ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни

«Інтелектуальні системи управління»

(для здобувачів вищої освіти спеціальності
151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
усіх форм навчання другого (магістерського)
рівня вищої освіти)

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 1 від «8» вересня 2023 р.)
Обов'язково до розміщення в репозиторії

Запоріжжя 2023

metinvest polytechnic

Інтелектуальні системи управління: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Інтелектуальні системи управління» (для здобувачів вищої освіти спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» усіх форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти). / Уклад. О.В. Разживін. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023. 231 с.

Лабораторні роботи присвячено роботі інтелектуальний систем управління в реальному часі з метою вироблення керуючих рішень у темпі надходження нової інформації, тому обчислювальні ресурси традиційних комп'ютерів швидко виявляються вичерпаними, якщо реалізується досить складна штучних нейронних мереж. Така ситуація характерна для систем аналізу та стиснення зображень, при управлінні технологічними процесами та рухомими об'єктами. У зв'язку з цим велике практичне значення набувають питання використання спеціалізованих обчислювальних засобів, що допускають паралельну обробку інформації.

Рекомендовано для здобувачів вищої освіти спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» усіх форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти).

Самостійне електронне текстове мережеве видання

Затверджено на засіданні кафедри
автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Протокол № 3 від «11» липня 2023 р.

Узгоджено:
Секретар Редакційної ради


Малій Х. В.
«12» липня 2023 р.

ЗМІСТ

	Стор.
1 СТВОРЕННЯ І НАВЧАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ДОПОМОГИ ГРАФІЧНОГО ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА GUI	4
2 СТВОРЕННЯ, АДАПТАЦІЯ І НАВЧАННЯ ЛІНІЙНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ У КОМАНДНОМУ ВІКНІ MATLAB	19
3 РОЗРОБКА РАДІАЛЬНОЇ БАЗИСНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ АПРОКСИМАЦІЇ ФУНКЦІЙ	28
4 РОЗРОБКА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ	41
5 РОЗРОБКА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНОГО ФІЛЬТРУ	47
6 КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	52
7 РОБОТА З НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ В MATLAB	75
8 АПРОКСИМАЦІЯ ЗАЛЕЖНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ	92
9 СИНТЕЗ НЕЛІНІЙНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА П-ТИПУ	102
10 СИНТЕЗ НЕЛІНІЙНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПД-ТИПУ	120
11 СИНТЕЗ НЕЛІНІЙНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПІ-ТИПУ	135
12 СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПІ-ТИПУ У КОВЗАЮЧОМУ РЕЖИМІ	146
13 СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПІД-ТИПУ	158
14 СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО СУПЕРВІЗОРА	171
15 СУПЕРВІЗОРНЕ УПРАВЛІННЯ З ІНКРЕМЕНТАЛЬНОЮ ЗМІНОЮ КОЕФІЦІЄНТІВ РЕГУЛЯТОРА	184
16 СУПЕРВІЗОРНЕ УПРАВЛІННЯ З КОРЕКЦІЄЮ КОЕФІЦІЄНТІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НА ПІДСТАВІ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ПОМИЛКУ ТА ЇЇ ПОХІДНУ	200
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ	215
ДОДАТОК А. Налаштування коефіцієнтів передаточної функції ПІД-регулятора	216
ДОДАТОК Б. Демонстраційні приклади ППП NNT	222
ДОДАТОК В. Функції пакета «Neural Network Toolbox» системи MATLAB для роботи з нейронними мережами	223

1 СТВОРЕННЯ І НАВЧАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ДОПОМОГЮ ГРАФІЧНОГО ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА GUI

Мета роботи: освоїти методику розробки та навчання нейронної мережі із застосуванням графічного інтерфейсу користувача (GUI) системи MATLAB.

1.1 GUI- інтерфейс для пакету прикладних програм nnt

Графічний інтерфейс користувача (**Graphical User Interface**) дозволяє, не звертаючись до командного вікна системи MATLAB, виконати створення, навчання та моделювання, а також експорт та імпорт нейронних мереж.

Виклик GUI-інтерфейсу пакета прикладних програм **Neural Network Toolbox** можливий чи командою **nntool** з командного рядка або з вікна запуску додатків **Launch Pad** за допомогою опції **NNTool**. Після виклику з'являється вікно (див. рис. 1.1) **Network/Data Manager** (Управління мережею/даними).

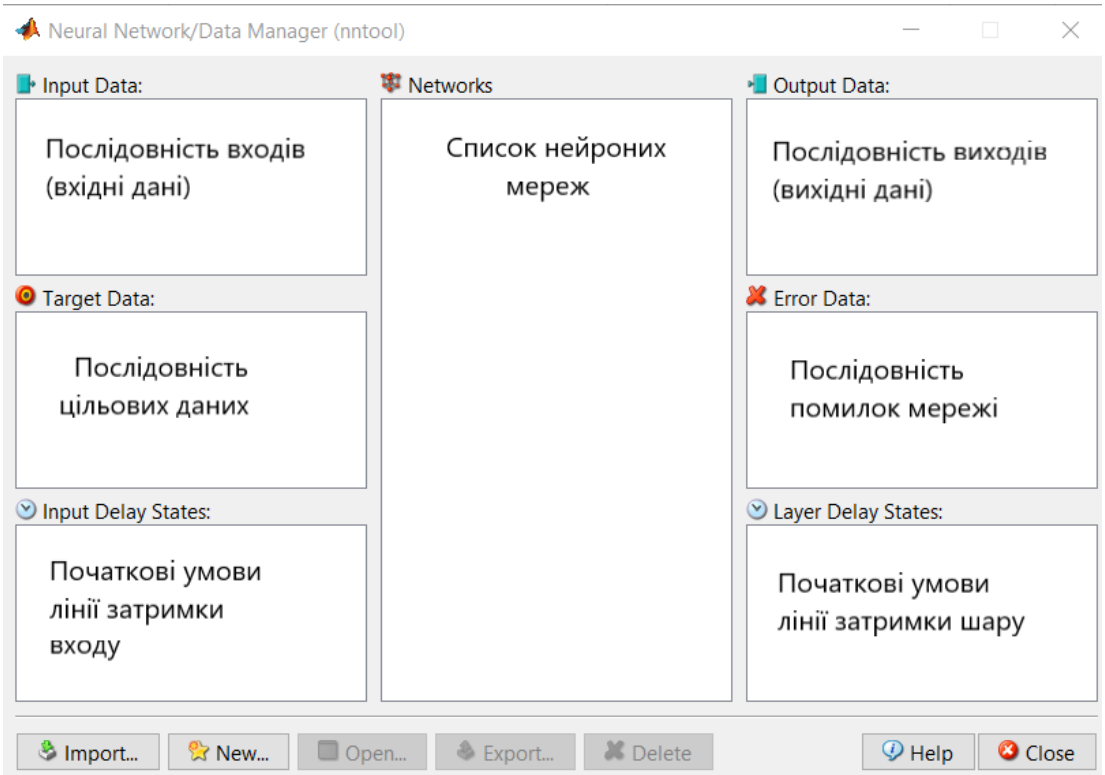


Рисунок 1.1 – Вікно керування мережею та даними

Щоб створити нейронну мережу, потрібно виконати такі операції:

– кнопкою **Import** викликати вікно форматування даних **Import from Network/Data Manager** (рис. 1.2) та сформувати послідовність входів (Input Data) та цілей (Target Data);

– зачинити вікно кнопкою **Close**

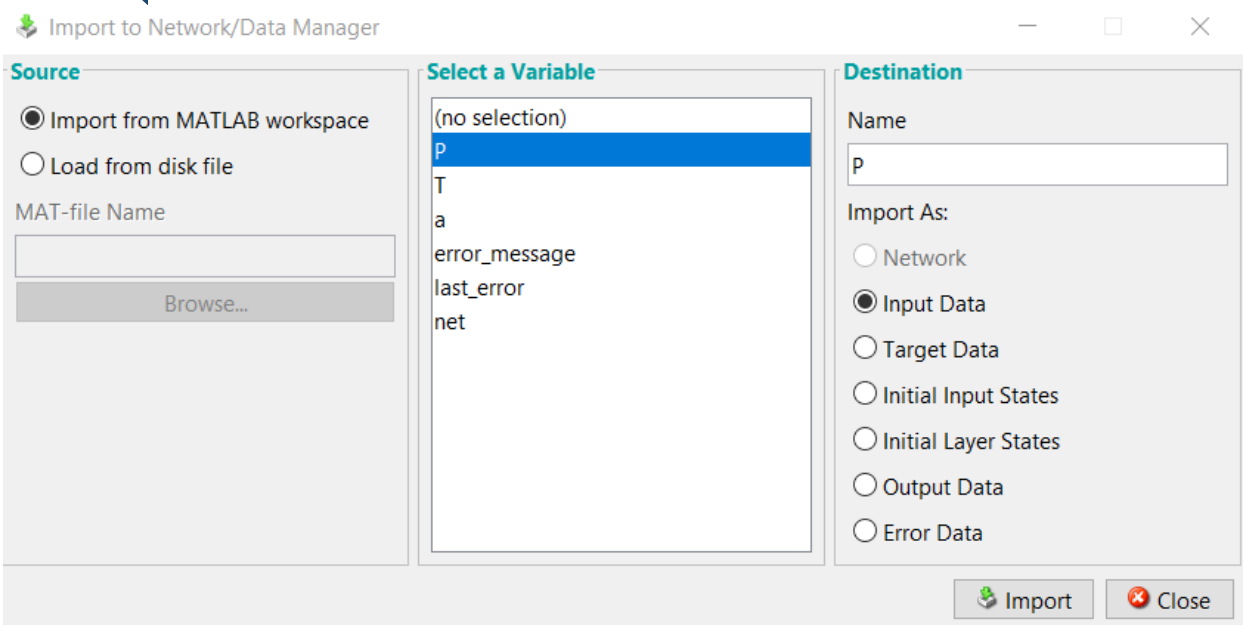


Рисунок 1.2 – Вікно вводу даних

В вікні вводу даних **Import from Network/Data Manager** можна вказати один із шести типів даних:

– **Inputs Data** (входи) – послідовність значень входів;

– **Targets Data** (цілі) – послідовність значень цілей;

– **Initial Input States** (початкові стани входів) – початкові умови лінії затримки на вході;

– **Initial Layer States** (початкові стани шару) – початкові умови лінії затримки у шарі;

– **Outputs Data** (виходи) – послідовність значень виходу мережі;

– **Errors Data** (помилка) - різниця значень цілей та виходів.

Зазвичай користувач задає лише послідовності входу та мети.

– в вікні **Creating Network or Data (**рис. 1.3), яке викликається кнопкою **New Network,** з вікна **Network/Data Manager** (рис 1.1) створити нову мережу;

– Вікно **Create New Network**, показане рисунку 1.3, включає поля для завдання параметрів створюваної мережі. Кількість та назви полів змінюються залежно від типу мережі.

– Поле **Network Type** призначений для вибору типу мережі. Типи мереж, доступних до роботи з інтерфейсом NNTool, наведено у таблиці 1.1.

