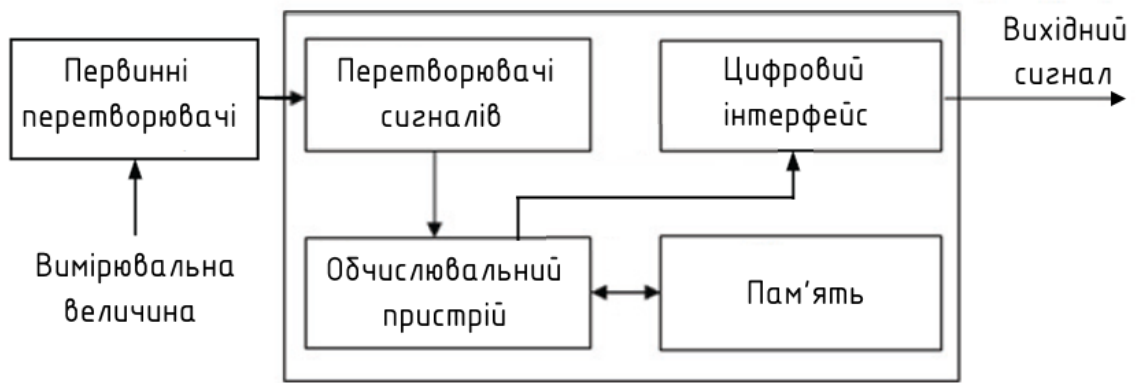


Рисунок 1.6 - Структурна схема інтелектуального датчика

За рахунок того, що інтелектуальні датчики можуть формувати набори статистичних параметрів, контролювати і коригувати свої градувальні характеристики, проводити адаптивну корекцію своїх параметрів, їхні метрологічні властивості стають набагато кращими за властивості датчиків у традиційному виконанні.

Крім того, вихідні сигнали інтелектуальних датчиків формуються з врахуванням наявності завад у каналі зв'язку, тобто мають властивість захищеності від завад.

1.6 Використання нечіткої логіки у інтелектуальних вимірювальних системах

Логіка в звичайному сенсі слова є уявленням механізму мислення, повинна бути завжди строго формалізованою. Термін «нечітка логіка» зазвичай використовується у двох різних значеннях. У вузькому значенні нечітка логіка - це логічне обчислення, що є розширенням багатозначної логіки. У широкому сенсі, який сьогодні є переважним у використанні, нечітка логіка рівнозначна теорії нечітких множин. Нечітка логіка є основою

для реалізації методів нечіткого управління. Вона природніше охоплює характер людського мислення, який часто описує багато процесів неточно чи приблизно [7].

Нечітка логіка є узагальненням класичної логіки на випадок, коли істинність розглядається як лінгвістична змінна, що приймає значення типу: "дуже істинно", "більш-менш істинно", "не дуже хибно" тощо. Зазначені лінгвістичні значення представляються нечіткими множинами. Основна відмінність від класичної логіки полягає в тому, що замість значень "істина" і "хибність" в нечіткій логіці використовується ступінь істинності, що приймає значення з нескінченної множини від 0 (хибність) до 1 (істина) включно. Отже логічні операції вже не можуть бути представленими таблицями істинності. У нечіткій логіці вони задаються функціями і лише в крайніх випадках - коли значення змінних виключно 1 або 0 - згадані вище функції дають таблиці істинності операцій класичної логіки.

Нечітка логіка є підхід на основі «ступеня правди», а не прийнятим у булевій логіці «істина» та «хибність» (0 та 1) [8]. Ідея нечіткої логіки вперше була висунута доктором Лотфі Заде з університету Каліфорнії в Берклі у 1960-ті роки. Він працював над проблемою розуміння комп'ютером природної мови. Природну мову важко перекласти на терміни 0 та 1, як і більшість речей у нашому світі. Чи все, зрештою, описується нулем і одиницею - питання філософське, але насправді більшість даних, які ми хочемо надати комп'ютеру на обробку, перебувають у стані між цими двома числами.

Нечітка логіка використовує 0 і 1 як крайні ступені істинності, а й передбачає проміжні значення між ними.

Нечітка логіка близька до роботи людського мозку. Дані збираються та формується ряд часткових істин, які агрегуються в подальші значення істинності, які, у свою чергу, за певних перевищень порогових значень викликають спонування до дії. Подібний процес використовується у штучних комп'ютерних нейронних мережах та експертних системах.

Двійкова логіка є лише окремим випадком міркувань, заснованих на нечіткій логіці.

Можна виділити кілька особливостей нечіткої логіки:

- нечітка логіка проста у розумінні. Математичні уявлення, що лежать в основі нечіткої логіки, прості та інтуїтивно зрозумілі;
- нечітка логіка має гнучкість. Вона легко включається в систему, що функціонує, без потреби переписувати її заново;
- нечітка логіка терпима до нечітких даних. Якщо розібратися, то все у світі є неточним, і на основі цих розуміння будуються нечіткі міркування;
- нечітка логіка може моделювати нелінійні функції довільної складності. Можна створити будь-яку нечітку систему, щоб відповідати набору даних вводу-виводу;
- нечітка логіка ґрунтується на особистому досвіді експертів. На відміну від нейронних мереж, які створюють непрозорі моделі на основі навчання, нечітка логіка спирається на досвід людей, які вже знаються на даній системі.
- нечітка логіка може бути використана разом із звичайними методами управління. Для нечітких систем не обов'язково змінювати звичні системи керування. У багатьох випадках нечіткі системи доповнюють та спрощують їх реалізацію;
- нечітка логіка заснована природною мовою. Основою нечіткої логіки є людська мова, а оскільки нечітка логіка будується на структурах якісного опису, що використовуються у повсякденному мовленні, вона проста у використанні.

Природна мова, яку використовують люди, формувалася протягом тисячоліття, що може свідчити про її ефективність.

Виходячи з перерахованих вище переваг, можна зробити вибір на користь використання нечіткої логіки в інтелектуальних вимірювальних системах.

2 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З АВТОМАТИЧНИМ КОНТРОЛЕМ ТА ДИНАМІЧНОЮ ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ З АДАПТИВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОЛОГОСТІ

2.1 Вибір структури вимірювальної системи

Проектування системи необхідно починати з розробки її структурної схеми. Залежно від схемотехнічних, алгоритмічних та конструктивних рішень побудови основного вимірювального каналу вимірювальної системи, а також умов застосування та діючих дестабілізуючих факторів можливо кілька рішень за місцем формування зразкових сигналів. На рисунку 2.1 представлена структурна схема вимірювальної системи для випадку, коли формування зразкового впливу відбувається на вході нормуючого перетворювача, наприклад, для вимірювання неелектричної фізичної величини (зокрема, температури). Дана структурна схема вибирається як основна для подальшої розробки.

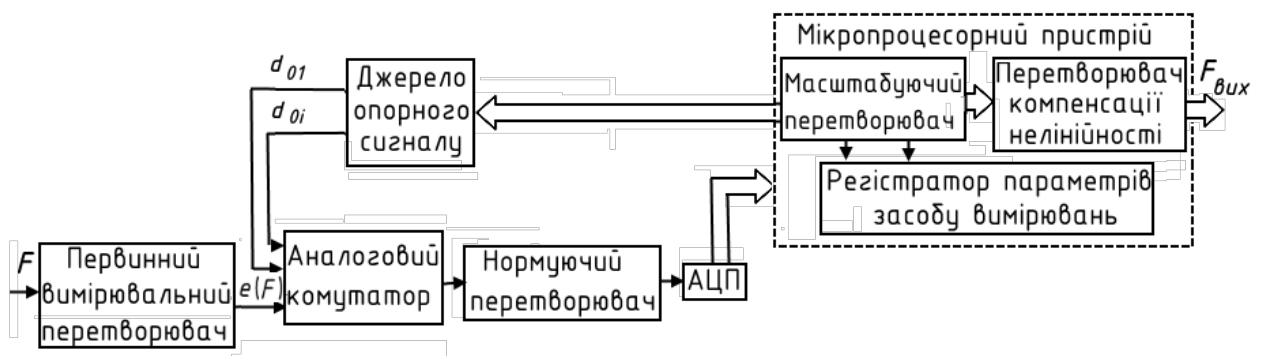


Рисунок 2.1 – Структурна схема вимірювальної системи

На рисунку 2.1 введено такі позначення:

F – вхідний сигнал;

$e(F)$ – сигнал на виході первинного вимірювального перетворювача, який функціонально залежить від вхідного сигналу;

$d_{01} \dots d_{0i}$ - зразкові сигнали;

$F_{\text{вих}}$ – сигнал на виході каналу.

Мікропроцесор обробляє дані, які надходять від датчиків температури і вологості. Також він формує інформацію щодо параметрів адаптивних регуляторів, які дозволяють тримати температуру і вологість в об'єкті у заданих межах.

Для контролю метрологічної справності вимірювальної системи, що розробляється, у процесі експлуатації повинна оцінюватися похибка та швидкість її зміни. При перевищенні похибки допустимого значення повинна проводитись автоматична корекція показників системи. При цьому коригуються коефіцієнти поліномів, які описують характеристику перетворення. Розрахунок коефіцієнтів поліномів виконується мікропроцесором.

2.2 Вибір датчика температури

Датчик температури описується рядом характеристик, сукупність яких дозволяє порівнювати датчики між собою і цілеспрямовано вибирати датчик для системи, що розробляється.

Перелічимо основні з цих характеристик:

1) функція перетворення (градувальна характеристика) є функціональною залежністю її вихідної величини від вимірюваної величини: $y = f(x)$. Залежність представляється в іменованих величинах: y - у одиницях вихідного сигналу чи параметрах датчика, x - у одиницях вимірюваної величини. Для датчиків температури – Ом/°C або мВ/К;

2) чутливість - відношення збільшення вихідної величини датчика до збільшення його вхідної величини: $S = dy/dx$. Для лінійної частини функції перетворення чутливість датчика є незмінною. Чутливість датчика характеризує ступінь досконалості процесу перетворення на ньому вимірюваної величини;

3) поріг чутливості – мінімальна зміна значення вхідної величини, яку можна впевнено виявити. Поріг чутливості пов'язаний як з природою вимірюваної величини, так і з досконалістю процесу перетворення вимірюваної величини в датчику;

4) межа перетворення - максимальне значення вимірюваної величини, яке може бути виміряно без незворотних змін датчика в результаті робочих впливів. Верхня межа вимірювань датчика зазвичай менша за межу перетворення принаймні на 10 %;

5) метрологічні характеристики - визначаються конструктивно-технологічними особливостями датчика, стабільністю властивостей матеріалів, що застосовуються в ньому, особливостями процесів взаємодії датчика з вимірюваним об'єктом. Метрологічні характеристики, своєю чергою, визначають характер і величини похибок вимірювання датчиків. Частина похибок може бути випадковими і враховуються методами математичної статистики. Систематичні похибки можуть бути аналітично описані та виключені з результатів виміру. Основними видами систематичних похибок є:

- похибки, зумовлені нелінійністю функції перетворення, що притаманно напівпровідниковим датчикам температури;

- похибки, зумовлені варіацією функції перетворення внаслідок зміни напрямку дії вхідної величини (для датчиків температури це нагрівання-охолодження);

- похибки, зумовлені невідповідністю динамічних можливостей датчика швидкості дії вхідної величини. Може бути враховано запровадженням коефіцієнта термічної інерції;

- додаткові похибки, зумовлені відмінністю умов роботи датчика від умов, у яких визначалася його функція перетворення;

- похибки, зумовлені нестабільністю функції перетворення внаслідок старіння матеріалу;

6) надійність - розглядається у двох аспектах: механічна надійність та метрологічна надійність;

7) експлуатаційні характеристики - до них можуть бути віднесені: маса, габаритні розміри, споживана потужність, міцність електричної ізоляції, номінали використовуваних електричних напруг, а також стійкість до агресивних середовищ, усіляких випромінювань, іскробезпека тощо

При порівнянні характеристик датчиків температури різних типів був вибраний цифровий вимірювач температури типу DS18B20 в комплексі з додатковим обладнанням.

DS18B20 є електронним пристроєм, що дозволяє проводити виміри температури з подальшою передачею сигналу тривоги оператору через GPS (рис. 2.2).

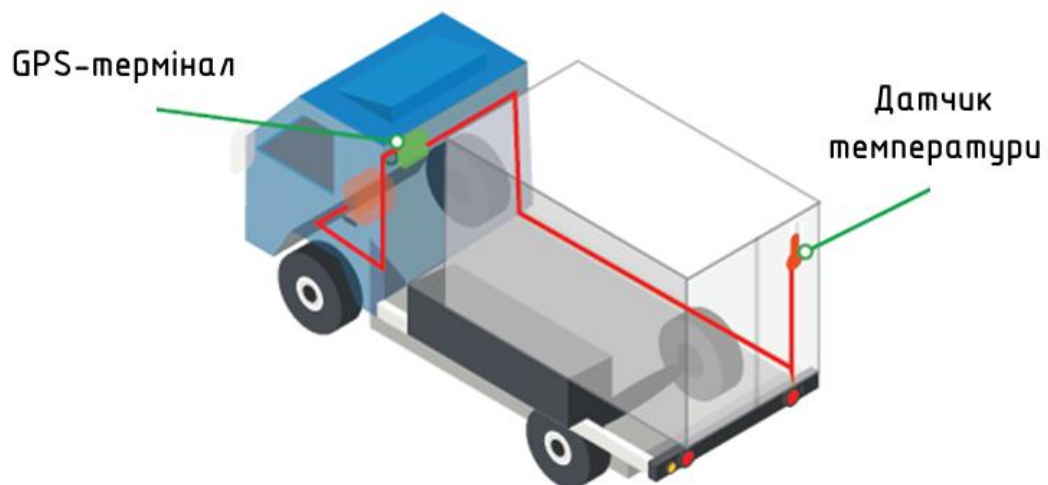


Рисунок 2.2 – Передача даних з датчика температури через GPS-термінал

Даний прилад має такі параметри:

- вбудований 9- ... 12-бітний перетворювач сигналу, що впливає на точність показань;
- граничні умови по необхідному температурному діапазону задаються користувачем і заносяться у вбудовану пам'ять контролера;
- пристрій передає результати вимірів диспетчеру по протоколу з інтерфейсом 1-Wire. Передача інформації проводиться по GPS зв'язку;
- вимірювач не потребує зовнішнього джерела живлення, так як для роботи достатньо напруги надходить зі слабкострумового каналу для передачі даних, що накопичується на конденсаторі;
- чутливий датчик дозволяє проводити виміри температури в об'єкті (приміщенні) при екстремальних значеннях - від -55 °C до + 125 °C;
- оболонка кабелю для передачі даних виконана з тугоплавкого полівінілхлориду.
- точність вимірювання складає 0,5 °C. Однак даний показник може незначно відрізнитися при температурі нижче +10 °C або вище +85 °C.

Кожен вимірювач температури DS18B20 має індивідуальний 64-розрядний код, що ідентифікує конкретний виріб. Це забезпечує можливість підключення відразу декількох контролерів на єдиний канал зв'язку, і пристрої не будуть заважати один одному.