Слід врахувати, що цей інтерфейс дозволяє створювати нейронні мережі лише з одним або двома шарами, кількість шарів **Layer** задається у полі **Number of Layer** . Параметри, що навчаються, є ваговими матрицями входу. **IW** (Input Weight) та виходa **LW** (Layer Weight), а також зміщення **b**. Мережі з двома шарами зазвичай мають послідовну структуру, коли вихід першого шару є входом другого шару.

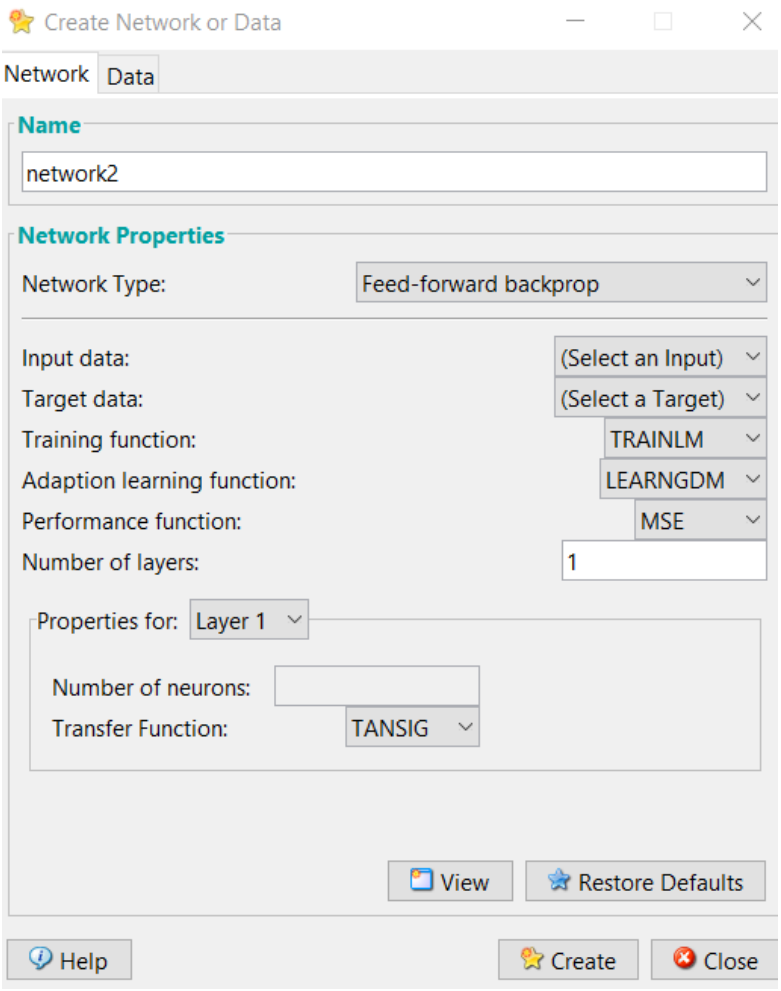


Рисунок 1.3 – Вікно створення мережі ***Creating Network or Data***

Таблиця 1.1 – Список типів мереж, доступних до роботи з інтерфейсом NNTool

№ п/п	Тип мережі	Назва мережі	Кількість шарів	Параметр навчання
1	Competitive	Конкуруюча мережа	1	IW[1,1], b[1]
2	Cascade forward backprop	Каскадна мережа	2	Перегляд не забезпечується
3	Elman backprop	Мережа Елмана	2	Перегляд не забезпечується
4	Feed-forward backprop	Мережа з прямим розповсюдженням сигналу	2	IW[1,1], b[1] LW[2,1], b[2]
5	Time delay backprop	Мережа з запізненням	2	IW[1,1], b[1] LW[2,1], b[2]
6	Generalized regression	Узагальнена регресійна мережа	2	IW[1,1], b[1] LW[2,1]

Продовження табл 1.1

№ п/п	Тип мережі	Назва мережі	Кількість шарів	Параметр навчання
7	Hopfield	Мережа Хопфілда	1	Перегляд не забезпечується
8	Linear layer (design)	Лінійний шар (створення)	1	IW[1,1], b[1]
9	Linear layer (train)	Лінійний шар (навчання)	1	IW[1,1], b[1]
10	LVQ	Мережа класифікації векторів	2	IW[1,1], LW[2,1]
11	Perceptron	Персептрон	1	IW[1,1], b[1]
12	Probabalistic	Ймовірнісна мережа	2	IW[1,1], b[1] LW[2,1]
13	Radial basis (exact fit)	Радіальна базова мережа з нульовою помилкою	2	IW[1,1], b[1] LW[2,1]
14	Radial basis (fewer neurons)	Радіальна базова мережа з мінімальним числом нейронів	2	IW[1,1], b[1] LW[2,1], b[2]
15	Self-organizing map	Самоорганізована карта Кохонена	1	IW[1,1]

Поле **Input Data** (діапазони входу) дозволяє задати допустимі межі входів (масиви вхідних даних).

Поле **Targets Data** (діапазони цілей) дозволяє задати допустимі межі цілій навчання (масиви даних цілей).

Поле **Training function** (функція навчання) дозволяє задати алгоритм навчання мережі.

Adaption learning function – виводить список функцій налаштувань режиму адаптації;

Performance function – виводить список функцій оцінки якості навчання;

Number of layers – завдання кількості шарів нейронної мережі;

Інші поля призначені для завдання наступних функцій:

Properties for – служить для завдання властивостей шару;

Number of neurons – задає кількість нейронів у шарі;

Transfer function – задає функцію активації шару.

Кнопкою **View** можливо викликати структуру мережи (рис. 1.4).

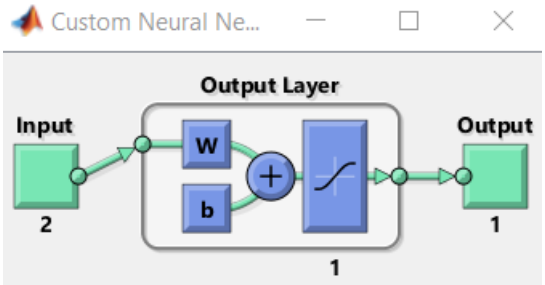


Рисунок 1.4 – Структура нейронної мережі

В вікні **Creating Network or Data** натисканням кнопки **Create** виконується ініціалізація мережі.

Надалі у діалоговому вікні **Network/Data Manager** подвійним кліком мишки по назві нейронної мережі викликається діалогова панель **Network: network1** (див. рис. 1.5).

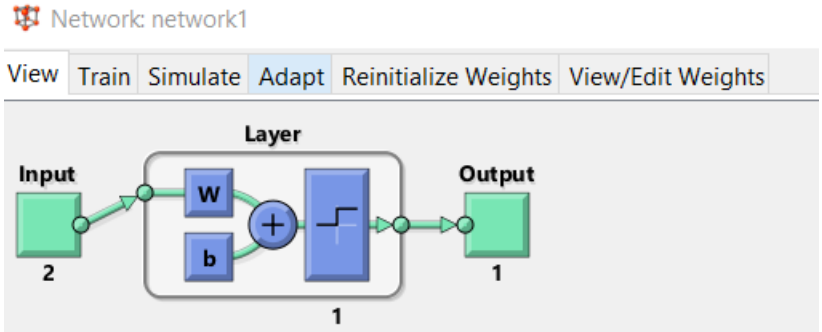


*Рисунок 1.5 - Діалогова панель **Network: network1***

В полі **Reinitialize Weights** діалогової панелі **Network: network1** необхідно встановити діапазони входів мережі (наприклад для двох входів мережі [-3 2; -3 2]), потім натиснути кнопку **Set Input Ranges**. Далі, натиснувши кнопку **Initialize Weights**, необхідно так само встановити ваги входів **p1** та **p2**.

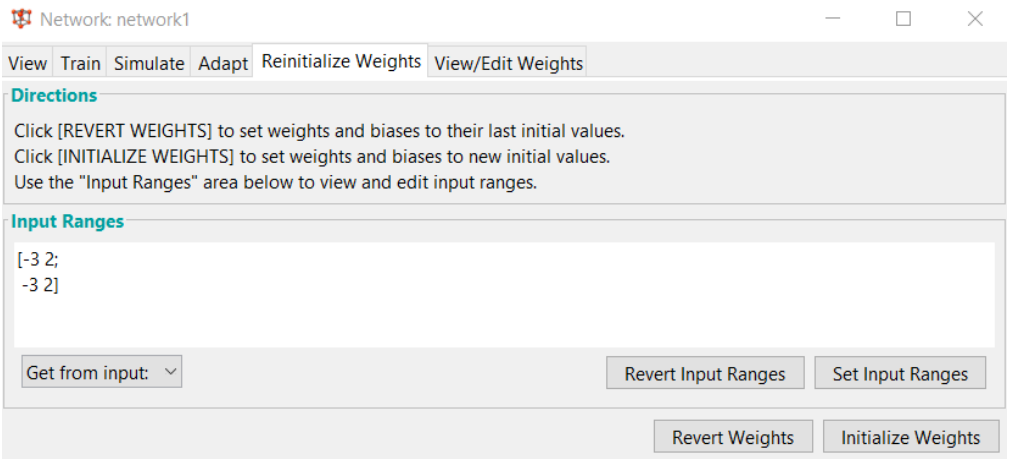


Рисунок 1.6 – Вікно ініціалізації мережі network1

Виконаємо адаптацію та навчання мережі, викликаючи вікна діалогу кнопками **Adapt** (див. рис. 1.7) або **Train** (див. рис. 1.8). У вікнах вказуються імена входу та цілі, а при виборі команди **Adaptation Parameters** в полі **epochs** задається кількість циклів адаптації.