Головне завдання датчика - трансформація реального значення температури навколишнього середовища, отриманого від металевого щупа в числову послідовність для подальшого зчитування і виведення на екран індикатора або монітора диспетчера. Користувачеві доступно 4 типи розширення, від яких залежить точність зчитування показань температури:

- 9 біт - досягається похибка у вимірі 0,5 °C;
- 10 біт – 0,25 °C;
- 11 біт – 0,125 °C;
- 12 біт – 0,0625 °C.

Датчик є всього лише частиною системи моніторингу температурного режиму. Щоб забезпечити синхронізацію зчитування показників і вивід інформації на доступний для користувача інтерфейс, необхідно мати наявності такі допоміжні пристрої:

- 1) спеціалізоване програмне забезпечення Arduino IDE, що інсталується на жорсткий диск комп'ютера.
- 2) установчий файл бібліотеки для контролю вхідних даних по протоколу 1-Wire;
- 3) структурована установча програма з функцією setup, звана скетч.
- 4) контролер, сумісний з Arduino, що дозволяє забезпечити логічний зв'язок датчика і програмного забезпечення;
- 5) кабель з роз'ємом USB, необхідний при підключенні контролера до пристрою для читання інформації - персонального комп'ютера, ноутбука або спеціалізованим пристроєм для індикації вхідних даних;
- 6) установча плата, необхідна для підключення мікросхеми та конектори;
- 7) при коректному підключенні контролера, буде потрібно калібрування приладу, перевірка якості сигналу, програмування граничних умов (найвищої T_h і найменшої T_l температур), а також тестування працездатності пристрою.

2.3 Вибір датчика вологості

Потрібно обрати з серії датчик з необхідними параметрами. Виберемо датчик вологості серії HCH-6000.

Ємнісні сенсори вологості HCH-6000 складаються з перфорованого верхнього електрода, поліімідного діелектричного шару, нижнього суцільного електрода та електричних виводів. Вся конструкція змонтована на скляній підкладці та утворює конденсатор. Пари вологи, адсорбуються в поліімідному шарі, змінюють його діелектричну проникність, що призводить

до зміни ємності. За даними [17], змінення значення діелектричної проникності від накопиченої в діелектрику вологи практично лінійне. Відповідно лінійною є і характеристика ємність-вологість (рис. 2.3).

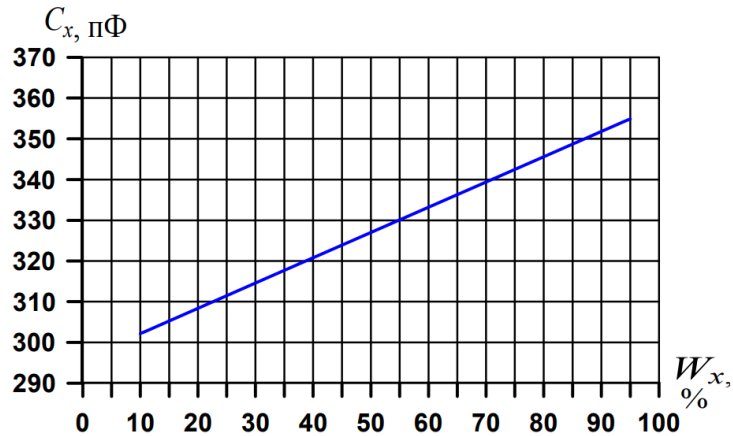


Рисунок 2.3 – Графік характеристики «ємність-вологість»

У табл. 2.1 наведено основні технічні характеристики ємнісного сенсора вологості HCH-1000.

Таблиця 2.1 – Характеристики HCH-6000 при $t = 25^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{вх}} = 1,0 \text{ В}$, $F = 1 \text{ кГц}$

Параметр	Мін.	Тип.	Макс.	Примітка
Прийнята (нормована за зазначенням) опорна ємність, пФ	310	330	350	При 55% вологості
Чутність, пФ/% RH	0,55	0,6	0,65	10% RH ... 95% RH
Гістерезис з вологості, % RH	-	$\pm 2,0$	-	-
Нелінійність, % RH	-	$\pm 2,0$	-	-
Час відгуку, сек	-	15	-	30% RH ... 90% RH
Температурний коефіцієнт, пФ/ $^{\circ}\text{C}$	0,15	0,16	0,17	$5^{\circ}\text{C} \dots 70^{\circ}\text{C}$
Довготривала стабільність, % RH/рік	-	0,2	-	-
Діапазон робочих температур, $^{\circ}\text{C}$	-40	-	+120	-
Діапазон вимірювання вологості, % RH	0	-	100	-
Частотний діапазон, кГц	1,0	-	100	-

В основу розв'язання задачі надмірних вимірів відносної вологості покладено правила з'єднання елементів пасивних електричних ланцюгів, зокрема, ємностей електричних конденсаторів. У якості стандартного зразка може використовуватися високостабільний конденсатор (танталовий або керамічний) з прийнятим значенням ємності C_0 при заданій вологості, наприклад, відносній вологості 55 % при температурі $t = 25^\circ\text{C}$.

Така задача може бути вирішена для двох випадків, оптимальних за кількістю вимірюваних фізичних величин C_1 , C_2 і C_3 :

1) третя фізична величина (C_3) формується шляхом паралельного з'єднання ємностей сенсора вологості (C_x) та опорного конденсатора з встановленим значенням ємності (C_0);

2) третя фізична величина (C_3) формується шляхом послідовного з'єднання ємностей сенсора вологості та опорного конденсатора.

Вимірювана ємність та вологість пов'язані між собою залежністю:

$$C_x = S'_{\text{лс}} [W_x(C_x) - W_{\text{н}}(C_{0\text{н}}) + C_{0\text{нпри } 55\%},$$

де $S'_{\text{лс}}$ – чутливість (пФ/%);

C_x - розрахункова ємність датчика, що відповідає вимірюваній вологості;

$C_{0\text{н}}$ – номінальна ємність датчика при вологості $W = 55\%$;

$W_x(C_x)$ - вимірювальна вологість;

$W_{\text{н}}(C_{0\text{н}})$ - номінальна стандартна вологість.

За результатами вимірювань ємності сенсора вологості дійсне значення вологості визначається за рівнянням вимірів:

$$W_x(C_x) = \frac{C_x - C_{0\text{нпри } 55\%}}{S'_{\text{лс}}} + W_{\text{н}}(C_{0\text{н}}) = S'_{\text{лв}} [C_x - C_{0\text{н}}|_{\text{при } 55\%}] + W_{\text{н}}(C_{0\text{н}}), \quad (2.1)$$

де $S'_{\text{лв}} = 1/(S'_{\text{лс}} S'_{\text{л}})$.

При виборі рядів вимірюваних фізичних величин (ємностей) необхідно враховувати, що для забезпечення унікальності розв'язання метрологічного завдання у першому такті вимірювального перетворення ємності необхідно здійснювати оцінку значення вимірюваної вологості W_x . Це необхідно для подальшого вибору відповідного стандартного зразка конденсатора, що відтворює ємність, близьку до ємності C_x за розміром.

Для першого випадку математична модель рядів вимірюваних фізичних величин набуде вигляду:

$$\begin{cases} \{C_1\} = \{C_x\} \\ \{C_2\} = \{C_0\} \\ \{C_3\} = \{C_x\} + \{C_0\} \end{cases}.$$

При лінійній функції перетворення вимірювального каналу, що включає сенсор вологості, формувач фізичних величин і перетворювач «ємність – напруга», рівняння зв'язку між величинами набуде вигляду:

$$U_{lx} = S'_l C_x + \Delta U'_0,$$

де S'_l - крутість перетворення вимірювального каналу, що відрізняється від номінальної S_l на ΔS_l чи в $(1+\gamma_l)$ раз, тобто $\{S'_l\} = \{S_l\} + (1 + \gamma_l)$, через вплив зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал;

$\Delta U'_0$ - усунення функції перетворення, обумовлене впливом зазначених факторів ($\{\Delta U'_0\} = \{\Delta U_0\} + \{\Delta_{ад}\}$);

$\Delta_{ад}$ та $\Delta_{мп} = \{\Delta S_l\}\{C_x\}$ - значення адитивної та мультиплікативної складових похибки результату перетворення.

Стан вимірювальної системи у дискретні моменти часу для першого випадку описується системою лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} U_{л1} = S'_л C_x + \Delta U'_0 \\ U_{л2} = S'_л C_0 + \Delta U'_0 \\ U_{л3} = S'_л (C_x + C_0) + \Delta U'_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Вирішуючи систему лінійних рівнянь (2.2) щодо C_x , можна отримати рівняння надлишкових вимірювань ємності сенсора вологості у вигляді:

$$C_x = C_0 \frac{U_{л3} - U_{л2}}{U_{л3} - U_{л1}}. \quad (2.3)$$

Підставляючи (2.3) у (2.1), можна отримати рівняння вимірювання відносної вологості у вигляді:

$$W_x(C_x) = S'_{лw} C_0 \left(\frac{U_{л3} - U_{л2}}{U_{л3} - U_{л1}} - 1 \right) + W_n(C_0).$$

Завдяки виконанню операцій віднімання виключається адитивна складова, а завдяки виконанню операції розподілу - мультиплікативна складова систематичної похибки результату надлишкових вимірів.

Рівняння надлишкових вимірів параметрів $S'_л$ та $\Delta U'_0$ опишуться досить простими рівностями:

$$S'_л = \frac{U_{л3} - U_{л2}}{C_0}$$

та

$$\Delta U'_0 = (U_{л1} + U_{л2}) - U_{л3}.$$

З характеристики на рис. 2.3 можна визначити $S'_л = 0,62$ пФ/%, $W_n(C_0) = 29,6$ %. Значення $S'_л$ залежить від крутості перетворення перетворювача «ємність – напруга» та від коефіцієнта підсилення підсилювача напруги.

На рис. 2.4 показана функціональна схема вимірювача відносної вологості.

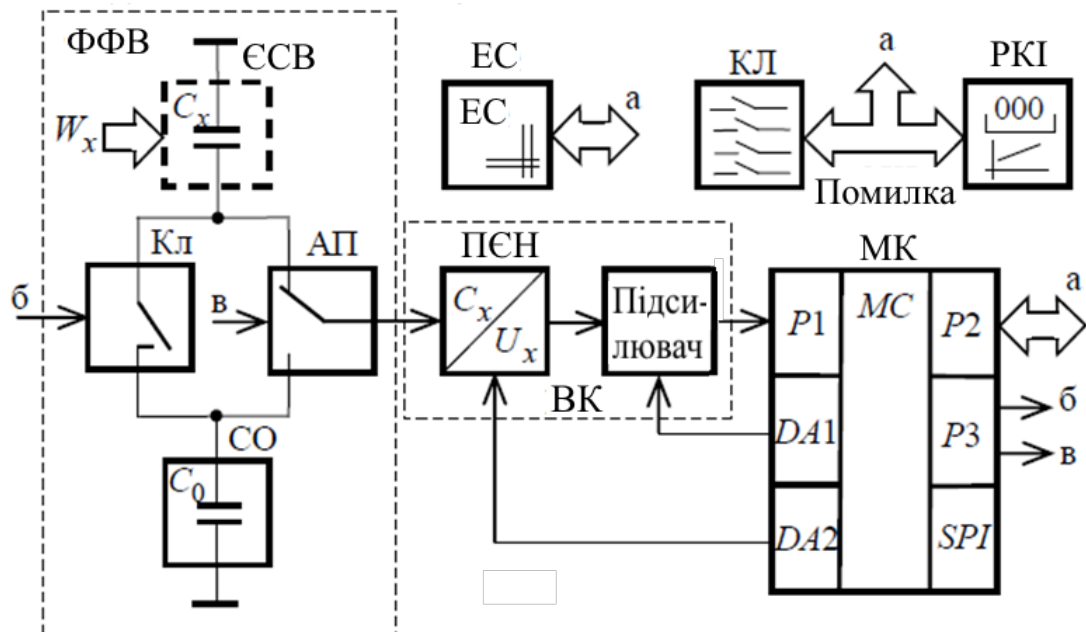


Рисунок 2.4 – Функціональна схема вимірювача відносної вологості

Функціональна схема містить наступні позначення: ФФВ – формувач фізичної величини; ЄСВ – ємнісний сенсор вологості; КЛ – ключ; АП – автоматичний перемикач; ЕС – електронна система; РКІ – рідинно-кристалічний індикатор; ПЄН – перетворювач ємність – напруга; ВК – вимірювальний канал; МК – мікроконтролер. Для даної функціональної схеми діапазон вологості складає 10 %, ... , 95 % у температурному діапазоні 40 °С, ... , 60 °С і вище. Схема реалізує метод надлишкових вимірювань.

3 АЛГОРИТМ І ПРОГРАМА АПРОКСИМАЦІЇ КІНЦЕВОЇ МНОЖИНИ ВИМІРЮВАНИХ ДАНИХ, СПОТВОРЕНИХ ШУМОМ

3.1 Постановка задачі по зменшенню шуму у виміряному сигналі

У каналах вимірювальних систем виникають адитивні завади, які динамічно змінюються і є випадковими. Такого типу завади зазвичай описуються моделлю адитивного білого гаусівського шуму з дискретним часом. Даний вид шуму притаманний багатьом вимірювальним системам, а особливо системам з радіозв'язком. Білий шум імітує ефекти багатьох природних випадкових процесів. Характерною особливістю білого шуму є рівномірність на усіх частотах спектральна густина потужності шуму. Білий шум статистично не залежить від корисного сигналу, що передається по каналу, а також має нормально розподілені у часі значення.

Суть представленого алгоритму, на основі якого розроблена програма, полягає у використанні адаптивної нейрон-нечіткої системи для розпізнавання прийнятого корисного сигналу з адитивним шумом, причому потужність завади у вигляді шуму може бути більше потужності корисного сигналу.

Система апроксимує залежність прийнятий сигнал з шумом як шумову складову сигналу. Потім з прийнятого сигналу віднімається апроксимована залежність. В результаті отримується корисний сигнал з дуже зниженим рівнем шуму, тобто потужність шуму значно зменшується, і шум майже не впливає на форму корисного сигналу. При необхідності подавити цю шумову складову можна легко за допомогою високочастотного фільтра.

3.2 Переваги використання гібридної мережі для підвищення рівня сигналу над рівнем шуму

Різновиди систем штучного інтелекту мають властивості, що відрізняються.

Наприклад, нейронні мережі автоматично набувають знання при достатньо повільному процесі навчання. Апріорну експертну інформацію ввести в них неможливо. Вже навчені нейронні мережі складно піддаються аналізу і для користувача, по суті, є «чорною скринькою».

Системи з нечіткою логікою не можуть здобувати знання автоматично. Кількість вхідних змінних у них обмежена, тому що в них універсальні множини розбиваються на окремі підмножини. У той самий час системи з нечіткою логікою легко піддаються аналізу.