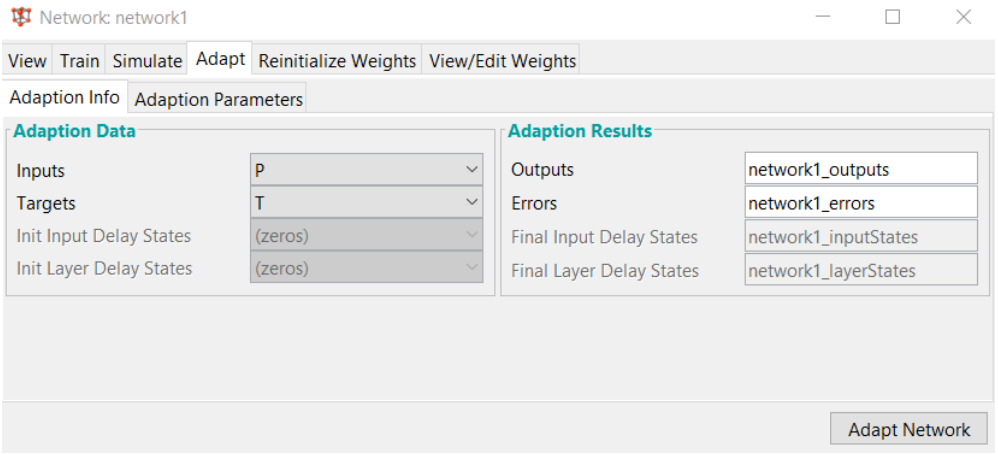


Рисунок 1.7 – Вікно налаштування параметрів адаптації мережі

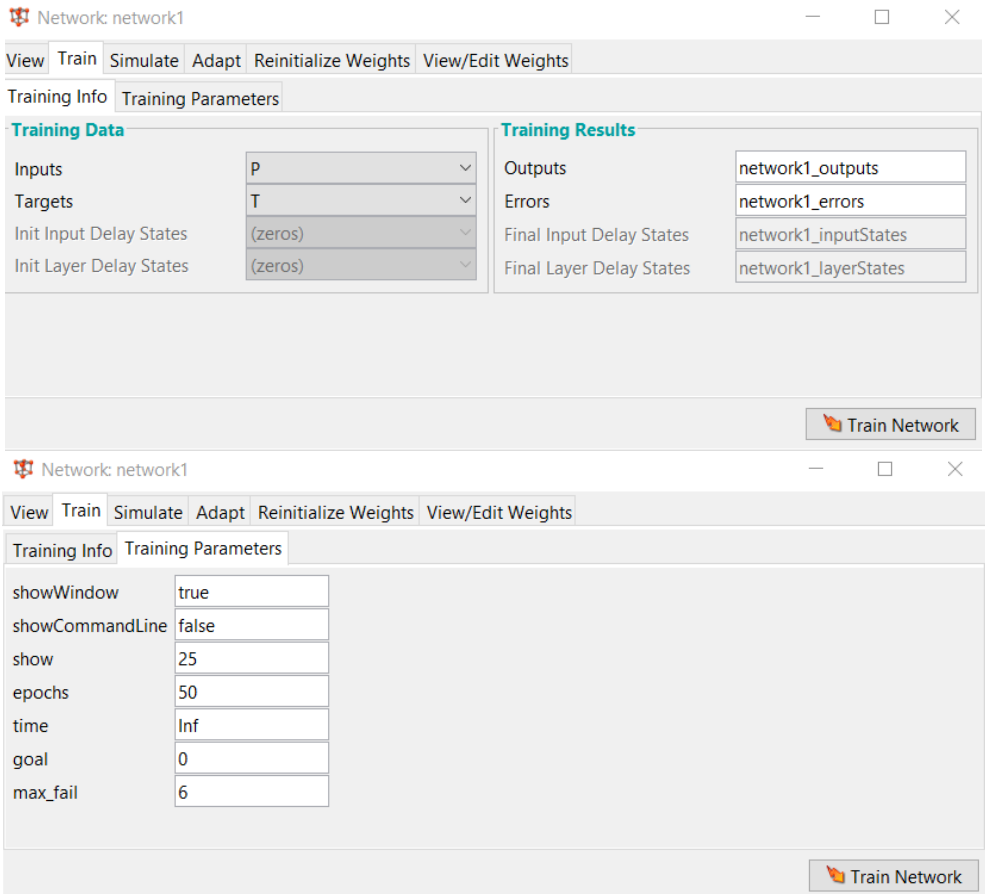


Рисунок 1.8 – Вікно завдання параметрів навчання мережі

Результати навчання можна побачити, обравши команду **View/Edit Weights** , по якій відкривається вікно з полем **Select the**

weight or bias to view для вибору ваги входів, що встановилися **IW** та зміщення **b** (див. рис. 1.9).

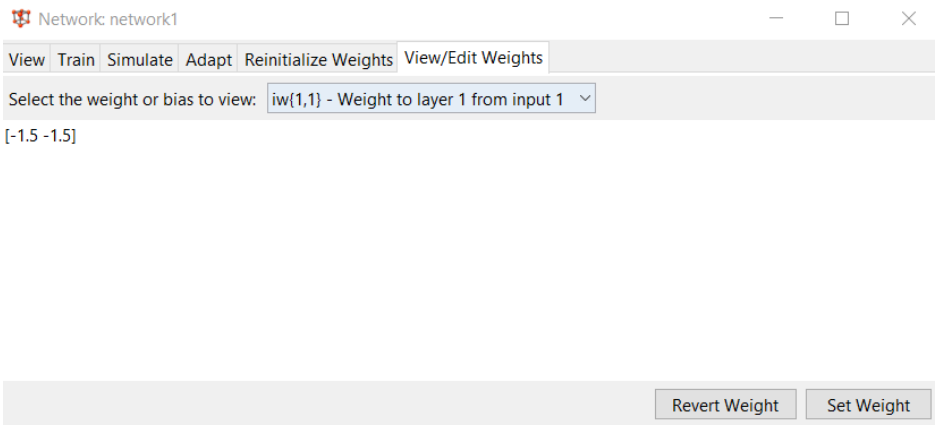


Рисунок 1.9 – Результат навчання мережи IW{1,1}=[-1.5 -1.5]

Раскрыв закладку **Select the weight or bias to view**, можно увидеть значение смещения: **b=[1]**.

Таким чином, лінія перемикання, що розділяє класи об'єктів у площині (p1; p2), записується так:

$$L: -1.5p_1 - 1.5p_2 + 1 = 0.$$

Перейшовши у вікно **Network/Data Manager,** можна переглянути значення сигналів на виході та помилку мережі. Для цього в полі **Outputs Data:** виділимо сигнал на виході мережі *network1_outputs* та виберемо команду **View** (подвійний клік мишки), по якій відкриється вікно **Data: network1_outputs** (див. рис. 1.10). Аналогічну процедуру виконаємо і для виведення помилки *network1_errors*.

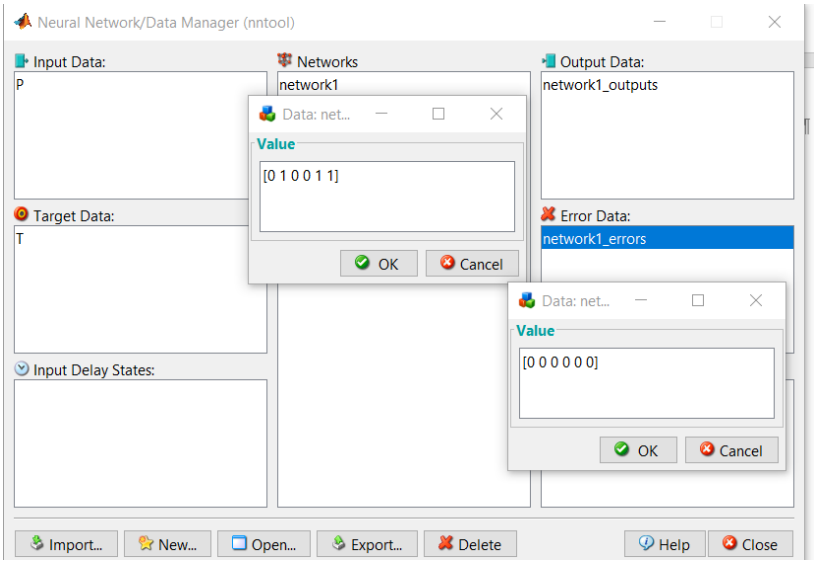


Рисунок 1.10 – Вікно для перегляду вихідних сигналів мережі

Кнопками **Import, Export** вікна управління мережею **Network/Data Manager** можна відкрити вікна **Import or Load to Network/Data Manager** или **Export or Save from Network/Data Manager**. Ці вікна дозволяють завантажити дані з робочої області MATLAB до робочої області GUI-інтерфейсу, або, навпаки, передати дані до робочої області MATLAB.

1.2 Методика виконання роботи

Нехай, наприклад, необхідно створити нейронну мережу у вигляді персептрона, для поділу векторів входу на два класи, позначених як 0 та 1.

Процес створення мережі включатиме наступні операції.

1. Задаємо навчальну послідовність у вигляді двох масивів осередків: масиву входів P={[2; 2] [1; 2] [-2; 2] [-1; 1] [1; -2]} та масиву цілей T={0 0 1 1 1}. Масив цілей визначає приналежність кожного вектору входу до певного класу. Виконаємо цю операцію у робочій області системи MATLAB.

```
>> nntool
>> P={[2;2] [1;2] [-2;2] [-1;1] [1;-2]}
P =
 Columns 1 through 4
 [2x1 double]  [2x1 double]  [2x1 double]  [2x1 double]
  Column 5
    [2x1 double]
>> T={0 0 1 1 1}
T =
    [0]    [0]    [1]    [1]    [1]
```

2. Командою **nntool** викликаємо вікно (див. рис. 1.11) **Network/Data Manager** (Управління мережею/даними).

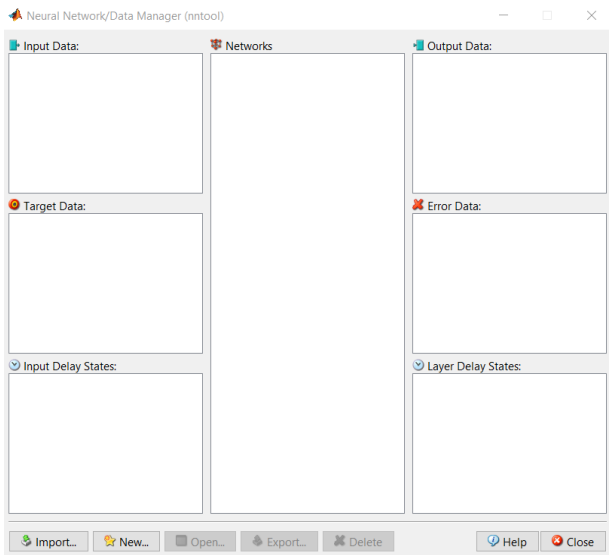


Рисунок 1.11 – Вікно керування мережею та даними

Кнопкою **Import** викликаємо вікно форматування даних **Import from Network/Data Manager** (див. рис. 1.12) в якому завантажуємо послідовність входів ***P*** (Input Data) та цілей ***T*** (Target Data);

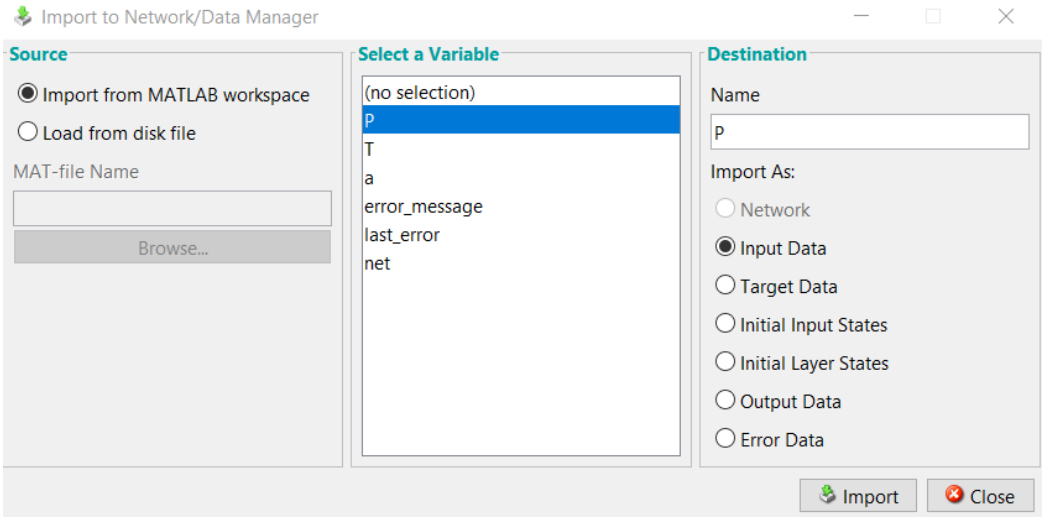


Рисунок 1.12 – Вікно вводу даних

В вікні **Creating Network or Data (**див. рис. 1.13), яке викликається кнопкою **New Network,** з вікна **Network/Data Manager** (див. рис. 1.11) строюємо нову мережу;