У гібридних мережах висновки робляться з урахуванням апарату нечіткої логіки, а функції приналежності використовують алгоритми навчання нейронних мереж. Тому гібридні мережі поєднують переваги нейронних систем та систем з нечіткою логікою, тобто вони можуть використовувати апріорну інформацію, самостійно набувати нових знань, а користувач може проаналізувати їхню роботу.

Слід зазначити, що гібридні мережі створюються практично повністю автоматизовано, з можливістю перегляду сформованих правил, яким надається лінгвістична інтерпретація.

Використання гібридних систем у вимірювальних системах дозволяє апроксимувати залежності за експериментальними даними.

У поданій роботі апроксимація функцій виконується у два етапи.

Етап 1. Задається навчальна вибірка $((x^1, y^1), (x^2, y^2), \dots, (x^N, y^N))$, що є парою даних "вхід - вихід", яка генерується невідомою функцією $F(x)$, спотвореною шумом.

Етап 2. Визначається оцінка невідомої функції $F(x)$.

3.3 Використання функції ANFIS у програмі

Використання функції ANFIS (англ. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System –адаптивна нейрон-нечітка система) дозволяє виконати процедуру навчання системи нечіткого висновку типу Sugeno.

При цьому функція ANFIS працює за гібридним алгоритмом навчання, кінцевою метою якого є ідентифікація параметрів системи.

У процесі навчання нейрон-нечіткої системи мінімізується цільова функція, яка відповідає критерію якості, складеного за методом найменших квадратів, тобто мінімізується сума квадратів похибок. Похибки формуються шляхом порівняння навчаючої вибірки (Training data) з оцінкою, отриманою системою.

Навчаюча вибірка формується у вигляді матриці. Останній стовпець матриці відповідає вектору значень виходу, усі інші стовпці відповідають вхідним даним. Тому функція ANFIS може використовуватись для проєктування систем типів SISO (один вхід – один вихід) та MISO (багато входів – один вихід).

При мінімізації цільової функції використовується метод зворотного поширення помилки (error backpropagation method), який часто називають методом градієнтного спуску (gradient descent).

Можуть використовуватися два критерії завершення пошуку при оптимізації:

- досягнутий заданий рівень похибки навчання;
- виконана задана кількість циклів навчання (Epochs – кількість циклів навчання, тобто кількість прогонів навчальної вибірки).

Далі виконується перевіряльне налаштування нейронної мережі за допомогою перевіряючої вибірки (Checking data – перевіряюча вибірка). Перевіряльне налаштування дозволяє виявити ситуацію під назвою «перенавчання мережі», при якій похибка навчання наближаються до нуля.

За допомогою навчаючої та перевіряючої вибірок відбувається настроювання параметрів нейронної мережі, тобто параметрів функції приналежності FIS.

Після перевірконого налаштування відбувається перевірка якості функціонування налаштованої (навченої) нейронної мережі за допомогою тестуючої вибірки (Testing data).

Отже, робота функції ANFIS поділяється на три етапи:

- 1) генерація системи нечіткого висновку з параметрами:
 - тип функції приналежності (гаусова gaussmf);
 - кількість функцій приналежності, тобто кількість правил, що генеруються системою нечіткого висновку;
- 2) навчання системи;
- 3) обчислення оцінки x , де x – елемент заданої множини значень виходу (у випадку апроксимації зашумленої функції ним є сигнал без шуму, який невідомий).

3.4 Алгоритм апроксимації кінцевої множини вимірюваних даних, спотворених шумом

Алгоритм складається з етапів, перелічених нижче.

Етап 1. Генерація множини пар "вхід - вихід" за заданим аналітичним описом функції, яка підлягає апроксимації (тобто генерація корисного сигналу).

Етап 2. Генерація вектора $n1$ нормально розподілених псевдовипадкових чисел за допомогою функції randn (генерація шуму).

Етап 3. Припущення, що сигнал завади (шуму), який генерується у каналі, є випадковим і описується невідомим нелінійним рівнянням,

залежним від $n1$: $n2 = 4 \cdot \sin(n1(k)) \cdot n1(k-1) / (1 + n1(k-1)^4)$. Формування сітки (функція `meshgrid`) та відображення (функція `surface`) 3D-графіка сигналу завади.

Етап 4. Формування вимірюного сигналу, в який додається шум:

$$m = x + n2.$$

Графічне представлення сигналу m в залежності від часу.

Етап 5. Створення початкової нейронної мережі (функція `genfis1`) під назвою "in_fismat" з чотирма функціями приналежності (для подальшого навчання мережі) та двома входами.

Етап 6. За допомогою функції `anfis` виконується остаточне формування структури нейрон-нечіткої мережі, її навчання. Також відбувається точне налаштування параметрів 16 функцій приналежності.

Етап 7. Тестування налаштованої мережі з навчаючими даними. Виконання обчислення нечіткого висновку (оцінка вихідних значень за допомогою функцій приналежності) проводиться з використанням функції `evalfis`.

Етап 8. Вихідним сигналом мережі є оцінена завада $n2$. Визначення оціненого корисного сигналу x : $x = m - n2$.

Етап 9. Візуалізація графічних залежностей.

3.5 Висновки за результатами аналізу

У додатку А представлена програма апроксимації кінцевої множини вимірюваних даних, спотворених шумом. У додатку Б представлені результати роботи програми.

На рисунках Б.1-Б.6 додатку Б показані результати роботи програми у вигляді 2D- та 3D-зображень.

Особливу увагу можна звернути на рис. Б.5 та Б.6. На рис. Б.5 показаний корисний сигнал до якого додається адитивний шум. На графіку видно, що потужність корисного сигналу менше потужності шуму. Тому виділити корисний сигнал детермінованими методами не вдасться.

На рис. Б.6 додатку Б показаний сигнал, який був оброблений нейрон-нечіткою мережею ANFIS. Можна побачити, що потужність шуму порівняно з потужністю корисного сигналу значно зменшилася. Якщо необхідно отримати сигнал зовсім без завад, то далі можна використати детерміновані методи, наприклад, низькочастотну фільтрацію.

На рисунках Б.7 – Б.13 додатку Б представлена інформація щодо системи ANFIS.

Графічний інтерфейс гібридних (нечітких) нейронних систем визивається функцією ***anfisedit*** набором назви функції у головному (командному) вікні системи Matlab.

Завантаження структури системи виконується із робочої області MATLAB, тобто з Workspace. Структура сформована програмою і має назву `out_fismat`.

На рис. Б.7 додатку Б показана узагальнена структура отриманої у програмі системи нечіткого висновку типу Сугено з двома входами, одним виходом. Ця система під назвою ANFIS виконує фазифікацію функціями Гауса. Фазифікація дозволяє чіткому значенню ставити у відповідність ступені його приналежності до нечітких множин.

На рис. Б.8 додатку Б показане вікно редактора функцій приналежності: система автоматично визначила чотири апріорних функцій приналежності.

У верхній частині робочого інтерфейсу редактора зображується діаграма, що представляє у візуальній формі входи та виходи системи нечіткого виведення, в центрі яких знаходиться редактор нечітких правил ANFIS. При клацанні по вказаному редактору відкривається вікно редактора

правил, показаного на рис. Б.9 додатку Б. У цьому вікні представлено 16 функцій приналежності, які використовуються мережею ANFIS.

Відображення вхід / вихід представлено як 16 нечітких правил типу «if<умова> and <умова> then вихід визначається за правилом<правило>», тобто кожне правило складається з двох частин: умовної та заключної. Умовна частина складається з твердження щодо значень вхідних змінних, а у заключній частині вказуються правила, за якими визначаються вихідні змінні. Дефазифікація (процедура перетворення нечіткої множини на чітке число за ступенем приналежності) відбувається з використанням методу зваженого середнього.

Процес створення нечіткої (гібридної) системи повністю автоматизований з можливістю перегляду сформованих правил.

Якщо клацнути по прямокутнику із зображенням входу або виходу, то відкривається вікно редактора функцій приналежності, показаного на рисунку Б.10 додатку Б. Клацанням по одному з графіків можна виділити відповідну змінну і зробити її поточною. Зображення поточної змінної виділяється червоним кольором.

У правій правій нижній частині вікна переглядача правил (см. рис. Б.10) розташований прямокутник, який зображує нечітку множину, що відповідає вихідній змінній після акумулювання всіх висновків правил нечіткого виведення. Отримане в результаті дефазифікації значення вихідної змінної вказується у верхній частині стовпця з ім'ям цієї вихідної змінної (output=0.245).

Поверхня нечіткого виводу для структури FIS показана на рис. Б.11 додатку Б.

Структура отриманої нейро-нечіткої мережі показана на рис. Б.12 додатку Б. Кількість входів мережі задавалися у програмі. Структура сформована автоматично.

Нейро-нечітка мережа за допомогою представленої програми може виконувати роль апроксиматора експериментальних залежностей з шумовою компонентою.

4 ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ В ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ АДАПТИВНОЇ САК З НЕЙРО-НЕЧІТКИМ РІ-РЕГУЛЯТОРОМ

4.1 Вимірювальна система і система автоматичного керування об'єктом

На рисунку 4.1 показана блок-схема вимірювальної системи, що є сукупністю вимірювальних каналів, вимірювальних пристроїв та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації про декілька фізичних величин. До об'єкту дослідження під'єднуються первинні вимірювальні перетворювачі. Інформація, яка формується на виході вимірювальної системи, використовується для формування сигналів збудження та регулювання, які дозволяють змінювати параметри об'єкта. Формування вказаних сигналів виконує система автоматичного керування (САК). Також вихідна інформація надходить до зовнішньої системи мереж.

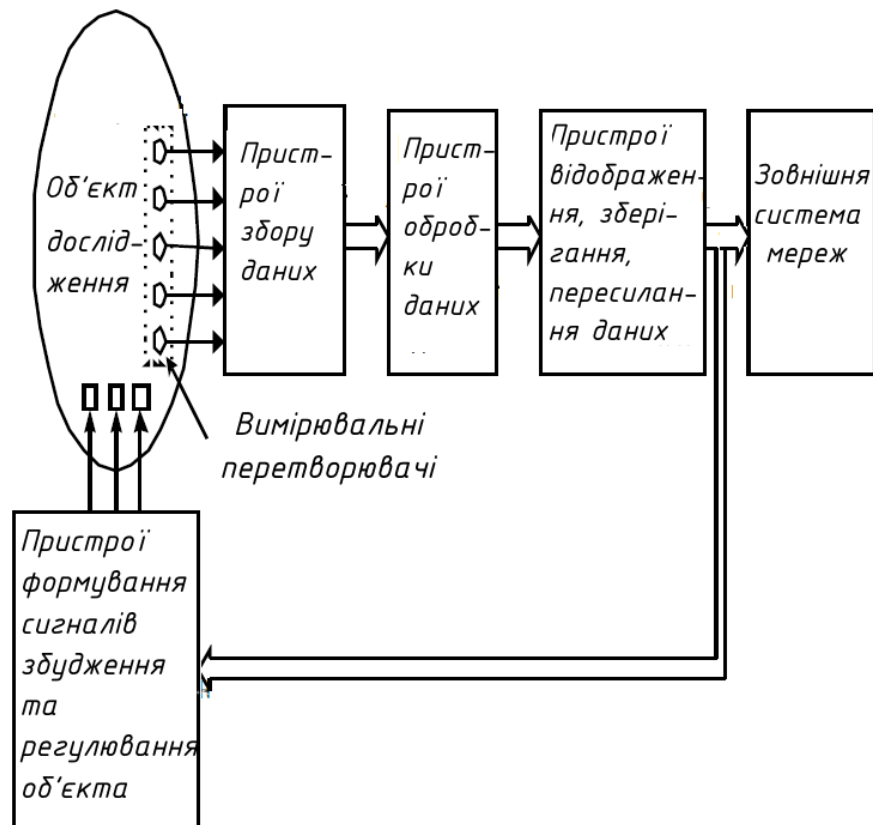


Рисунок 4.1 – Блок-схема вимірювальної системи

4.2 Обґрунтування використання адаптивних САК на основі нечіткої корекції налаштувань PI-регулятора

Складність налаштувань параметрів PI-регуляторів на базі аналітичних моделей не завжди приводить до оптимальних результатів тому, що моделі, як правило, спрощені. Крім того, коефіцієнт передачі K_p та стала часу інтегрування T_i PI-регулятора мають приблизне значення, а також не враховується завжди присутня у керуючому впливі нелінійність типу «обмеження» [10].

Фіксація (обмеження) вихідного сигналу САК на максимальному і мінімальному рівнях необхідна тому, що діапазон вихідного сигналу повинен відповідати діапазону цифроаналогового перетворювача на виході комп'ютера. Якщо ж вихідний сигнал САК надходить до виконавчого механізму, то він теж повинен обмежуватися у відповідності з робочим діапазоном виконавчого механізму.

При розробці САК треба враховувати властивості об'єкта керування. Якщо властивості об'єкта динамічно змінюються, то навіть добре спроектована САК може працювати неякісно [9].

Тому доцільно використовувати адаптивні САК, які не потребують повної апріорної інформації щодо властивостей об'єкта, але можуть навіть за таких умов працювати у автоматичному оптимальному режимі.

Адаптивні системи керування повинні:

- забезпечити необхідні показники якості керування при змінненні властивостей об'єкта керування у широких межах в динамічному режимі;
- забезпечити необхідну точність налаштування параметрів САК у режимі реального часу.

Таким вимогам задовольняють нечіткі САК, які якісно працюють в умовах невизначеності з підвищеними показниками якості перехідних

процесів. Тому аналіз роботи нечітких САК та розробка методів та алгоритмів їх функціонування є дуже актуальною задачею.

4.3 Системи нечіткого логічного виводу

4.3.1 Нечіткий логічний вивід

Система нечіткого виводу (fuzzy inference system) – це система, яка базується на алгоритмі отримання нечітких висновків на основі нечітких передумов з використанням понять нечіткої логіки.

Нечіткий логічний вивід є апроксимацією залежності «входи - вихід» на основі лінгвістичних висловлювань типу <якщо - то> та логічних операцій над нечіткими множинами [14].

Типова структура системи нечіткого виводу показано на рис. 4.2. Вона складається з модулів:

- фазифікатор, що перетворює фіксований вектор впливних факторів (X) у вектор нечітких множин $\tilde{X}$;
- нечітка база знань, яка містить інформацію про залежність $Y=f(X)$ у вигляді лінгвістичних правил <якщо - то>;
- функції приналежності, необхідні для подання лінгвістичних термів у вигляді нечітких множин;
- контролер нечіткого логічного виводу, який на основі правил бази знань визначає значення вихідної змінної у вигляді нечіткої множини $\tilde{Y}$, яка відповідає нечітким значенням вхідних змінних ($\tilde{X}$);
- дефазифікатор, що перетворює вихідну нечітку множину $\tilde{Y}$ у чітке число Y .

4.3.2 Нечіткі бази знань

Нечіткою базою знань називається сукупність нечітких правил, які задають взаємозв'язок між входами та виходами досліджуваного об'єкта. Формат нечітких правил:

якщо <посилання правила>, то <укладання правила>.