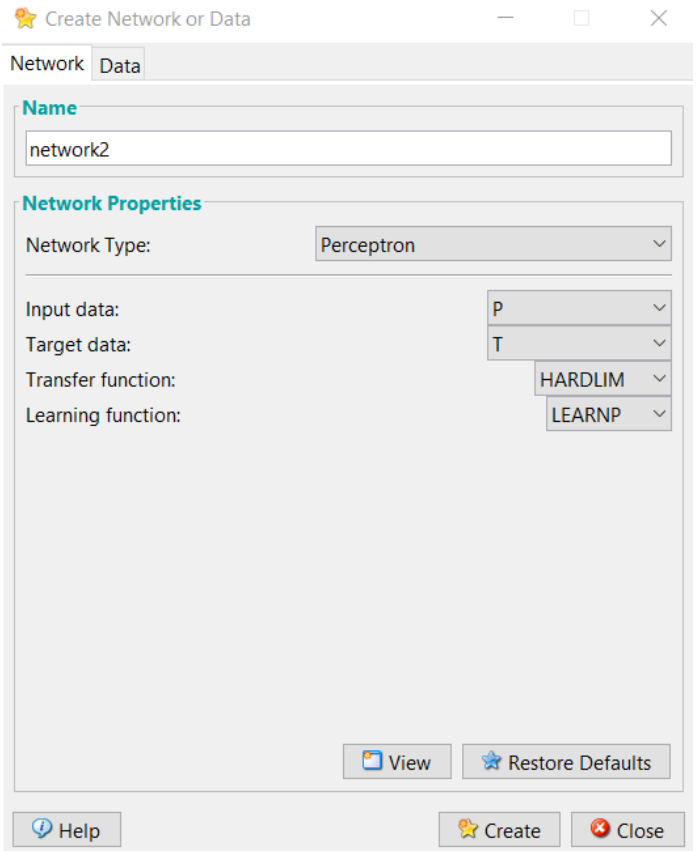


Рисунок 1.13 – Вікно створення мережі ***Creating Network or Data***

Задаємо персептрон з одним нейроном на два входи з діапазоном [-2;2], застосовуємо функцію активації HARDLIM та правило налаштування LEARNP. Натисканням кнопки **Create** виконується ініціалізація мережі.

Надалі у діалоговому вікні **Network/Data Manager** подвійним кликом мишки по назві нейронної мережі викликаємо діалогову панель **Network: network1** (див. рис. 1.14).

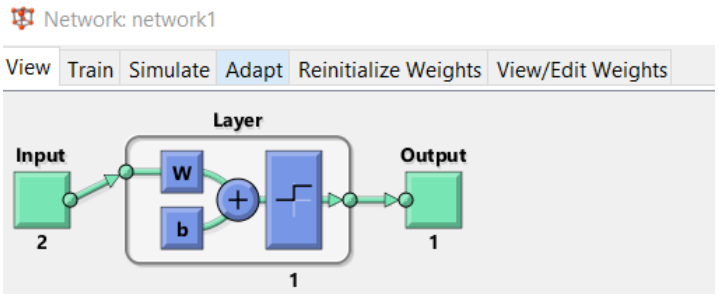


*Рисунок 1.14 - Діалогова панель **Network: network1***

В полі **Reinitialize Weights** (див. рис 1.15) діалогової панелі **Network: network1** встановлюємо діапазони входів мережі (наприклад для двох входів мережі [-2 2; -2 2]), потім натиснути кнопку **Set Input Ranges**. Далі, натиснувши кнопку **Initialize Weights**, необхідно так само встановити ваги входів **p1** та **p2**.

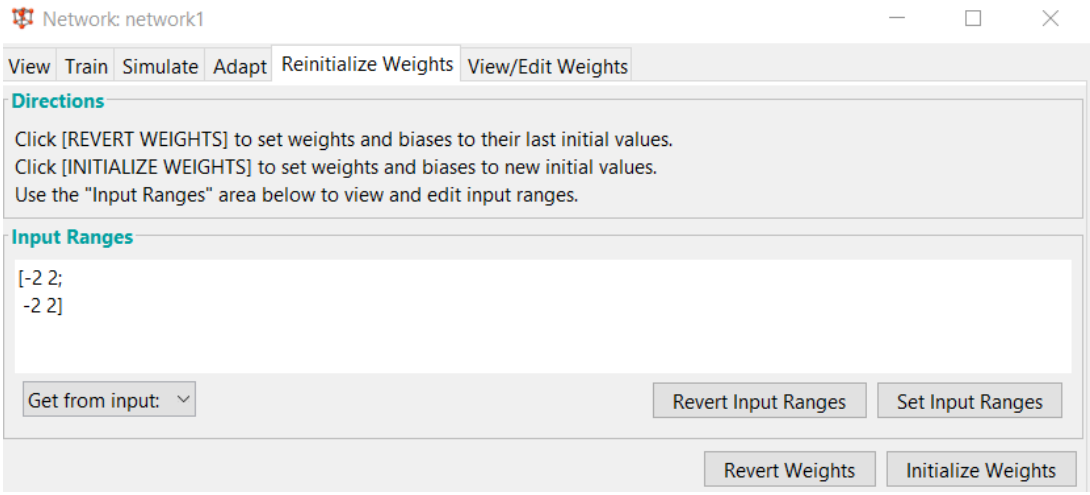


Рисунок 1.15 – Вікно ініціалізації мережі network1

Виконаємо адаптацію та навчання мережі, викликаючи вікна діалогу кнопками **Adapt** (див. рис. 1.16) або **Train** (див. рис. 1.17). У вікнах вказуються імена входу та цілі, а при виборі команди **Adaptation Parameters** в полі **epochs** задається кількість циклів адаптації. Для виконання даного завдання достатньо 5…7 епох навчання.

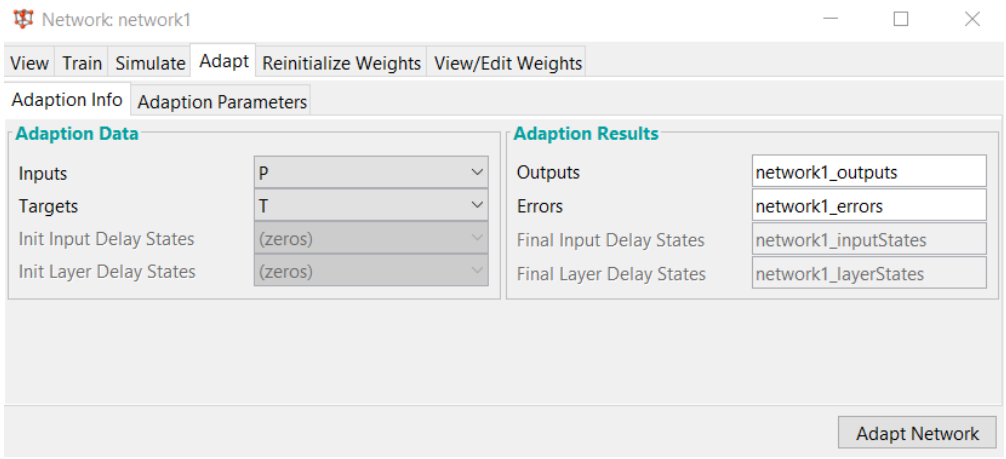


Рисунок 1.16 – Вікно налаштування параметрів адаптації мережі

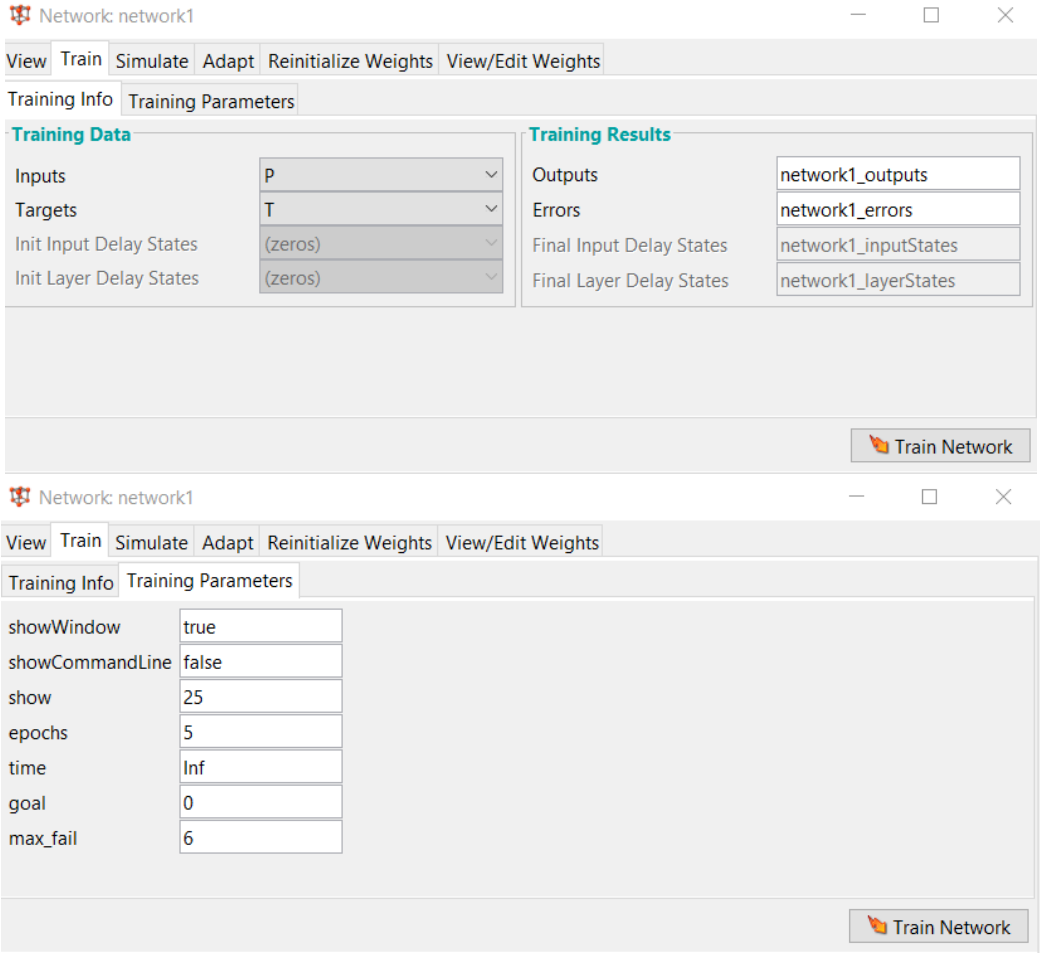


Рисунок 1.17 – Вікно завдання параметрів навчання мережі

Визначимо результати навчання можна побачити, обравши команду **View/Edit Weights** , по якій відкривається вікно з полем **Select the weight or bias to view** для вибору ваги входів, що встановилися **IW** та зміщення **b** (див. рис. 1.18)