Посилання правила є твердженням типу « x є низький», де «низький» це терм, заданий нечіткою множиною на універсальній множині лінгвістичної змінної x . Квантифікатори "дуже", "ні", "майже", "менш-менш" та інші можуть використовуватися для модифікації термів.

Висновок правила - це факт типу «є d », в якому значення вихідної змінної може задаватися:

- нечітким термом - «є високий»;
- класом рішень - «є засіб вимірювання»;
- чіткою константою – « $y = 10$ »;
- чіткою функцією від входних змінних - " $y = 7 + 3x$ ".

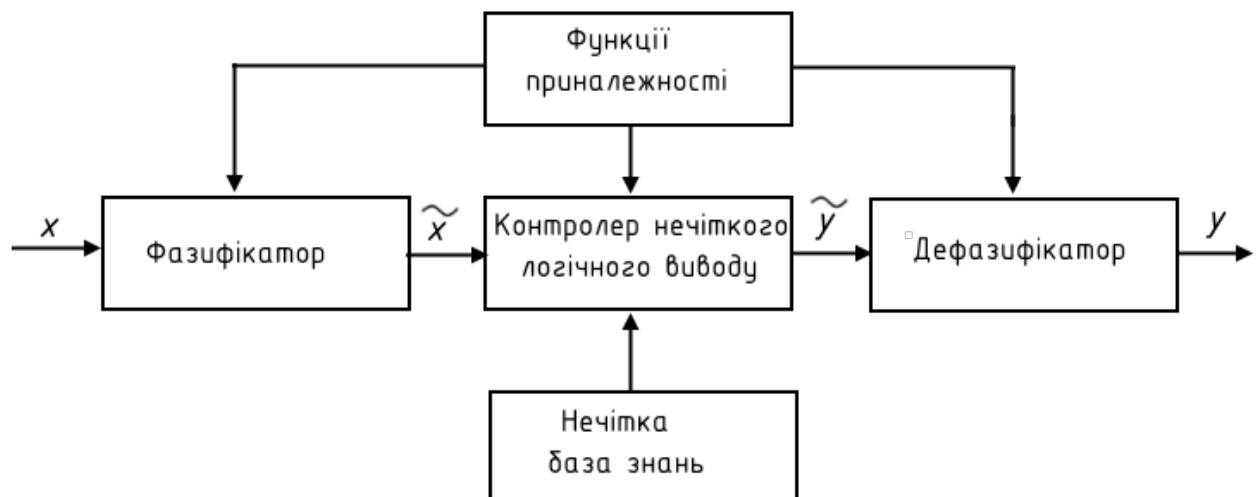


Рисунок 4.2 - Структура системи нечіткого виводу

4.3.3 Алгоритм нечіткого виводу Мамдані

Нехай (x, y) – вхідні змінні, що мають чіткі значення (x_0, y_0) та (z) – вихідна змінна.

У системах типу Mamdani база знань будується з нечітких висловлюваннях виду « $z \in \alpha$ » за допомогою зв'язок «І», «Якщо-ТО».

Задаються функції приналежності

$$(\mu_{A_1}, \mu_{A_2}, \mu_{B_1}, \mu_{B_2}, \mu_{C_1}, \mu_{C_2}),$$

та правила:

якщо $(x) \in (A_1)$ та $(y) \in (B_1)$, то $(z) \in (C_1)$,

якщо $(x) \in (A_2)$ та $(y) \in (B_2)$, то $(z) \in (C_2)$.

Етапи нечіткого виводу наступні:

1) фазифікація: знаходяться ступеня істинності для передумов кожного правила:

$$(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_1}(x_0), \mu_{B_2}(x_0));$$

2) вивід: знаходяться рівні відсікання для передумов кожного з правил з використанням операції мінімум:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \min\{\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)\}, \\ \alpha_2 &= \min\{\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)\}. \end{aligned}$$

потім знаходяться усічені функції приналежності:

$$\begin{aligned} \mu_{C_1'}(z) &= \min\{\alpha_1, \mu_{C_1}(x_0)\}, \\ \mu_{C_2'}(z) &= \min\{\alpha_2, \mu_{C_2}(x_0)\}. \end{aligned}$$

3) композиція: з використанням операції максимум проводиться об'єднання знайдених усічених функцій, що призводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для змінної виходу з функцією приналежності:

$$[\mu_{\text{Sigma}} = \mu_C(z) = \max\{\mu_{C_1'}, \mu_{C_2'}\} = \max\left\{\min\{\alpha_1, \mu_{C_1}(z)\}, \min\{\alpha_2, \mu_{C_2}(z)\}\right\}];$$

4) приведення до чіткості для отримання (z_0) виконується з використанням центру тяжіння:

$$[z_0 = \frac{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} z \cdot \mu_{\text{Sigma}}(z) dz}{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} \mu_{\text{Sigma}}(z) dz}],$$

де (Min) и (Max) — межі універсуму (області визначення) нечітких змінних.

Ілюстрація роботи алгоритму Мамдані приведена на рис. 4.3.

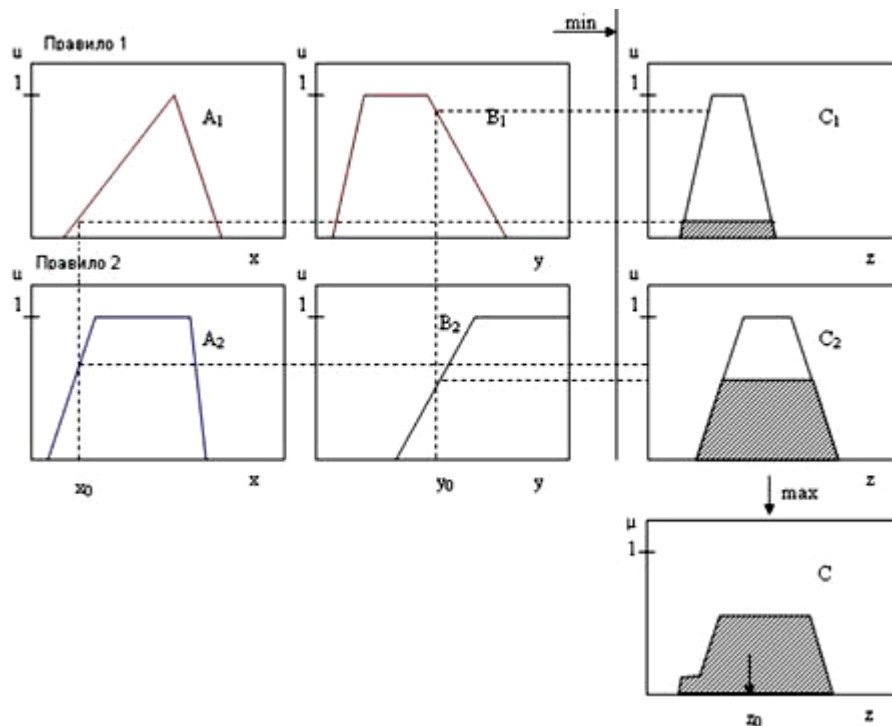


Рисунок 4.3 – Ілюстрація роботи алгоритму Mamdani

4.4 Нечітка корекція налаштувань параметрів PI-регулятора

Нечітка корекція налаштувань параметрів PI-регулятора шляхом аналізу якості перехідних процесів є задачею важливою і актуальною [11].

Коригування параметрів регуляторів при динамічному їх налаштуванні щодо розрахункових значень може бути якісним (нечітким), представленим лінгвістичними правилами, складеними дослідним шляхом [9]:

- якщо перехідний процес характеризується слабкими коливаннями або їх відсутністю, але великою тривалістю, то K_p регулятора слід збільшувати, а T_i зменшувати;
- якщо перехідний процес носить сильно виражений коливальний характер, то K_p може бути зменшений.

У [15] теж приведені правила налаштування регуляторів динамічних САК:

- збільшення K_p збільшує швидкодію, але знижує запас стійкості САК;
- зі зменшенням T_i помилка регулювання протягом часу зменшується швидше;
- зменшення T_i зменшує запас стійкості САК;
- збільшення K_p збільшує запас стійкості та швидкодію САК.

З урахуванням приведених правил нечіткі САК успішно функціонують в умовах невизначеності.

Тому аналіз роботи нечіткої адаптивної САК, а також розробка алгоритму, за яким вона функціонує, в умовах динамічного змінення властивостей об'єкта регулювання у широких діапазонах поставлена за мету у представленій роботі.

4.5 Розробка програми налаштування параметрів регулятора адаптивної САК на базі апарату нечіткої логіки

4.5.1 Постановка задачі

Нехай система САК керує об'єктом, який описується передавальною функцією з декількома аперіодичними ланками з запізнюванням:

$$W(s) = \frac{K_p}{(T_i(s)+1)^n} e^{-\tau(s)},$$

де s – комплексна змінна.

Причому параметри об'єкта K_p та T_i змінюють свої значення до 60% випадково протягом деякого діапазону часу.

Нехай кількість ланок $n = 3$ і у статичному режимі:

$$W(s) = \frac{0,45}{(3,9s+1)^3} e^{-0,52s}.$$

Показник коливальності перехідного процесу заданий: $M = 1,55$. Час регулювання $T_p \leq 60$ с.

Тоді за формулами, приведеними у [16], можна отримати параметри ПІ-регулятора: $K_p = 3,86$, $T_i = 11,18$ с.

4.5.2 Нечітка корекція налаштувань ПІ-регулятора

При динамічному змінненні властивостей об'єкта регулювання нечітка корекція параметрів ПІ-регулятора призводить до покращення роботи САК і, як наслідок покращується якість перехідних процесів адаптивної системи.

Якщо значення параметрів об'єкта змінюються випадково в діапазоні 60 %, то можна розрахувати мінімальне, середнє і максимальне значення K_{ob} та T_{ob} . Для K_{ob} це: 0,28; 0,43; 0,72 відповідно. Для T_{ob} це: 2,43; 3,9; 6,24 [с] відповідно.

Отже, можна отримати дев'ять пар значень при поєднуванні K_{ob} та T_{ob} (табл. 4.1). Значення параметрів регулятора K_p та T_i отримані за допомогою підгоночного моделювання за формою передавальної характеристики САК (при цьому досягалося зменшення величини перерегулювання і тривалості перехідного процесу при впливі ступінчастої функції). Приклади результатів такого моделювання показані у додатку В.

Таблиця 4.1 – Допоміжна таблиця для формування функцій приналежності

K_{ob}	T_{ob}	K_{ob}	T_{ob}	K_{ob}	T_{ob}	K_{ob}	T_{ob}	K_{ob}	T_{ob}	K_{ob}	T_{ob}	K_{ob}	T_{ob}	K_{ob}	T_{ob}	K_{ob}	T_{ob}
mal	mal	mal	vel	vel	mal	vel	vel	ser	ser	ser	mal	ser	vel	mal	ser	vel	ser
0,28	2,43	0,28	6,24	0,72	2,43	0,72	6,24	0,43	3,9	0,43	2,43	0,43	6,24	0,28	3,9	0,72	3,9
K_p	T_i	K_p	T_i	K_p	T_i	K_p	T_i	K_p	T_i	K_p	T_i	K_p	T_i	K_p	T_i	K_p	T_i
1,6	4,3	2,8	8,34	1,6	9,9	1	8,34	2,8	12,5	2,8	9,9	1,6	8,34	4,5	12,5	1,6	11,6

На основі аналізу даних таблиці 4.1 сформовані функції приналежності:

- 1) якщо $K_{ob} = \text{mal}$ і $T_{ob} = \text{mal}$, то $K_p = \text{nev}$ і $T_i = \text{mal}$;
- 2) якщо $K_{ob} = \text{mal}$ і $T_{ob} = \text{vel}$, то $K_p = \text{ser}$ і $T_i = \text{nev}$;
- 3) якщо $K_{ob} = \text{vel}$ і $T_{ob} = \text{mal}$, то $K_p = \text{nev}$ і $T_i = \text{ser}$;
- 4) якщо $K_{ob} = \text{vel}$ і $T_{ob} = \text{vel}$ то $K_p = \text{mal}$ і $T_i = \text{nev}$;
- 5) якщо $K_{ob} = \text{ser}$ і $T_{ob} = \text{ser}$, то $K_p = \text{ser}$ і $T_i = \text{vel}$;
- 6) якщо $K_{ob} = \text{ser}$ і $T_{ob} = \text{mal}$, то $K_p = \text{ser}$ і $T_i = \text{ser}$;
- 7) якщо $K_{ob} = \text{ser}$ і $T_{ob} = \text{vel}$, то $K_p = \text{nev}$ і $T_i = \text{nev}$;
- 8) якщо $K_{ob} = \text{mal}$ і $T_{ob} = \text{ser}$, то $K_p = \text{vel}$ і $T_i = \text{vel}$;
- 9) якщо $K_{ob} = \text{vel}$ і $T_{ob} = \text{ser}$, то $K_p = \text{nev}$ і $T_i = \text{nemal}$.

У табл. 4.2 показані відповідності позначень, що використані у табл.4.1 та у програмі, яка розроблялася на основі табл. 4.1 та сформованих функцій приналежності.

Таблиця 4.2 – Відповідності позначень функцій приналежності

Параметри	Позначення функцій приналежності				
	mal	nemal	ser	Nev	vel
K_{ob}	A1	-	A2	-	A3
T_{ob}	B1	-	B2	-	B3
K_p	C1	-	C2	C3	C4
T_i	D1	D2	D3	D4	D5

Графічне представлення функцій приналежності показане у додатку Г і додатку Д.

Програма розрахунку оптимальних параметрів PI-регулятора на основі апарату нечіткої логіки з використанням алгоритму Мамдані представлена у додатку Е. За програмою були розраховані оптимальні параметри PI-регулятора: $K_p = 1,568$; $T_i = 10,5819$ с.

4.6 Розробка моделі нечіткої адаптивної системи автоматичного керування

Для порівняльного аналізу розроблені чотири моделі систем автоматичного керування у пакеті візуального блочного імітаційного моделювання Simulink. Моделі представлені на рис. 4.4.

У всіх моделях враховано вплив зовнішніх збурень із передавальною функцією

$$W(s) = \frac{1,5}{3,9s+1}.$$

Вхідний сигнал кожної моделі представлений одиничною функцією.

У моделі з виходом Out_1 параметри PI-регулятора: $K_p = 3,86$, $T_i = 11,18$ с (тобто початкові параметри). Параметри об'єкта регулювання відносяться до середніх: $K_{ob} = 0,45$, $T_{ob} = 3,9$ с.

У моделі з виходом Out_2 параметри PI-регулятора залишаються такими ж, як у моделі з виходом Out_1. Однак параметри об'єкта регулювання змінюються на 60% у бік збільшення: $K_{ob} = 0,65$, $T_{ob} = 7$ с.

У моделі з виходом Out_3 параметри об'єкта регулювання такі ж, як у моделі з виходом Out_2, а параметри PI-регулятора адаптовані під нові умови роботи і складають: $K_p = 1,568$, $T_i = 10,582$ с. Вони розраховувалися за допомогою розробленої програми, основою якої є нейро-нечітка корекція налаштувань регулятора, причому, одночасна корекція двох параметрів.

У моделі з виходом Out_4 параметри PI-регулятора залишаються такими ж, як у моделі з виходом Out_3, тобто вони оптимально налаштовані. У той же час параметри об'єкта зменшені на 60% по відношенню до середніх.

Результати аналізу роботи моделей показано на рис. 4.5. Порівняльний аналіз отриманих перехідних процесів вказує на те, що у моделі з виходом Out_2 отриманий перехідний процес низької якості, зі значним перерегулюванням та з низьким затуханням коливань.

У моделі з виходом Out_3 перерегулювання теж велике, але воно зменшене порівняно з моделлю з виходом Out_2. Крім того, коливальний процес дуже швидко затухає.

У моделі з виходом Out_4 перерегулювання менше, ніж в моделі з виходом Out_3. Перехідний процес навіть носить аперіодичний характер з достатньо великою швидкістю спаду характеристики.

Висновок: алгоритм на основі роботи нейро-нечіткого апарату дозволяє налаштовувати одночасно два параметри регулятора, причому темп їх ідентифікації порівняний з темпами перехідних процесів. Якість перехідних

процесів є задовільною навіть при зміні параметрів об'єкта регулювання у дуже широкому діапазоні.

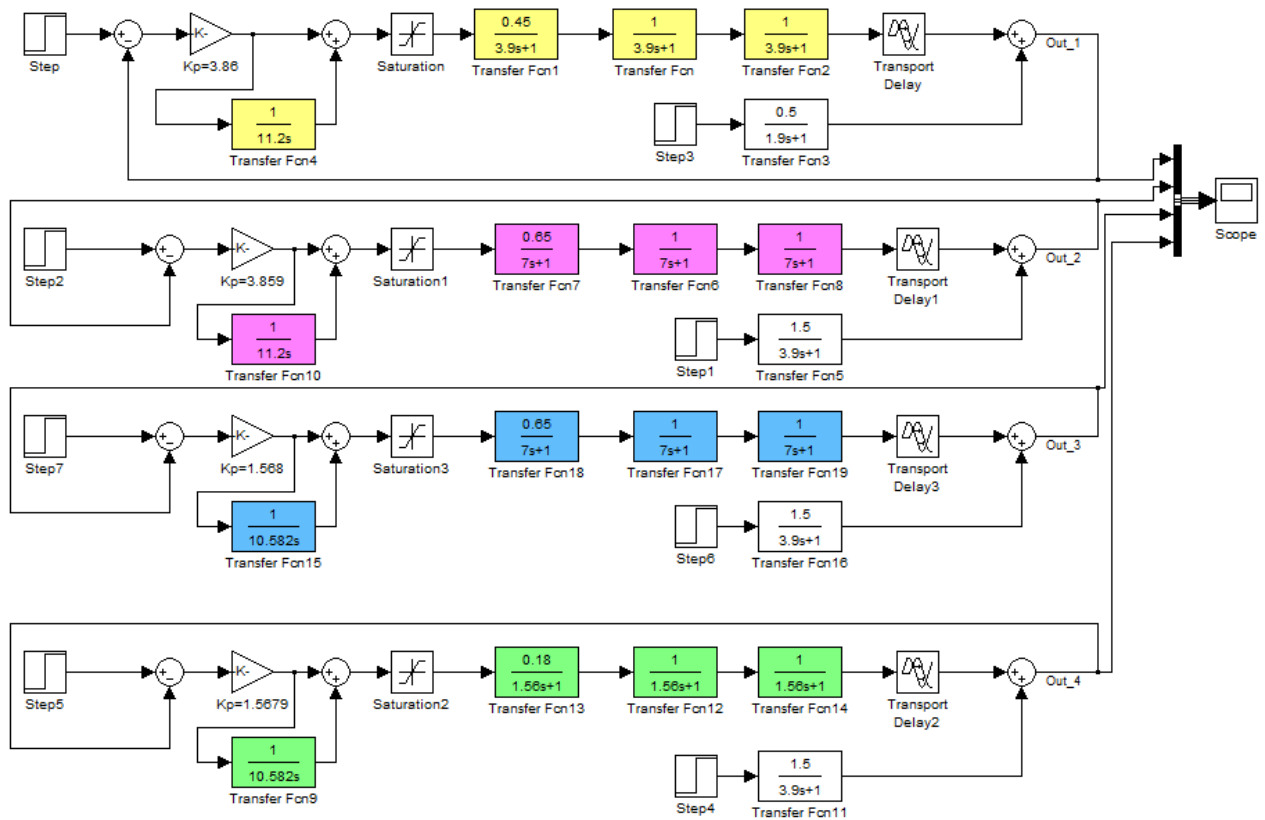


Рисунок 4.4 – Чотири моделі систем автоматичного керування

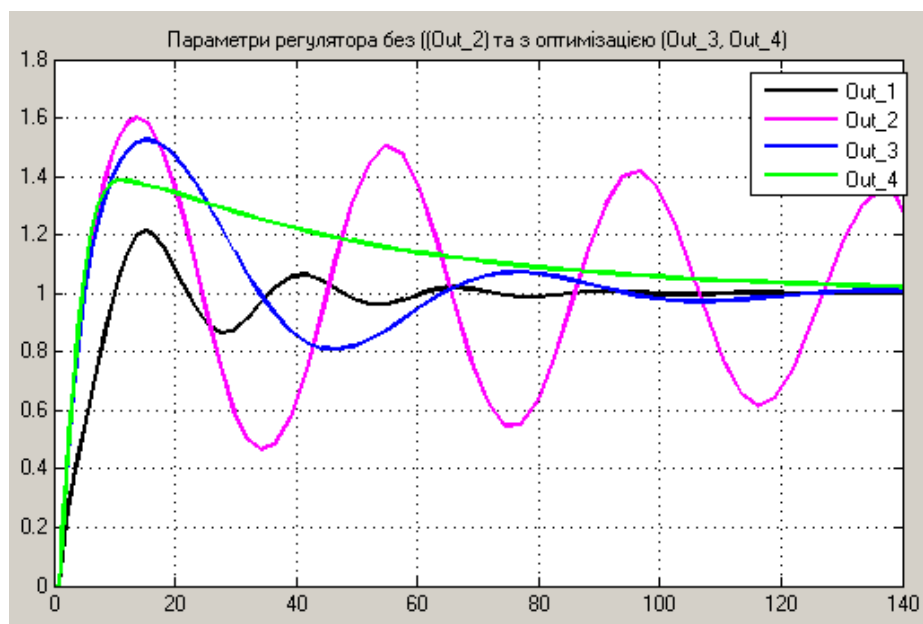


Рисунок 4.5 – Результати аналізу перехідних процесів при входніх впливах типу одиничної функції

ВИСНОВКИ

У представленій роботі розглянуті теоретичні питання щодо принципів побудови, класифікації, структур інтелектуальних вимірювальних систем. Також розглянуті їх контролерні та сервісні функції.

Більш детально розглянуті інтелектуальні датчики, їх особливості, види похибок, які в них виникають, та принципи виявлення та корегування похибок.

Була вибрана структура вимірювальної системи з можливістю адаптивного регулювання температури і вологості. Вибрані конкретні типи датчиків температури та вологості, приведені їх функції, параметри. Розглянута функціональна схема датчика вологості з можливістю корегування адитивної та мультиплікативної похибок.

Також розроблені алгоритм і програма, яка дозволяє апроксимувати шумові характеристики сигналів вимірювальних каналів. Внаслідок цього шумову складову в сигналі можна значно зменшити. Вказаний алгоритм побудований на основі використання адаптивної нейро-нечіткої мережі. Приводяться результати аналізу, отримані при використанні програми, і детально описуються висновки за результатами аналізу.

Отримана узагальнена структура системи нечіткого висновку типу Сугено з двома входами, одним виходом. Ця система під назвою ANFIS виконує фазифікацію функціями Гауса. Фазифікація дозволяє чіткому значенню ставити у відповідність ступені його приналежності до нечітких множин. В програмі було використано чотири апіорних функції приналежності.

Дефазифікація відбувається з використанням методу зваженого середнього.

Процес створення нечіткої гібридної системи повністю автоматизований з можливістю перегляду сформованих правил. Нейро-

нечітка мережа за допомогою представленої програми може виконувати роль апроксиматора експериментальних залежностей з шумовою компонентою.

Значна увага в роботі приділялася об'єктам регулювання системи автоматичного керування, до якої входить, як складова, досліджувана вимірювана система. Якщо властивості об'єкта динамічно змінюються, то навіть добре спроектована система автоматичного керування може працювати неякісно.

Тому в роботі був взятий об'єкт, який описувався передавальною функцією третього порядку з аперіодичними ланками з запізнюванням. При дослідженні ці параметри змінювалися випадково на 60% протягом деякого діапазону часу.

Такі край тяжкі умови роботи системи автоматичного регулювання аналізувалися, і за допомогою складеної у роботі програми виконувалася нечітка корекція налаштувань РІ-регулятора, що входить до складу адаптивної системи автоматичного керування.

В програмі була реалізована система нечіткого виводу, яка працює за алгоритмом Мамдані. Отримані результати перевірялися за допомогою імітаційного моделювання роботи моделей систем автоматичного керування в режимі аналізу перехідних процесів. Була підтверджена результативність роботи програми. Причому алгоритм на основі нейро - нечіткого апарату дозволяє налаштувати одночасно два параметри РІ-регулятора, а темп їх ідентифікації порівняний з темпами перехідних процесів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 ДСТУ 2481-94. Системи оброблення інформації. Інтелектуальні інформаційні технології. Терміни та визначення [Текст]. – Прийнято та надано чинності 1995-01-01. Київ: Держстандарт України, 1994. - 72 с.
- 2 Інтелектуальні вимірювальні системи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://helpiks.org/5-88953.html> / (дата звернення: 09.05.2023).
- 3 Sonel MIC-10k1UA. Вимірювач опору ізоляції [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.promsystem.com.ua/product/sonel-mic-10k1ua-vymiryuvach-oporu-izolyacziyi/> (дата звернення: 09.05.2023).
- 4 Види вимірювальних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://studme.org/180334/ekologiya/vidy_izmeritelnyh_sistem.
- 5 Вимірювальний інтерфейс [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/4523212/page:32/>.
- 6 Інтелектуальні вимірювальні системи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/4523212/page:31/>.
- 7 Нечітка логіка. Основні визначення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:075b2e8a0bfe48bcef0ab3106c6d51679abc41f9/20171117122502//117286/index.html.
- 8 **Заражевский, А.В.** [Електронний ресурс] – Режим доступу: file:///C:/Users/DELL5480/Downloads/Заражевский%20А.В._ПМИб_1201.pdf.
- 9 **Ковриго, Ю.М.** Адаптивное управление теплоэнергетическими процессами [Текст] / Ю. М. Ковриго, А. П. Мовчан, И. А. Полищук, Б.В. Фоменко // [Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи.](#) - ХНТУ. - 2007. - № 2. - С. 147-156. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2007_2_25.

- 10 **Михайленко, В. С.** Адаптивная настройка нечёткого ПИ-регулятора по идентификации переходного процесса [Текст] / В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета. - 2012. - Вып.1(38). - С. 152–156.
- 11 **Михайленко, В. С.** Алгоритм настройки адаптивного нейро-нечёткого ПИ-регулятора [Текст] // Труды Одесского политехнического университета. — 2011. - № 2.- С. 149–154.
- 12 **Жмудь, В. А.** Системы автоматического управления высшей точности: учеб. пособие [Текст] / В.А. Жмудь, А.В. Тайченачев / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2016. - 133 с.
- 13 **Мелков, Д.А.** Сравнение алгоритмов нечёткого вывода с использованием языков стандарта МЭК [Текст] / Д. А. Мелков // Молодой ученый. - 2013. - № 5 (52). - С. 74-79. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/52/6980/> (дата обращения: 19.05.2023).
- 14 **Штовба, С.Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
- 15 **Дейч, А.М.** Методы идентификации динамических объектов [Текст] / А.М. Дейч. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.
- 16 **Ротач, В. Я.** Теория автоматического управления [Текст] / В. Я. Ротач. – М.: МЭИ, 2008. – 396 с.
- 17 **Кондратов, В.Т.** Теория избыточных измерений [Текст] / В.Т. Кондратов // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. - 2006. - № 5. - С. 23-33.

ДОДАТОК А

Програма апроксимації кінцевої множини вимірюваних даних,
спотворених шумом

```

time = (0:0.01:6);
x = sin(40./(time+0.01));
plot(time, x)
title('Невідомий корисний сигнал x','fontsize',10)
xlabel('time','fontsize',10)
ylabel('x','fontsize',10)
pause;
n1 = randn(size(time));
plot(time, n1)
title('Невідомий сигнал шуму n1','fontsize',10)
xlabel('time','fontsize',10)
ylabel('n1','fontsize',10)
pause;
domain = linspace(min(n1), max(n1), 20);
[xx, yy] = meshgrid(domain, domain);
zz = 4*sin(xx).*yy./(1+yy.^4);
surf(xx, yy, zz);
xlabel('n1(k)','fontsize',10);
ylabel('n1(k-1)','fontsize',10);
zlabel('n2(k)','fontsize',10);
title('Припускається, що шум у каналі описується показаною нелінійною характеристикою','fontsize',10);
pause;
n1d0 = n1; % n1 delay 0
n1d1 = [0; n1d0(1:length(n1d0)-1)]; % n1 delay 1
n2 = 4*sin(n1d0).*n1d1./(1+n1d1.^4); % шум у каналі
subplot(2,1,1)
plot(time, n1);
title('Білий шум за функцією randn','fontsize',10)
ylabel('Білий шум n1','fontsize',10);
xlabel('time','fontsize',10)
subplot(2,1,2)
plot(time, n2);
xlabel('time','fontsize',10)
title('Шум, заданий аналітично','fontsize',10);
ylabel('Шумовий сигнал n2','fontsize',10);
pause;
m = x + n2; % виміряний сигнал+шум, заданий аналітично
subplot(1,1,1)
plot(time, m)
title('Виміряний сигнал з шумовою аналітичною складовою','fontsize',10)
xlabel('time','fontsize',10)
ylabel('Виміряний сигнал m з аналітичним шумом','fontsize',10)
%
delayed_n1 = [0; n1(1:length(n1)-1)];
trn_data = [delayed_n1 n1 m];
% Створення початкової мережі
mf_n = 4;
ss = 0.02;
in_fismat=genfis1(trn_data, mf_n);
% Використання функції ANFIS для точного налаштування параметрів функцій
% приналежності FIS
out_fismat = anfis(trn_data, in_fismat, [nan nan ss]);

```

```

% Тестування налаштованої моделі з навчаючими даними
estimated_n2 = evalfis(trn_data(:, 1:2), out_fismat);
estimated_x = m - estimated_n2;
subplot(2,1,1)
plot(time, n2)
ylabel('Невідоме n2, створене аналітично');
%
subplot(2,1,2)
plot(time, estimated_n2)
ylabel('Оцінене n2');
%
subplot(2,1,1)
plot(time, x)
ylabel('Невідома залежність x(t) ');
subplot(2,1,2)
plot(time, x)
hold on;
plot(time, estimated_x, '-r','LineWidth',1)
ylabel('Розрахункова залежність x(t)');
xlabel('time','fontsize',10);

```

Результати роботи програми

ANFIS info:

```

Number of nodes: 21
Number of linear parameters: 12
Number of nonlinear parameters: 12
Total number of parameters: 24
Number of training data pairs: 601
Number of checking data pairs: 0
Number of fuzzy rules: 4

```

Start training ANFIS ...

```

1      0.710028
2      0.707629
3      0.70593
4      0.704846
5      0.70496
6      0.704652
7      0.704706
8      0.704467

```

Step size decreases to 0.180000 after epoch 8.

```

9      0.704535
10     0.704051

```

Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 10.