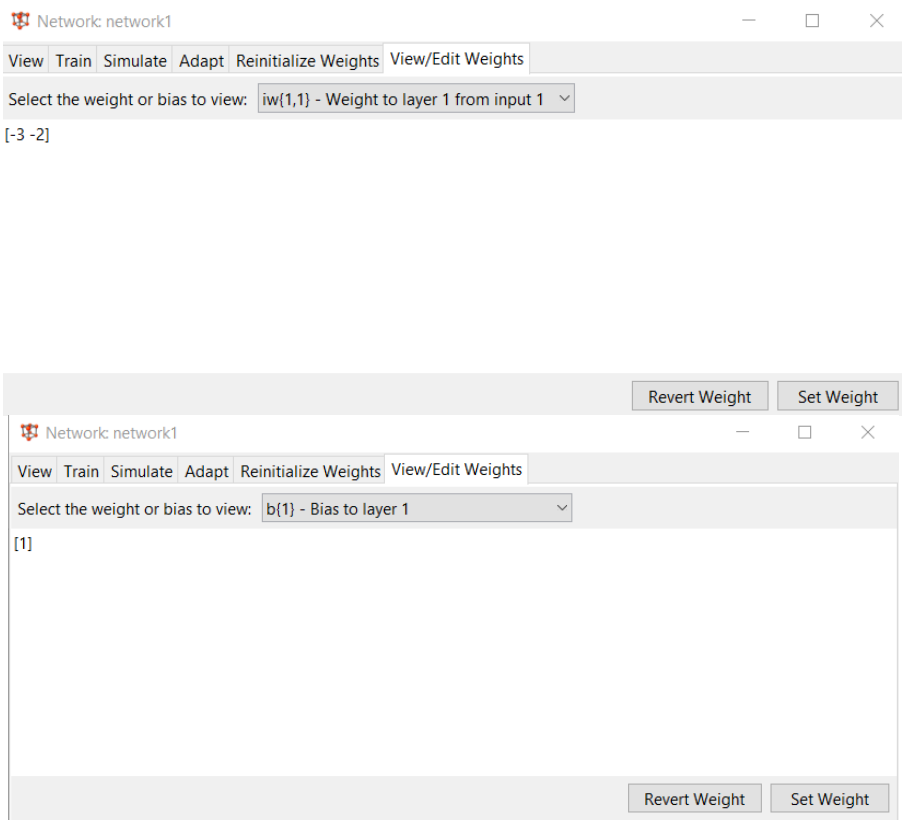


Рисунок 1.18 – Результат навчання мережі

Таким чином, лінія перемикання, що розділяє класи об'єктів у площині (p1; p2), записується так:

$$L: -3p_1 - 2p_2 + 1 = 0.$$

У вікні **Network/Data Manager,** переглянемо значення сигналів на виході та помилку мережі (див. рис. 1.19).

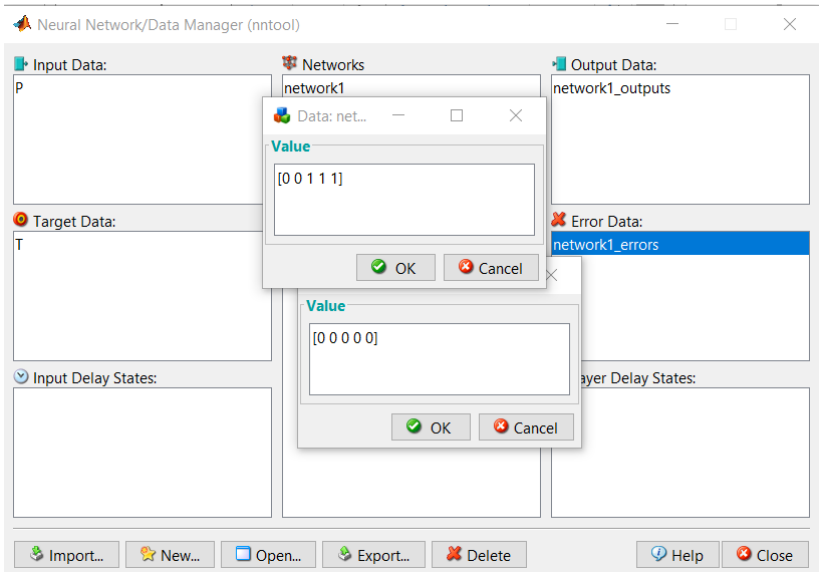


Рисунок 1.19 – Вікно для перегляду вихідних сигналів мережі

3. Для виведення графіка лінії перемикання потрібно у вікні команд MATLAB ввести вихідні дані в іншому форматі. Після цього налаштувати та адаптувати мережу. Програма матиме такий вигляд:>> P=[2 1 -2 -1 1;2 2 2 1 -2];

```
P=[2 1 -2 -1 1;2 2 2 1 -2];
T=[0 0 1 1 1];
net=newp([-2 2;-2 2],1);
net.adaptParam.passes=3;
net=train(net,P,T);
hold on;
plotpv(P,T);
plotpc(net.IW{1},net.b{1});
hold off
a=sim(net,P)
```

Результати виконання програми моделювання нейронної мережі

```
>> Lab1
a =
    0     0     1     1     1
```

В результаті програмного моделювання побудовано графік, на якому в координатах p(1)–p(2) нанесена лінія, яка розділяє класи вхідних векторів (див. рис. 1.20).

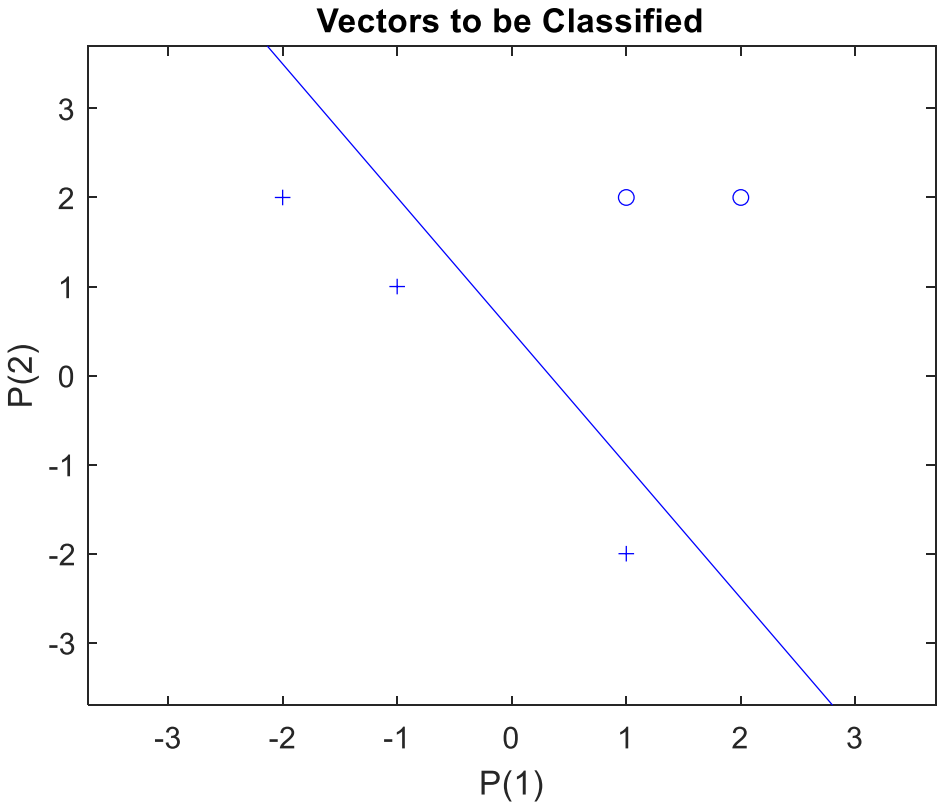


Рисунок 1.20 – Графік поділу класів об'єктів

1.3 Зміст звіту

Для виконання роботи студенти отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 1.2.

Звіт по роботі повинен містити завдання, структуру мережі, параметри налаштування та результати навчання мережі.

При захисті звіту студент повинен відповісти на питання щодо методики роботи з графічним інтерфейсом користувача GUI, а також особливостей налаштування нейронних мереж.

Таблиця 1.2 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар.	Вхідна послідовність	Діапазон	Послідовність цілей
1	p_1= [–2 –3 +5 +1 –6 +3 –5] p_2= [0 –4 +2 +3 +1 +6 –3]	–6...+6	[0 0 1 1 0 1 0]
2	p_1 = [+2 –3 +5 +1 –6 +3 –5] p_2= [0 –4 +2 +3 +1 –6 –3]	–5...+5	[0 1 0 0 0 1 1]
3	p_1= [–1 +5 +4 –5 +2 –3] p_2= [–3.5 +1.5 –5 +2.5 +1 –2]	–5...+5	[0 1 0 1 1 0]
4	p_1= [–10 +8 +4 +12 –7 –5] p_2= [+2 +3.5 –2 –10 +7 –6]	–12...+12	[0 1 1 1 0 0]
5	p_1= [–1 +2 +1.5 –0.5 +1.5 +2] p_2= [+1 +1.5 +0.5 +2 –1 +0.5]	–2...+2	[0 1 0 0 1 1]
6	p_1= [+1 –2 +0.5 +1.5 0 –2.5] p_2= [–3 –1 +1 –0.5 –2 +0.5]	–3...3	[0 1 1 0 0 1]
7	p_1= [5 4 5 3 4 2] p_2= [1 3.5 1 2 3 0.5]	0...5	[0 1 1 0 1 0]
8	p_1= [0.5 1.5 2 1 0 1] p_2= [1 0.5 1 2 1.5 2]	0...2	[1 0 0 1 1 0]
9	p_1=[–0.5 –0.5 +0.3 –0.1 +0.2 –0.7] p_2=[–0.5 +0.5 –0.3 +1.0 +0.8]	–1...+1	[1 1 0 0 0 1]
10	p_1= [+2 +1.5 +3 +0.5 –0.5 –1] p_2= [–1 +0.5 +2 +0.5 +2 +1]	–1...+3	[0 1 1 0 1 0]
11	p_1= [+2 +4.5 +3 +2.5 –0.5 –1] p_2= [–3 +0.5 +2 +1.5 +2 –4]	–4...+5	[0 1 1 0 0 0]
12	p_1= [+2 –3 +5 +1 –6 +3] p_2= [–1 +3.5 –4 +2 +3 –0.5]	–6...+5	[0 1 0 1 1 0]
13	p_1= [+1 –2 +0.5 +1.5 –2.5 –0.5] p_2= [–0.5 +0.5 –0.3 +1.0 +0.8 –2]	–3...+2	[1 0 1 1 0 0]
14	p_1= [–10 +8 +4 +2 –7 –5] p_2= [+2 +3.5 –2 –10 +7 –6]	–10...+10	[0 1 1 1 0 0]

Продовження табл. 1.2

№ вар.	Вхідна послідовність	Діапазон	Послідовність цілей
15	p_1= [0.5 1.5 2 1 0 1] p_2= [1 0.5 1 2 1.5 2]	0...2	[0 1 1 0 0 1]
16	p_1= [–2 –3 +5 +1 –6 +3 –5] p_2= [0 –4 +2 +3 +1 +6 –3]	–6...+6	[1 1 0 0 1 0 1]
17	p_1= [+3 +4 +1 +4 –1 –0.5] p_2= [+3 +1 +0.5 –2 +2 –2]	–3...+5	[1 0 1 0 1 0]
18	p_1= [+2 –3 +5 +1 –6 +3] p_2= [–1 +3.5 –4 +2 +3 –0.5]	–6...+6	[1 0 1 0 0 1]
19	p_1= [0.5 1.5 2 1 0 1] p_2= [1 0.5 1 0.2 1.5 2]	0...2	[0 1 0 0 0 1]
20	p_1= [+1 –2 +0.5 +1.5 –2.5 –0.5] p_2= [–0.5 +0.5 –0.3 +1.0 +0.8 –2]	–3...+2	[0 1 0 0 1 1]

1.3 Контрольні питання

1 Призначення та функціональні можливості GUI-інтерфейсу.
2 Правила ініціалізації, адаптації та навчання мережі.
3 Оцінка якості роботи мережі.