ДОДАТОК Б

Результати аналізу за програмою апроксимації кінцевої множини
вимірюваних даних, спотворених шумом

Результати аналізу за програмою апроксимації кінцевої множини
вимірюваних даних, спотворених шумом, показані на рисунках Б.1 – Б.13.

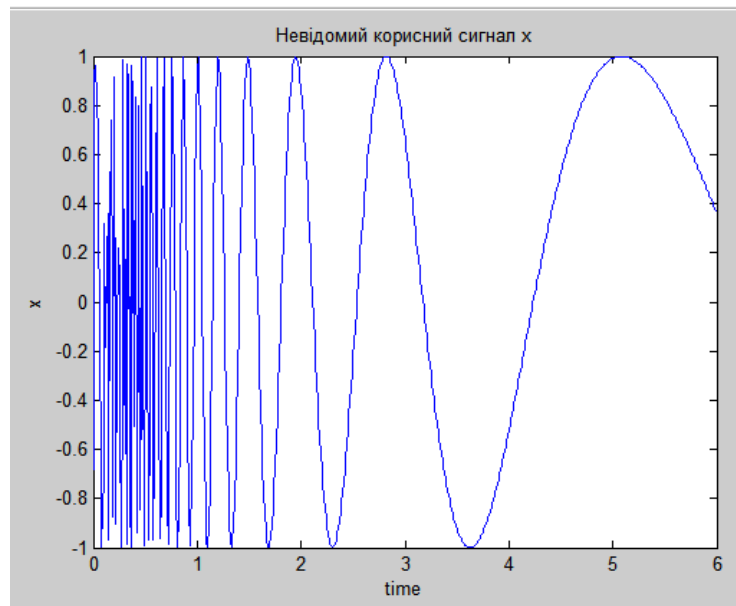


Рисунок Б.1 – Невідомий корисний сигнал (у програмі заданий дискретизованою аналітичною залежністю)

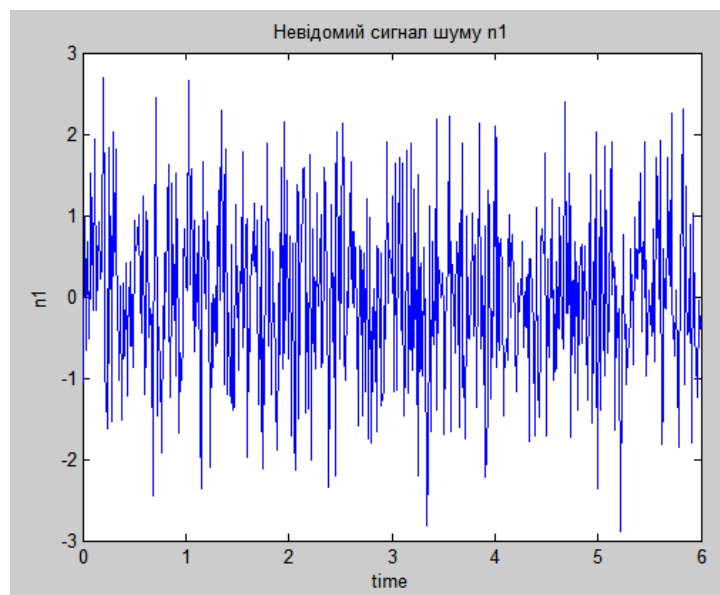


Рисунок Б.2 – Невідомий сигнал шуму у каналі (у програмі заданий функцією randn)

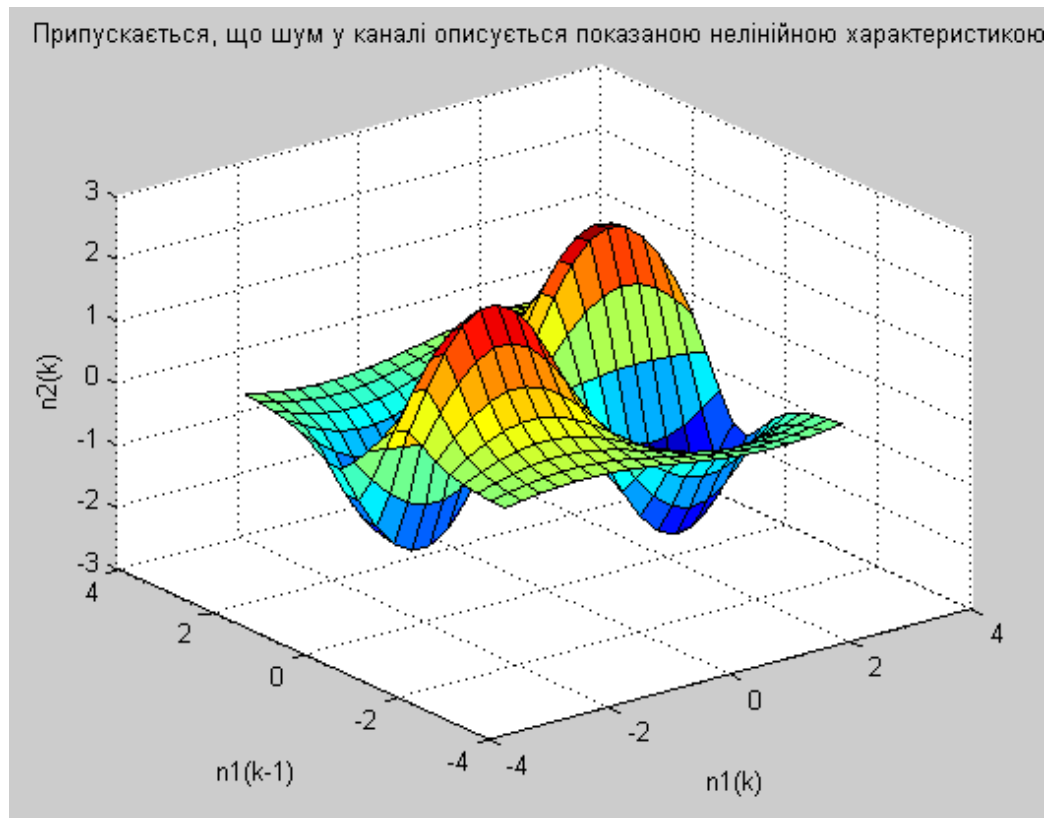


Рисунок Б.3 – Поверхня, якою описується шум у каналі

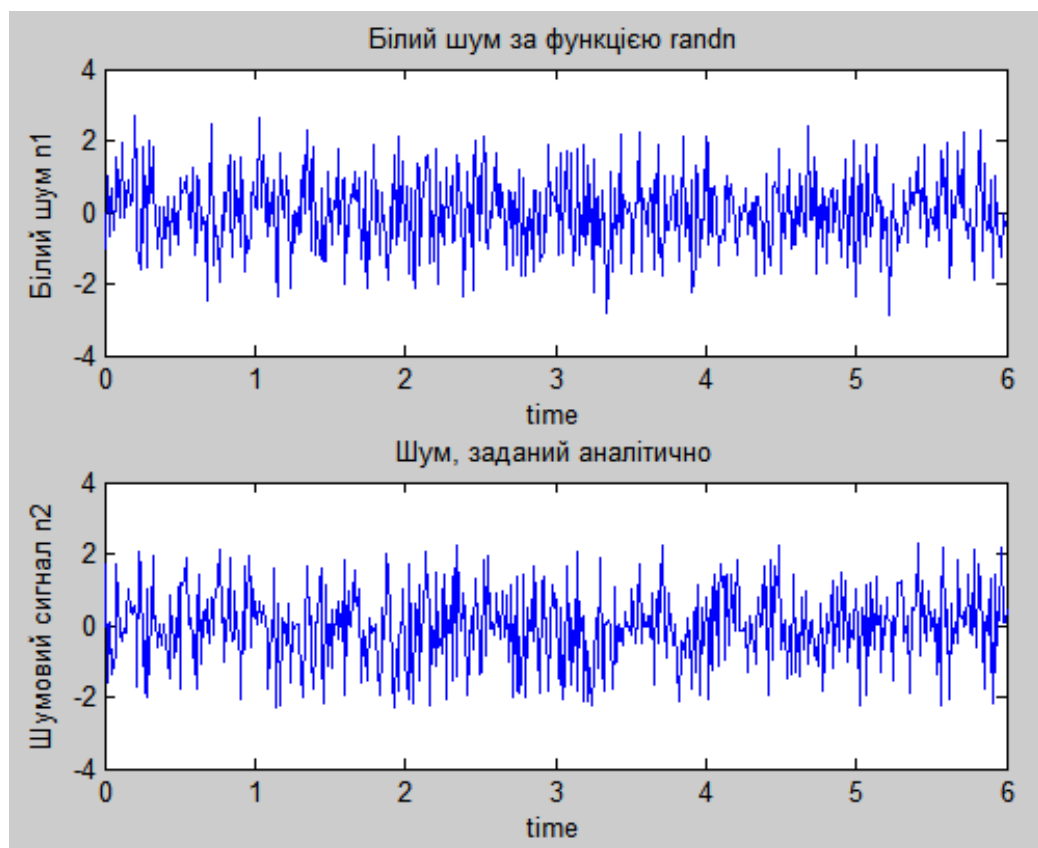


Рисунок Б.4 – Часові залежності шумів у каналі, що задані різними способами

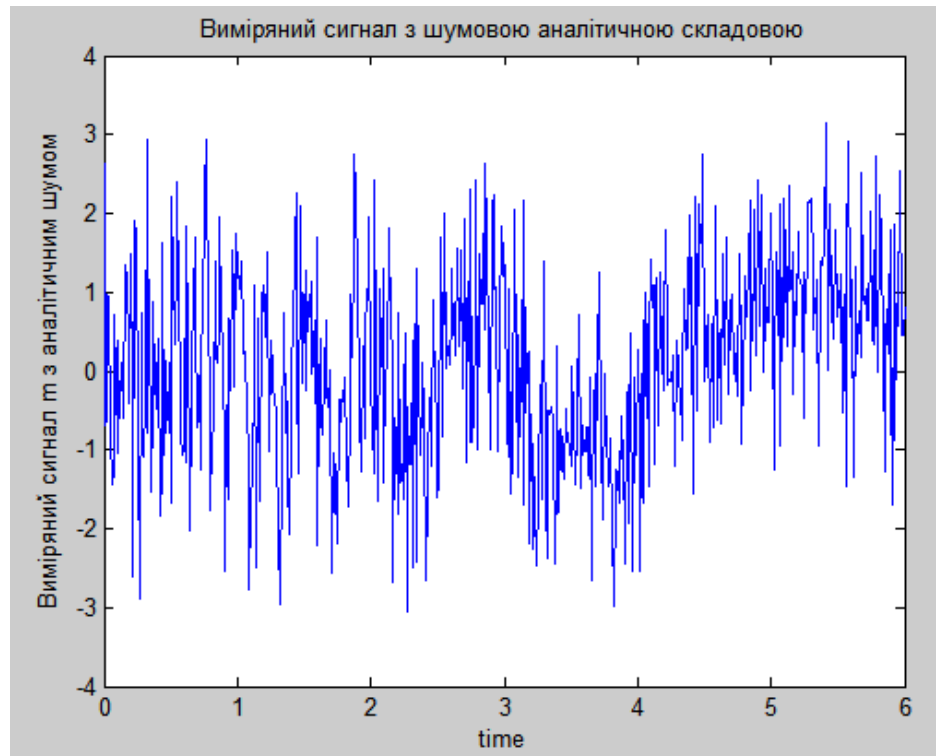


Рисунок Б.5 – Корисний сигнал з шумовою складовою на приймальному кінці каналу до обробки його нейро-нечіткою мережею

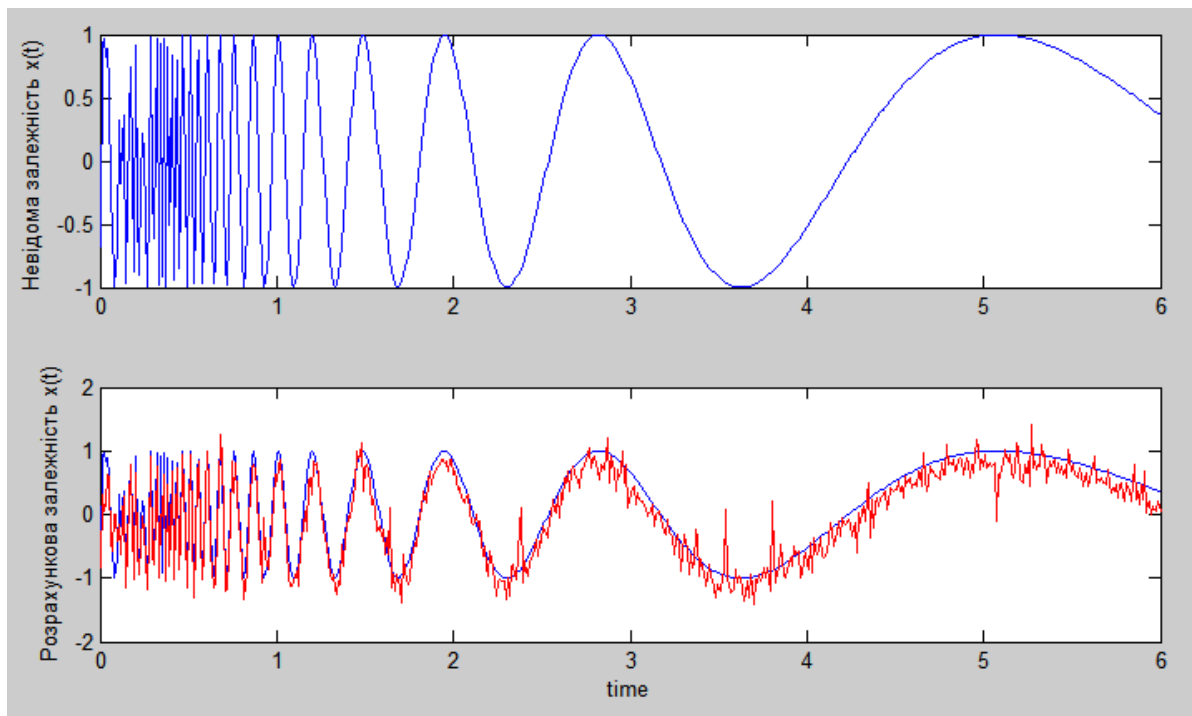


Рисунок Б.6 – Корисний сигнал з шумовою складовою на приймальному кінці каналу після обробки його нейро-нечіткою мережею