2 СТВОРЕННЯ, АДАПТАЦІЯ ТА НАВЧАННЯ ЛІНІЙНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ У КОМАНДНОМУ ВІКНІ MATLAB

Мета роботи: освоїти методику та придбати навички створення, адаптації та навчання лінійної нейронної мережі із застосування пакету прикладних програм (ППП) Neural Network Toolbox системи програмування MATLAB.

2.1 Методика створення, адаптації та навчання мережі в ППП NEURAL NETWORK TOOLBOX

Формування та ініціалізація мережі. Нейронна мережа створюється оператором **net**, а лінійний шар – оператором **newlin**. Наприклад, лінійна мережа з двоелементним вектором входу, значення якого знаходяться в діапазоні **[-1 1]**, одним шаром, без лінії затримки на вході (тип 0) та параметром швидкості налаштування 0.2 формується наступною командою:

```
>> net=newlin([-1 1;-1 1],1,0,0.2)
```

Така мережа функціонує відповідно до лінійної залежності виду:

$$a = purelin(\boldsymbol{W}\boldsymbol{p} + b),$$

де a – вихід мережі, *purelin* – лінійна функція активації нейрона, $\boldsymbol{W}$ – вагова матриця входів, $\boldsymbol{p}$ – вектор входів, $\boldsymbol{b}$ – ваговий коефіцієнт зміщення нейрона.

Модель цієї нейронної мережі показано на рисунку 2.1.

Нехай, наприклад, вагова матриця має бути задана вектором $\boldsymbol{W} = [\mathbf{1}\ \mathbf{2}]$, а ваговий коефіцієнт зміщення нейрона $b = 0$. Тоді ці параметри мережі в описі її структури будуть представлені таким чином:

```
net.IW{1,1}=[1,2];
net.b{1}=0;
```

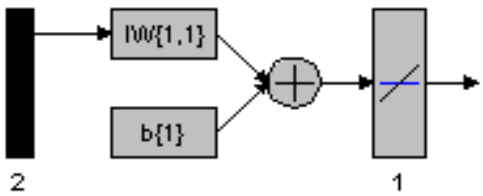


Рисунок 2.1 – Модель лінійної нейронної мережі з двоелементним вектором входу

При формуванні мережі оператором newlin ініціалізація мережі

проводиться за умовчанням, тому застосовувати метод net=init(net) не слід.

Адаптація (налаштування) нейронної мережі. Процедура адаптації здійснюється при введенні навчальної вибірки послідовним чи груповим способом. Для адаптації мережі необхідно встановити вектори входу ***P*** і цілі ***T***, а також встановити початкові значення ваг ***IW*** та зміщення ***b***.

Процес адаптації розглянемо з прикладу формування лінійної залежності виду:

$$t = 2p_1 + p_2.$$

При ***послідовному способі*** подання навчальної послідовності вектори задаються у вигляді масивів комірок формату *cell***:**

```
>> net=newlin([-1 1;-1 1],1,0,0);
>> P={[-1;1] [-1/3;1/4] [1/2;0] [1/6;2/3]};
>> T={-1 -5/12 1 1};
>> P1=[P{:}], T1=[T{:}]
P1 =
   -1.0000   -0.3333    0.5000    0.1667
    1.0000    0.2500         0    0.6667
T1 =
   -1.0000   -0.4167    1.0000    1.0000
```

Спочатку поставимо мережу з нульовими значеннями початкових ваг і зміщень:

```
>> net.IW{1}=[0 0];
>> net.b{1}=0;
```

Щоб забезпечити можливість вибирати довільні функції для налаштування ваги та зсувів, скористаємося М-функцією adapt. Для лінійних мереж, створюваних за допомогою методу newlin за умовчанням встановлюється функція adaptwb налаштування режиму та функція learnwh налаштування параметрів мережі за алгоритмом WH (правило Уідроу-Хоффа).

Learnwh обчислює величину зміни ваги входу даного нейрона **dw** від вкладу нейрона **pn'**, помилки **e** та швидкості налаштування **lr** згідно Widrow-Hoff правилу:

dw = lr*e*pn'.

Функції налаштування ваги та зсувів задаються у форматі net.inputWeighst{i,j}.learnFcn та net.biases{i,j}.learnFcn, відповідно.

Виконаємо перший цикл адаптації з нульовим параметром швидкості налаштування та визначимо значення виходів (**a**) та помилки (**e**):

```
>> [net1,a,e]=adapt(net,P,T);
>> net1.IW{1,1},a,e
ans =
     0     0
a =
    [0]    [0]    [0]    [0]
e =
    [-1]    [-0.4167]    [1]    [1]
```

Як видно з наведеного фрагмента, ваги не модифікуються, виходи мережі залишаються рівними нулю та адаптація не відбувається, тому що параметр швидкості налаштування не заданий.

Задаємо початкові значення ваг входів та зміщення, а також встановимо функції та параметр швидкості налаштування. При цьому вважаємо, що в функції виходу не повинна бути постійною складовою, а значить, для параметра швидкості налаштування зміщення встановлюємо нульове значення:

```
>> net.IW{1}=[0 0];
>> net.b{1}=0;
>> net.inputWeights{1,1}.learnParam.lr=0.2;
>> net.biases{1,1}.learnParam.lr=0;
>> [net1,a,e]=adapt(net,P,T);
>> net1.IW{1,1},a,e
ans =
    0.3454   -0.0694
a =
    [0]    [-0.1167]    [0.1100]    [-0.0918]
e =
    [-1]    [-0.3000]    [0.8900]    [1.0918]
```

Звідси видно, що процес адаптації почався, але досягнення необхідної точності, наприклад 0,015, одного циклу недостатньо.

Виконаємо послідовну адаптацію мережі протягом 30 циклів. Для обчислення середньоквадратичної помилки використовуємо оператор mse, а для конвертування масиву осередків cell в масив чисел подвоєної точності double застосуємо функцію cell2mat:

```
>> net=newlin([-1 1;-1 1],1, 0, 0);
>> net.IW{1}=[0 0];
>> net.b{1}=0;
>> net.inputWeights{1,1}.learnParam.lr=0.2;
>> net.biases{1,1}.learnParam.lr=0;
>> P={[-1;1] [-1/3; 1/4] [1/2; 0] [1/6; 2/3]};
>> T={-1 -5/12 1 1};
>> for i=1:30,
```

```
[net, a{i}, e{i}]=adapt(net, P, T);
W(i,:)=net.IW{1,1};
end
>> mse(cell2mat(e{30}))
ans =
   0.0017
>> W(30,:)
ans =
   1.9199    0.9250
>> cell2mat(e{30})
ans =
  -0.0056   -0.0081    0.0434    0.0699
```

Після 30 циклів адаптації мережі за чотирма навчальними векторами входу та мети відбулася зміна значень ваг входів та помилок.

Побудуємо графіки цих змін до функцій числа циклів (ітерацій) процесу адаптації. Розташуємо їх в одній фігурі одна над одною, застосовуючи для цього функцію subplot:

```
>> subplot(2,1,1)
>> for i=1:30, E(i)=mse(e{i}); end
>> semilogy(1:30, E, '+k')
>> xlabel('Епох'), ylabel('Помилка'), grid
>> subplot(2,1,2)
>> plot(0:30,[[0 0]; W], 'k');
>> xlabel('Епох'), ylabel('Вага входів w(i)'),grid
```

Графіки функцій представлені рисунку 2.2.

Не важко переконатися, що процес адаптації зажадав 12 кроків – помилка навчання досягла цьому етапі значення 1,489e–3. Це свідчить про те, що навчальна вибірка була представницькою і мережа відповідає задачі, що вирішується.

При ***груповому способі*** подання навчальної послідовності вектори входу та цілі задаються масивами у форматі double.

Основний цикл адаптації мережі організується так:

```
net=newlin([-1 1;-1 1],1,0,0);
P=[-1 -1/3 1/2 1/6; 1 1/4 0 2/3];
T=[-1 -5/12 1 1];
net=newlin([-1 1;-1 1],1,0,0.2);
net.IW{1}=[0 0];
net.b{1}=0;
net.inputWeights{1,1}.learnParam.lr=0.2;
P=[-1 -1/3 1/2 1/6; 1 1/4 0 2/3];
T=[-1 -5/12 1 1];
EE=10; i=1;
while EE>0.0017176
```

```
    [net,a{i}, e{i}, pf]=adapt(net,P,T);
    W(i,:)=net.IW{1,1};
    EE=mse(e{i});
    ee(i)=EE;
    i=i+1;
end
```