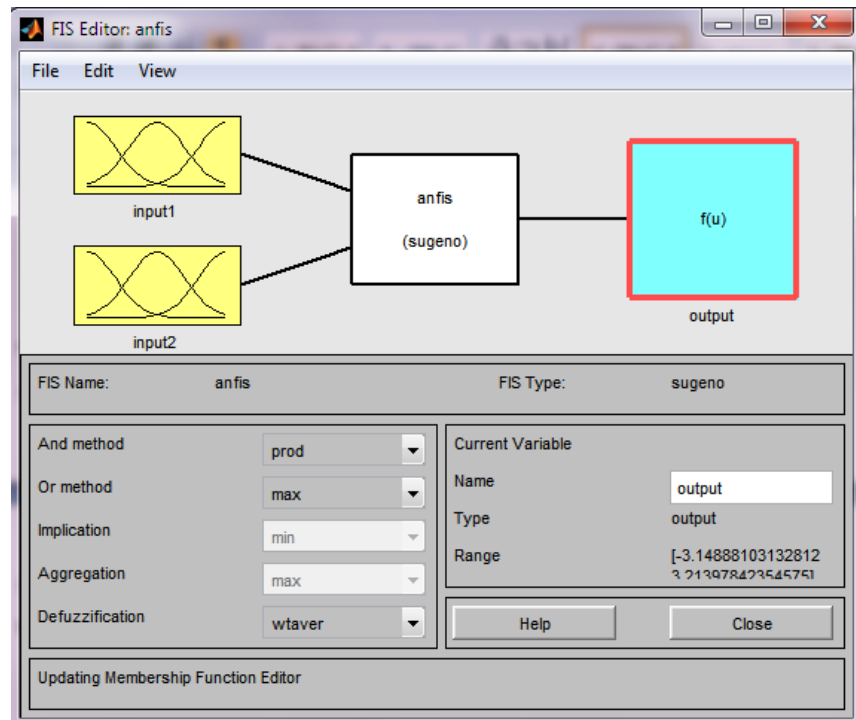


Рисунок Б.7 – Узагальнена структура отриманої у програмі системи нечіткого висновку типу Сугено з двома входами, одним виходом. Ця система під назвою ANFIS виконує фазифікацію функціями Гаусса.

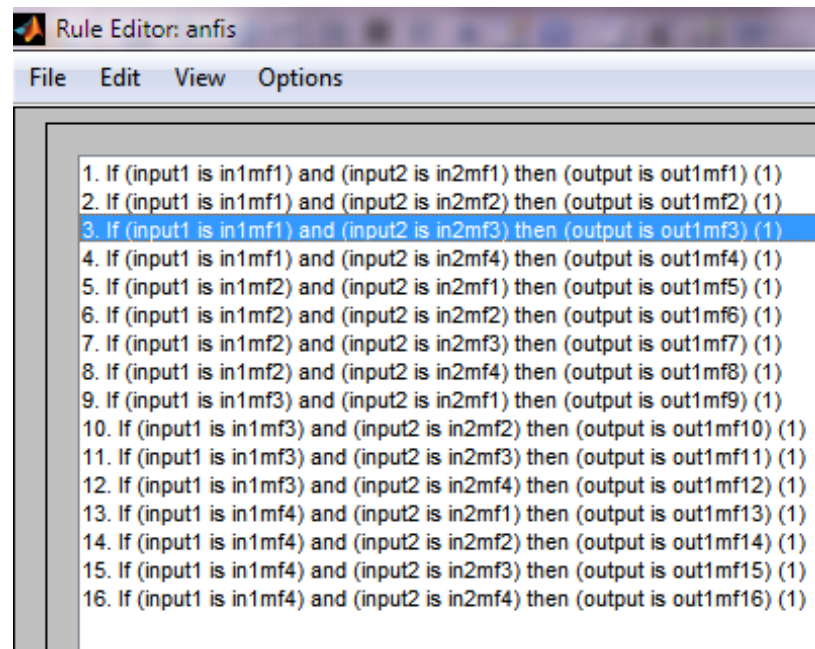


Рисунок Б.8 – Функції приналежності, використовувані мережею ANFIS (одиниця у дужках вказує на вагу функції приналежності), яка створена у програмі

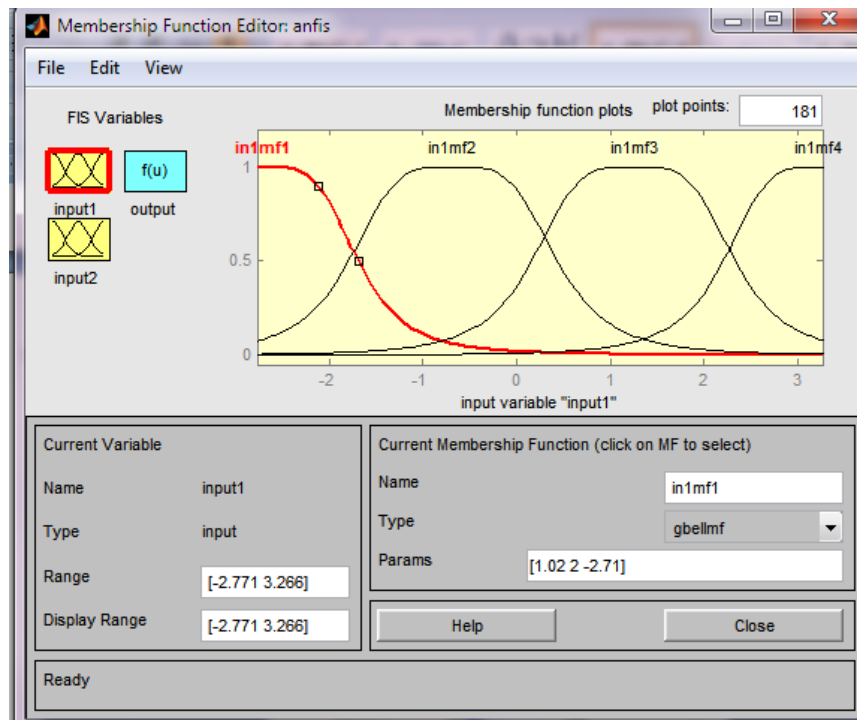


Рисунок Б.8 – Вікно редактора функцій приналежності: система автоматично визначила чотири апріорних функцій приналежності

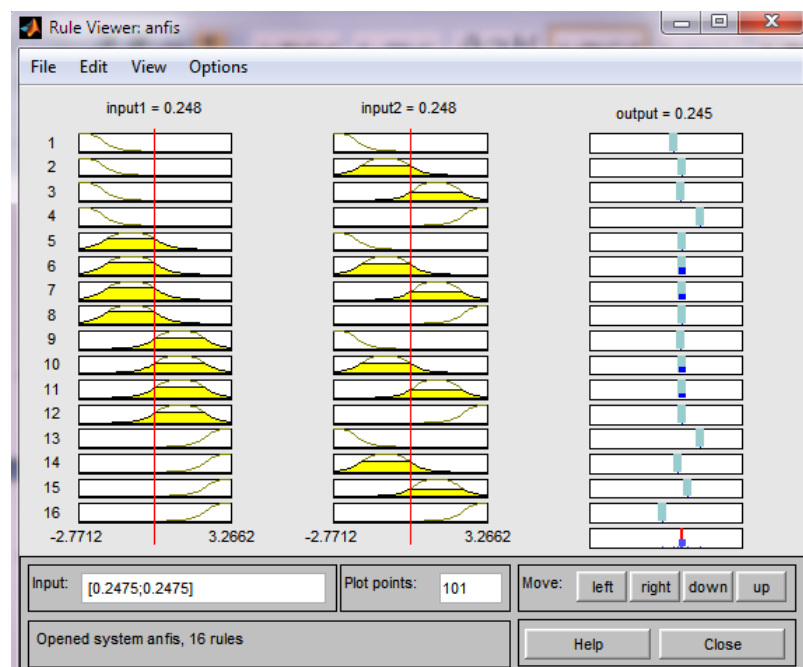


Рисунок Б.10 – Вікно переглядача правил (ruleview) для системи нечіткого висновку і діаграма нечіткого висновку.

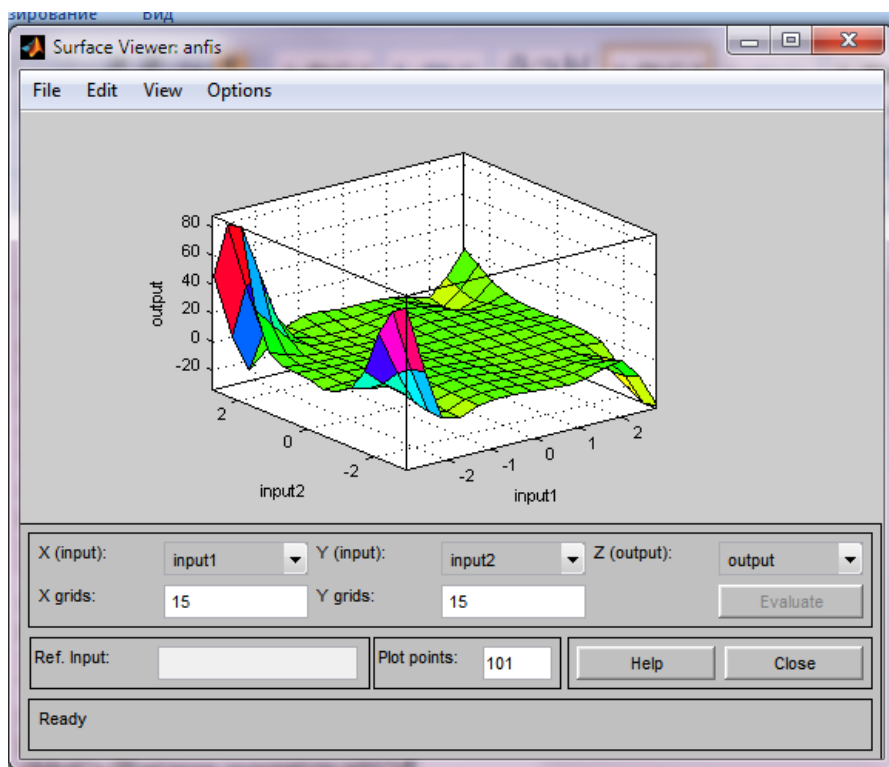


Рисунок Б.11 – Поверхня нечіткого виводу для структури FIS

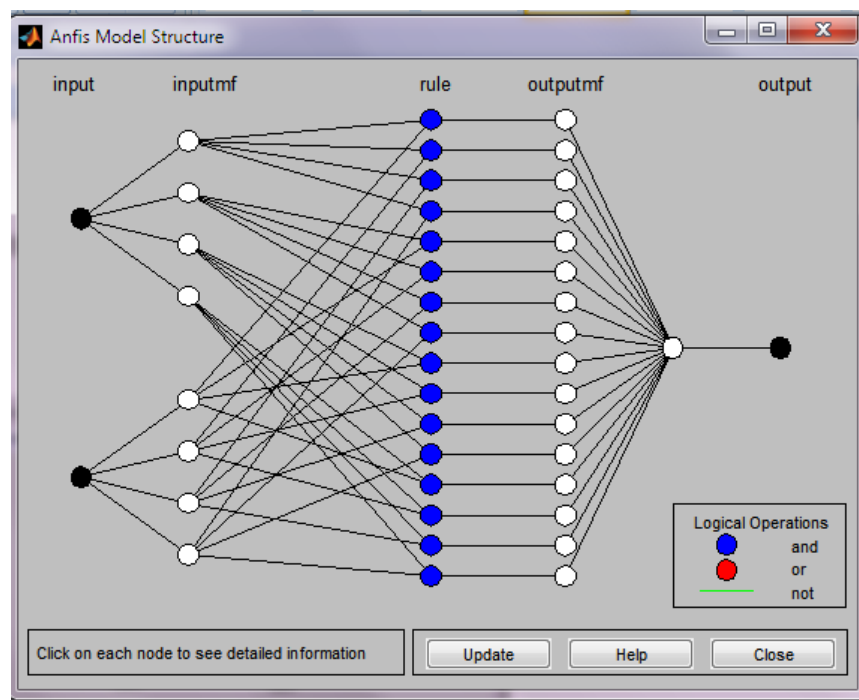


Рисунок Б.12 – Структура отриманої нейро-нечіткої мережі

ДОДАТОК В

Модель системи автоматичного керування та результати аналізу перехідного процесу

Нижче представлені рисунки В.1, В2, В3

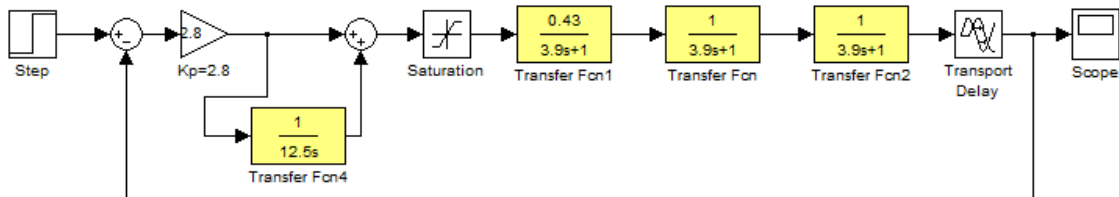


Рисунок В.1 – Модель системи з початковими параметрами

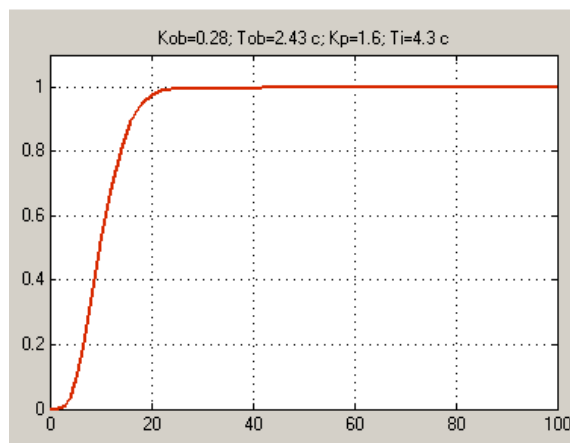


Рисунок В.2 – Результати аналізу перехідних процесів при параметрах об'єкта $K_{ob} = 0,28$; $T_{ob} = 2,43$ с та параметрах регулятора $K_p = 1,6$; $T_i = 4,3$ с

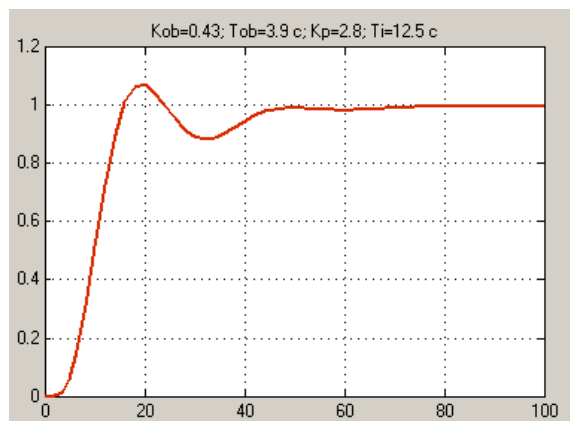


Рисунок В.3 – Результати аналізу перехідних процесів при параметрах об'єкта $K_{ob} = 0,43$; $T_{ob} = 3,9$ с та параметрах регулятора $K_p = 2,8$; $T_i = 12,5$ с

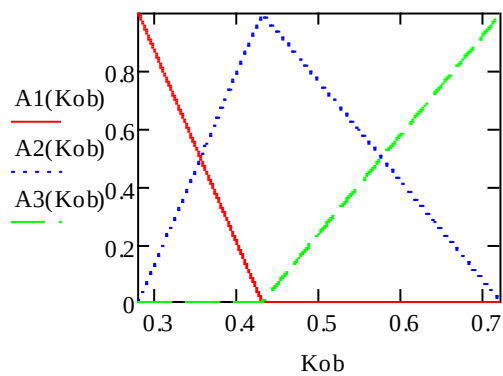
ДОДАТОК Г

Функції приналежності параметрів K_{ob} , T_{ob} у графічному вигляді

$$A1(K_{ob}) := \begin{cases} (-6.667K_{ob} + 2.867) & \text{if } K_{ob} \leq 0.43 \wedge K_{ob} \geq 0.28 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A2(K_{ob}) := \begin{cases} (6.667K_{ob} - 1.867) & \text{if } K_{ob} \leq 0.43 \wedge K_{ob} \geq 0.28 \\ -3.448K_{ob} + 2.483 & \text{otherwise} \end{cases}$$

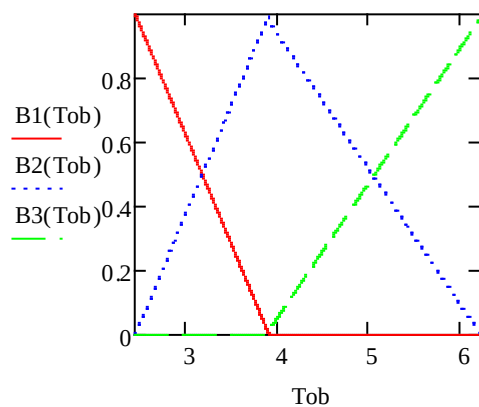
$$A3(K_{ob}) := \begin{cases} (3.448K_{ob} - 1.483) & \text{if } K_{ob} \leq 0.72 \wedge K_{ob} \geq 0.43 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



$$B1(T_{ob}) := \begin{cases} (-0.68T_{ob} + 2.653) & \text{if } T_{ob} \leq 3.9 \wedge T_{ob} \geq 2.43 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$B2(T_{ob}) := \begin{cases} (0.68T_{ob} - 1.653) & \text{if } T_{ob} \leq 3.9 \wedge T_{ob} \geq 2.43 \\ -0.419T_{ob} + 2.61 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$B3(T_{ob}) := \begin{cases} (0.419T_{ob} - 1.62) & \text{if } T_{ob} \leq 6.24 \wedge T_{ob} \geq 3.9 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



ДОДАТОК Д

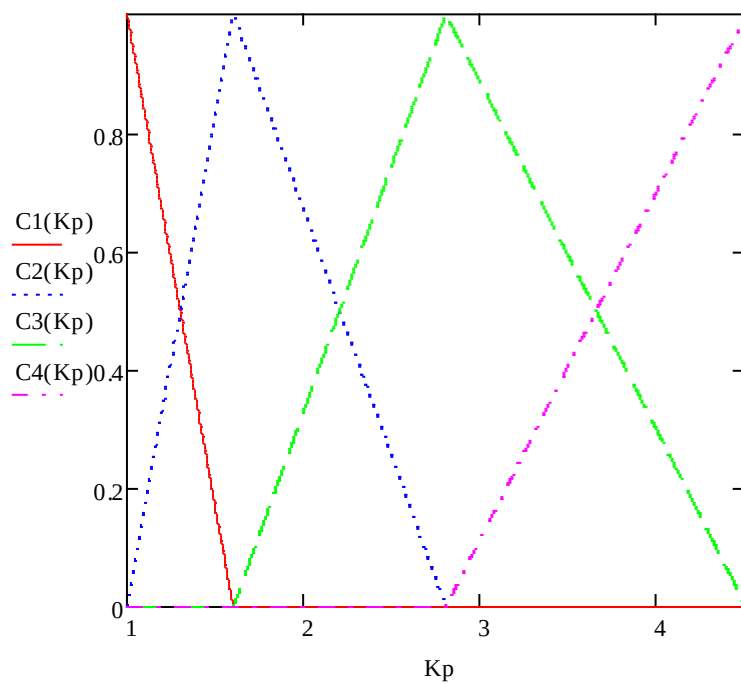
Функції приналежності параметрів K_p , T_p у графічному вигляді

$$C1(K_p) := \begin{cases} (-1.667K_p + 2.667) & \text{if } K_p \leq 1.6 \wedge K_p \geq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C2(K_p) := \begin{cases} (1.667K_p - 1.667) & \text{if } K_p \geq 1 \wedge K_p \leq 1.6 \\ (-0.833K_p + 2.333) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C3(K_p) := \begin{cases} (0.833K_p - 1.333) & \text{if } K_p \leq 2.8 \wedge K_p \geq 1.6 \\ 0 & \text{if } K_p < 1.6 \\ (-0.588K_p + 2.647) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C4(K_p) := \begin{cases} (0.588K_p - 1.647) & \text{if } K_p \leq 4.5 \wedge K_p \geq 2.8 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



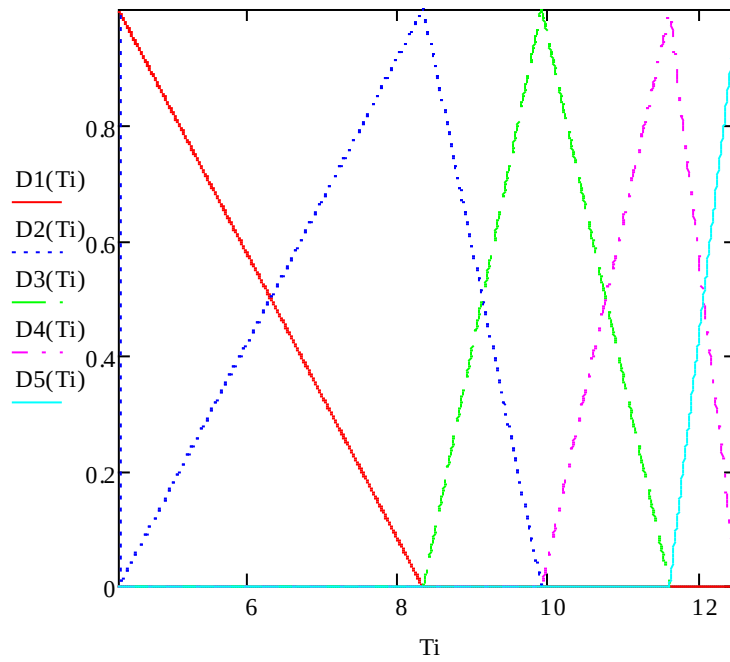
$$D1(Ti) := \begin{cases} (-0.248Ti + 2.064) & \text{if } Ti \leq 8.34 \wedge Ti \geq 4.3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D2(Ti) := \begin{cases} (0.248Ti - 1.064) & \text{if } Ti \geq 4.33 \wedge Ti \leq 8.34 \\ (-0.641Ti + 6.340) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D3(Ti) := \begin{cases} (0.641Ti - 5.340) & \text{if } Ti \leq 9.9 \wedge Ti \geq 8.34 \\ 0 & \text{if } Ti < 8.34 \\ (-0.588Ti + 6.824) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D4(Ti) := \begin{cases} (0.588Ti - 5.824) & \text{if } Ti \leq 11.6 \wedge Ti \geq 9.9 \\ 0 & \text{if } Ti < 9.9 \\ (-1.111Ti + 13.889) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D5(Ti) := \begin{cases} (1.111Ti - 12.889) & \text{if } Ti \leq 12.5 \wedge Ti \geq 11.6 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



ДОДАТОК Е

Програма розрахунку оптимальних параметрів PI-регулятора на основі апарату нечіткої логіки

```

% Параметри об'єкта керування
Kob=0.575;
Tob=3.165;
% Початкові значення параметрів PI регулятора
Kp=1;
Ti=4.3;
% Опис функцій приналежності змінної Kob
if (Kob<=0.43) & (Kob>=0.28)
    A1=-6.667*Kob+2.687;
end;
if (Kob>0.43)
    A1=0;
end;
if (Kob<=0.43) & (Kob>=0.28)
    A2=6.667*Kob-1.867;
end;
if (Kob<=0.72) & (Kob>0.43)
    A2=-3.448*Kob+2.483;
end;
if (Kob<0.28) & (Kob>0.72)
    A2=0;
end;
if (Kob>=0.43) & (Kob<=0.72)
    A3=3.448*Kob-1.483;
end;
if (Kob<0.43)
    A3=0;
end;
% Опис функцій приналежності змінної Tob
if (Tob<=3.9) & (Tob>=2.43)
    B1=-0.68*Tob+2.653;
end;
if (Tob>3.9)
    B1=0;
end;
if (Tob<=3.9) & (Tob>=2.43)

```

```

    B2=0.68*Tob-1.653;
end;
if (Tob<=6.24) & (Tob>3.9)
    B2=-0.412*Tob+2.568;
end;
if (Tob<2.43) & (Tob>6.24)
    B2=0;
end;
if (Tob>=3.9) & (Tob<=6.24)
    B3=0.412*Tob-1.605;
end;
if (Tob<3.9)
    B3=0;
end;
% Визначення рівнів відсікання
alpha1=min(A1,B1);
alpha2= min (A1,B3);
alpha3= min (A3,B1);
alpha4= min (A3,B3);
alpha5= min (A2,B2);
alpha6= min (A2,B1);
alpha7= min (A2,B3);
alpha8= min (A1,B2);
alpha9= min (A3,B2);
% Початкові значення чисельника і знаменника
znamenatelKp=0.00001;
chislitelKp=0;
% Організація циклу для розрахунку Kp
for i=1:100
    if (Kp>=1) & (Kp<=1.6)
        C1=-1.667*Kp+2.667;
    end;
    if (Kp>1.6)
        C1=0;
    end;
    if (Kp>=1) & (Kp<=1.6)
        C2=1.667*Kp-1.667;
    end;
    if (Kp>=1.6) & (Kp<=2.8)
        C2=-0.833*Kp+2.333;
    end;
    if (Kp<1)
        C2=0;
    end;
    if (Kp>2.8)
        C2=0;
    end;
end;

```

```

end;
if(Kp>=1.6) & (Kp<=2.8)
    c3=0.833*Kp - 1.333;
end;
if (Kp>=2.8) & (Kp<=4.5)
    c3 = -0.588*Kp+2.647;
end;
if (Kp<1.6)
    c3=0;
end;
if (Kp>4.5)
    c3=0;
end;
if (Kp>=2.8) & (Kp<=4.5)
    C4=0.588*Kp-1.647;
end;
if (Kp<2.8)
    C4=0;
end;
C1shtrih=min(alpha1,C2);
C2shtrih= min(alpha2,c3);
c3shtrih= min(alpha3,C2);
C4shtrih= min(alpha4,C1);
C5shtrih= min(alpha5,c3);
C6shtrih= min(alpha6,c3);
C7shtrih= min(alpha7,C2);
C8shtrih= min(alpha8,C4);
C9shtrih= min(alpha9,C2);
comp1=max(C1shtrih,C2shtrih);
comp2=max(c3shtrih,C4shtrih);
comp3= max(C5shtrih,C6shtrih);
comp4= max(C7shtrih,C8shtrih);
comp5= max (comp1,comp2);
comp6= max(comp3,comp4);
comp7= max(comp5,comp6);
compositionKp= max(comp7,C9shtrih);
arrKp(i)=compositionKp;
znamenatelKp=znamenatelKp+compositionKp;
chislitelKp=chislitelKp+compositionKp*Kp;
resultKp=chislitelKp/znamenatelKp;
Kp=Kp+0.01;
end;
znamenatelTi=0.00001;
chislitelTi=0;
for i=1:82
    if(Ti>=4.3) & (Ti<=8.34)

```

```

    D1=-0.248*Ti+2.064;
end;
if(Ti>8.34)
    D1=0;
end;
if(Ti>=4.3) & (Ti<=8.34)
    D2=0.248*Ti-1.064;
end;
if(Ti>8.34) & (Ti<=9.9)
    D2=-0.641*Ti+6.346;
end;
if(Ti<4.3)
    D2=0;
end;
if(Ti>9.9)
    D2=0;
end;
if(Ti>=8.34) & (Ti<=9.9)
    D3=0.641*Ti-5.346;
end;
if(Ti>9.9) & (Ti<=11.6)
    D3=-0.588*Ti+6.824;
end;
if(Ti<8.34)
    D3=0;
end;
if (Ti>11.6)
    D3=0;
end;
if(Ti>=9.9) & (Ti<=11.6)
    D4=0.588*Ti-5.824;
end;
if(Ti>11.6) & (Ti<=12.5)
    D4=-1.111*Ti+13.889;
end;
if(Ti<9.9)
    D4=0;
end;
if(Ti>12.5)
    D4=0;
end;
if(Ti>=11.6) & (Ti<=12.5)
    D5=1.111*Ti-12.889;
end;
if(Ti<11.6)
    D5=0;

```

```

end;
D1shtrih=min(alpha1,D1);
D2shtrih= min(alpha2,D2);
D3shtrih= min(alpha3,D3);
D4shtrih= min(alpha4,D2);
D5shtrih= min(alpha5,D5);
D6shtrih= min(alpha6,D3);
D7shtrih= min(alpha7,D2);
D8shtrih= min(alpha8,D5);
D9shtrih= min(alpha9,D4);
comp8=max(D1shtrih,D2shtrih);
comp9= max(D3shtrih,D4shtrih);
comp10= max(D5shtrih,D6shtrih);
comp11= max(D7shtrih,D8shtrih);
comp12= max(comp8,comp9);
comp13= max(comp10,comp11);
comp14= max(comp12,comp13);
compositionTi= max(comp14,D9shtrih);
arrTi(i)=compositionTi;
znamenatelTi=znamenatelTi+compositionTi;
chislitelTi=chislitelTi+compositionTi*Ti;
resultTi=chislitelTi/znamenatelTi;
Ti=Ti+0.1;
end;

```

Результати роботи програми:

```
resultTi
```

```
resultTi =
```

```
10.5819
```

```
>> resultKp
```

```
resultKp =
```

```
1.5680
```