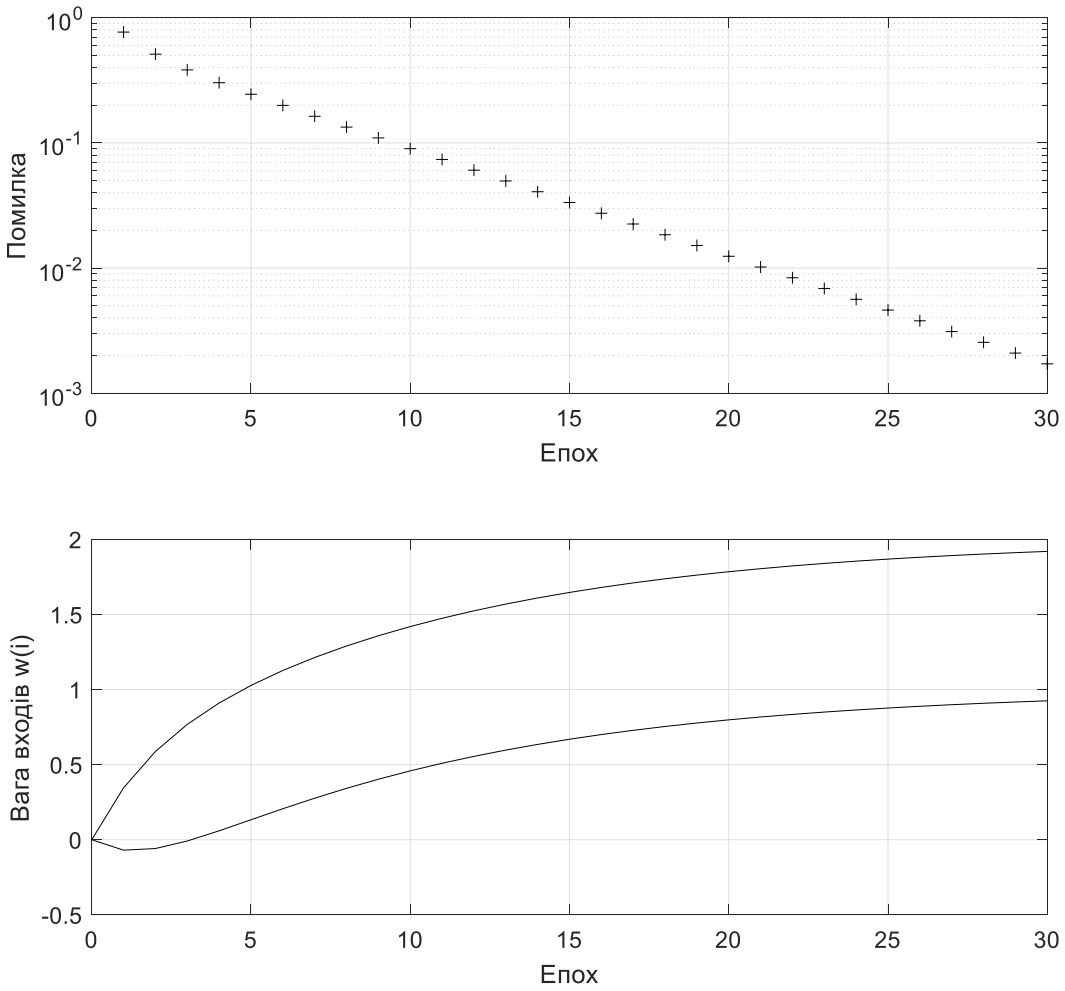


Рисунок 2.2 – Графіки зміни значень помилки та ваги входів у процесі адаптації

Результатом адаптації є наступні значення коефіцієнтів лінійної залежності (ваг входів), значень виходів мережі та середньоквадратичної похибки адаптації:

```
W(63,:)
ans =
   1.9114    0.8477
cell2mat(a(63))
ans =
  -1.0030   -0.3624    1.0172    0.9426
EE=mse(e{63})
```

```
EE =
   0.0016
```

Наведемо процедуру адаптації нейронної мережі в динаміці на графіках. Об'єднаємо в одну фігуру графіки функцій виходів, ваг входів та помилки:

```
subplot(3,1,1)
plot(0:63,[zeros(1,4); cell2mat(a')],'k')
xlabel(''),ylabel('Виходи a(i)'),grid
subplot(3,1,2)
plot(0:63,[[0 0];W],'k')
xlabel(''),ylabel('Вага входів w(i)'),grid
subplot (3,1,3)
semilogy(1:63, ee,'+k')
xlabel('Епох'),ylabel('Помилка'),grid
```

Графіки функції наведені на рисунку 2.3.

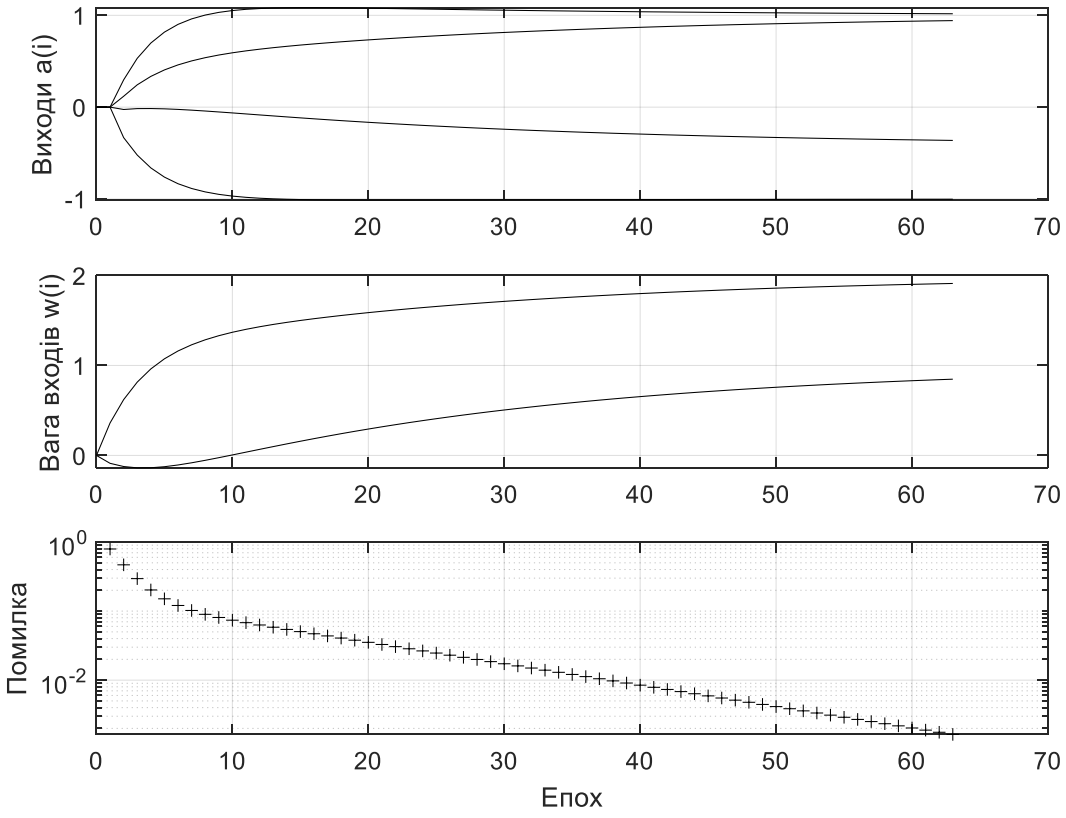


Рисунок 2.3 – Графіки вихідних сигналів мережі, ваг входів та помилки при адаптації з груповим поданням навчальної вибірки

Як випливає з аналізу графіків, для досягнення необхідної точності адаптації тут також знадобилося 12 епох.

Слід врахувати, що у лінійних динамічних мережах природним є

лише послідовний спосіб, оскільки ці мережі мають затримки сигналів.

Навчання мережи. Для навчання та налаштування параметрів мережі використовуються функції **trainwb** та **learnwh**, відповідно.

Після формування мережі, завдання навчальної вибірки (послідовним способом), введення параметрів швидкості налаштування та кількості циклів навчання (епох) отримаємо значення ваги входів та графік залежності величини помилки від числа циклів навчання, який представлений на рисунку 2.4.

```
net=newlin([-1 1;-1 1],1, 0, 0);
net.IW{1}=[0 0];
net.b{1}=0;
P={[-1;1] [-1/3; 1/4] [1/2; 0] [1/6; 2/3]};
T={-1 -5/12 1 1};
net.inputWeights{1,1}.learnParam.lr=0.2;
net.biases{1,1}.learnParam.lr=0;
net.trainParam.epochs=30;
net1=train(net,P,T);
W=net1.IW{1}
```

```
TRAINB, Epoch 0/30, MSE 0.793403/0.
TRAINB, Epoch 25/30, MSE 0.00373997/0.
TRAINB, Epoch 30/30, MSE 0.00138167/0.
TRAINB, Maximum epoch reached.
W =

    1.9214    0.9260
```

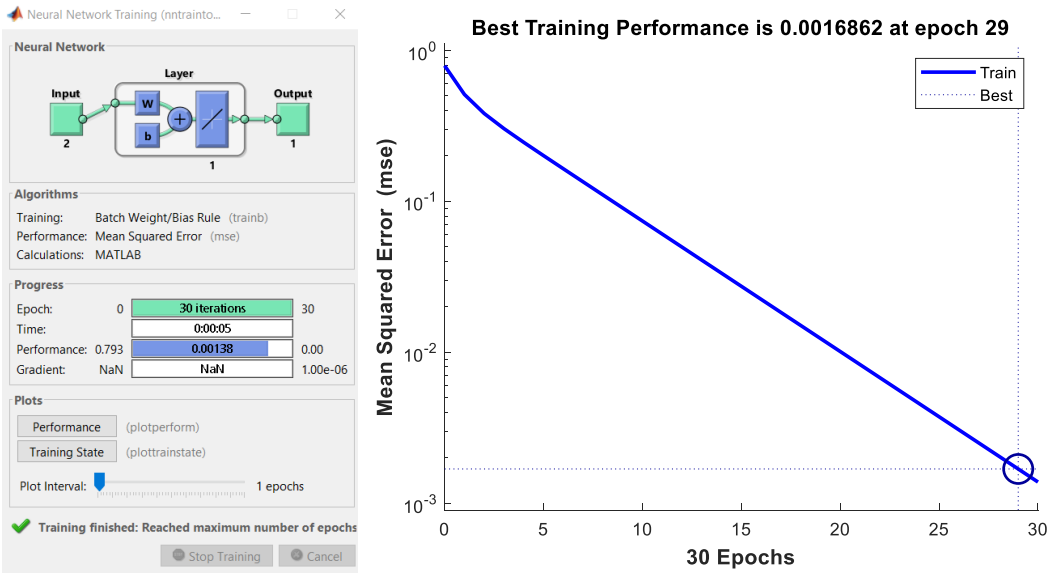


Рисунок 2.4 – Результати навчання НМ та графік залежності помилки навчання від числа циклів

2.2 Методика виконання роботи

Для виконання роботи студенти отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 2.1.

У процесі створення мережі необхідно виконати.

1. Вибрати структуру мережі та провести її ініціалізацію (задати початкові значення ваги та зміщення).
2. Вибрати критерій якості та налаштування мережі.
3. Задати кількість циклів адаптації, провести адаптацію мережі.
4. Побудувати графіки функцій виходу мережі, ваг коефіцієнтів та критерію якості адаптації.

Таблиця 2.1 – Варіанти індивідуальних завдань

Варіант	Вхід	Значення вхідних сигналів навчальної послідовності $P1/P2$ (по порядку)						Значення функції цілі T					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	1	1/2	-1/2	1	-1/4	1/4	-1/2	0,9	-0,5	1,5	-1	1	-1
	2	0	-1/4	1/4	1/2	-3/4	1/6						
2	1	-1/2	-1	3/4	1/2	-1	-3/4	-0,5	-1,8	1	0,8	1	0
	2	1/5	3/4	-2/5	-1/4	-1	-1/4						
3	1	1/4	1	1/2	-1	-1/2	0	0,3	0,8	0	-0,7	0,2	0,5
	2	-1/4	-1/2	3/4	1/4	0	1						
4	1	1/2	-1/2	-1	1	3/4	-3/4	1,5	1,5	0	-3	-2	0,8
	2	1	1/2	-1/2	-1	-2/3	0						
5	1	-3/4	1/2	-1	0	1	3/4	1,5	0,7	1,5	-1	-2	-2,2
	2	0	1/4	-1/2	-1	0	-3/4						
6	1	3/4	-1	0	1/2	-1/4	-3/4	2	-1	1,5	1,2	-1	-2,3
	2	-3/4	0	-1	-1/2	1/2	1						
7	1	-3/4	1	1/4	1/2	-1	0	-1,6	1,8	-0,1	1	-1,5	-0,2
	2	1	-1/2	1	-1	0	1/2						
8	1	1	1/2	-2/3	3/4	-1	3/4	-0,3	2,4	0	0,2	-1,3	2,3
	2	1	-1	-1/2	1/2	0	-3/4						
9	1	3/4	-1	1/4	-1/4	1	-1/5	1,5	-2	-0,4	1	1	-1
	2	-3/4	1	1/2	-1	-1/4	3/4						
10	1	1/2	-1/2	-1	1	1/2	0	-0,3	0,7	-2,8	3,5	2	-1
	2	3/4	-1	1/2	-1	-2/3	2/3						

2.3 Зміст звіту

Звіт по роботі повинен містити завдання, структуру мережі, програму та результати адаптації мережі.

При захисті звіту студент повинен відповісти на питання щодо методики створення та адаптації лінійної нейронної мережі в пакеті прикладних програм.

2.4 Контрольні питання

1. У якому форматі записується оператор створення лінійної мережі?
2. Якою залежністю описується лінійна нейронна мережа?
3. Як представляється структура моделі одношарової лінійної мережі з *R* входами?
4. Як здійснюється ініціалізація мережі?
5. Як здійснюється адаптація мережі?
6. У яких форматах вводяться навчальні значення?
7. Який критерій зазвичай застосовується для налаштування лінійної мережі?
8. Яку значущість має параметр швидкості налаштування мережі?
9. Чим відрізняються послідовний та груповий способи завдання навчальних вибірок?

3 РОЗРОБКА РАДІАЛЬНОЇ БАЗИСНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ АППРОКСІМАЦІЇ ФУНКЦІЙ

Мета роботи: придбати навички створення, налаштування та моделювання радіальних базисних мереж для апроксимації функцій.

3.1 Методика формування, навчання та моделювання радіальної базисної мережі

Принцип функціонування мережі. Мережі радіальних базисних функцій (RBF) відрізняються від лінійних нейронних мереж тим, що містять шар прихованих радіально-симетричних прихованих нейронів (шаблонний шар). Для забезпечення радіально-симетричних властивостей необхідно:

- наявність центру, представленого вектором;
- наявність способу виміру відстані від центру до вхідного вектора;
- наявність спеціальної функції, яка відображатиме функцію відстані.

У радіальних базисних мережах всі умови забезпечуються застосуванням радіального базисного нейрона з функцією активації виду:

$$a = radbas(n) = e^{-n^2},$$

де ***n*** – вхід функції активації, що визначається як модуль різниці вектору ваги і вектору входу, помножений на зсув: $n = \|\boldsymbol{p} - \boldsymbol{w}\| \, b$.

Практично це означає, що вихідний сигнал шаблонного нейрона – це функція відстані між вхідним вектором та збереженим центром. Що ближче вхідний вектор до центру, то більший вихідний сигнал нейрона (див. рис. 3.1). При цьому радіальний базисний нейрон діє як індикатор, який формує значення 1 коли вхід **p** ідентичне вектору ваг **IW**. Зміщення **b** дозволяє коригувати чутливість радіального базисного нейрона.

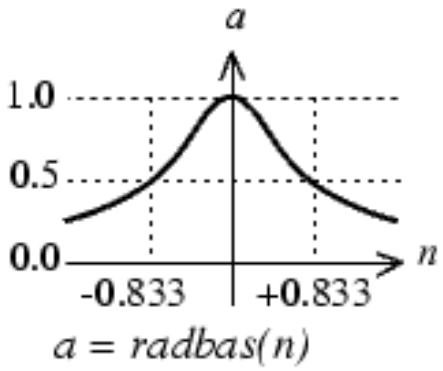


Рисунок 3.1 – Графік функції активації

Структура мережі показано рисунку 3.2. Мережа містить радіальний базисний шар та лінійний шар.

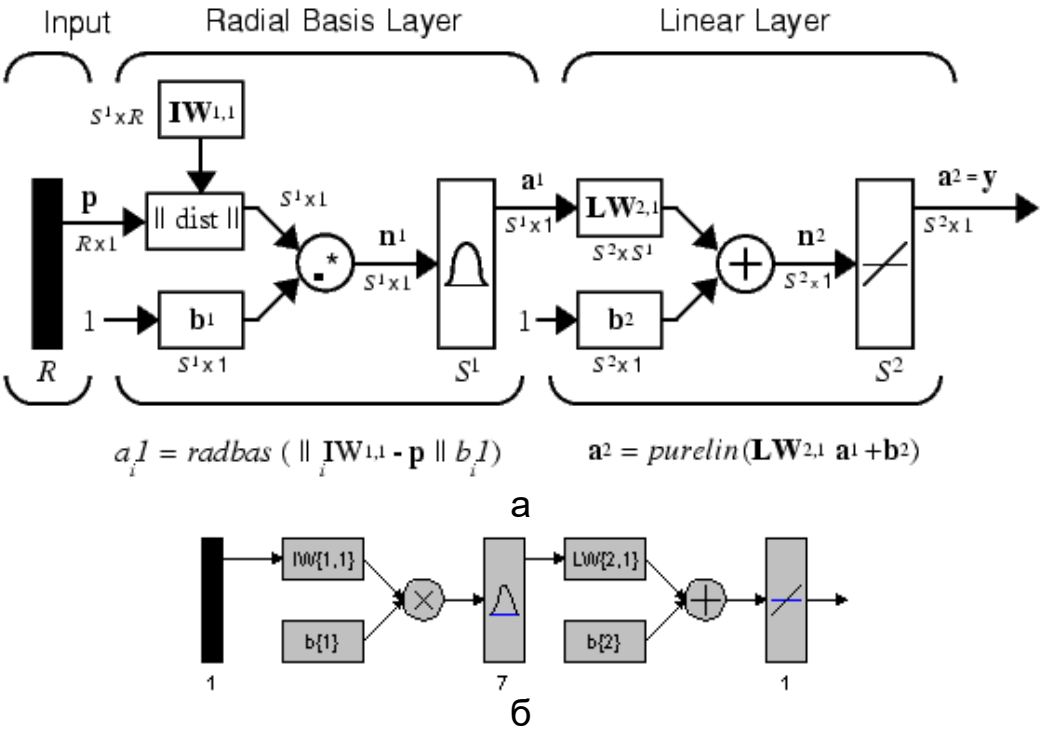


Рисунок 3.2 – Повна (а) та спрощена (б) структури моделі радіальної базисної мережі

Прихований радіальний базовий шар має S^1 нейронів, а вихідний шар - S^2 нейронів. Радіальний базовий шар містить спеціальний блок dist, на вхід якого подаються вхідний вектор **p** та матриця ваг **IW**. Виходом блоку є вектор, що складається з S^1 елементів, які визначаються відстанями між *i*-м вектором входу та *i*-м вектор-рядком **IW** матриці ваг. Вихід блоку dist множиться по-елементна на вектор зміщення **b** і формує вхід функції активації. Як функція активації використовується зазвичай функція Гауса.

Побудова мережи. Для створення радіальної базової мережі призначені М-функції newrbe та newrb. Перша дозволяє побудувати мережу з нульовою помилкою, друга дозволяє керувати кількістю нейронів прихованого шару. Недолік функції newrbe полягає в тому, що вона формує мережу з числом нейронів у прихованому шарі, рівним числу елементів навчальної множини. Якщо таких елементів багато, що притаманно реальних випадків, то прийнятне рішення досягається важко.

Створимо мережу з нульовою помилкою:

```
net=newrbe(P,T,SPREAD);
```

Вхідними аргументами функції newrbe є масиви вхідних векторів **P** та векторів цілі **T**, а також параметр впливу SPREAD**.** Функція встановлює ваги першого шару рівними **P**. Зміщення встановлюються

рівними 0,8326/ SPREAD. Це означає, що рівень перекриття радіальних базисних функцій дорівнює 0,5 та всі входи в діапазоні ±SPREAD вважаються значущими.

Ваги другого шару можуть бути знайдені шляхом моделювання виходів першого шару (A{1}) та подальшого розв'язання системи лінійних рівнянь алгебри:

$$[W\{2,1\}\ b\{2\}] * [A\{1\};\ ones]=T$$

Оскільки входи другого шару A{1} і цілі **T** відомі, а функція активації лінійна, то обчислення ваги і зміщень другого шару досить вирішити систему рівнянь:

$$Wb = T/[P;\ ones(1,\ size(P,2))]$$

Розглянемо процедуру створення та моделювання радіальної базисної мережі для довільної функції.

Значення входів змінюються в діапазоні від -1 до 1. Навчальна вибірка складена для точки 21 функції через 0,1. Графік функції представлений рисунку 3.3.

```
P = -1:.1:1;
T = [-.9602 -.5770 -.0729  .3771  .6405  .6600  .4609
   .1336 -.2013 -.4344 -.5000 -.3930 -.1647  .0988
   .3072  .3960  .3449  .1816 -.0312 -.2189 -.3201];
```

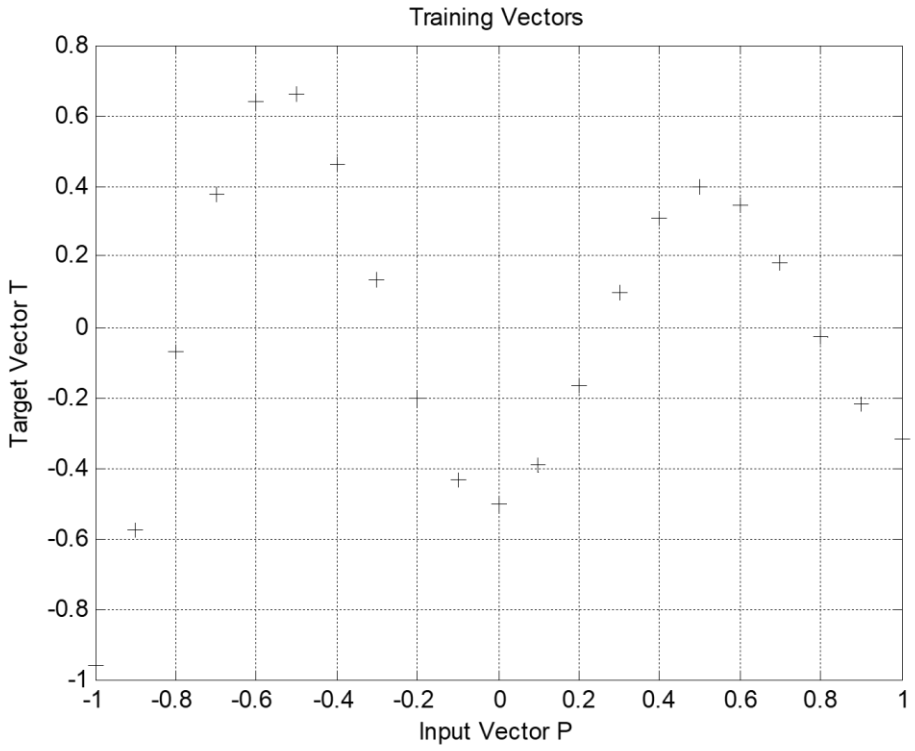


*Рисунок 3.3 – Графік навчальної функції (вектор **T**)*

```
plot(P,T,'+');
title('Training Vectors');
xlabel('Input Vector P');
ylabel('Target Vector T');grid

%Збережемо поточний графік та сформуємо мережу:

hold on
net=newrbe(P,T);
net.layers{1}.size
Warning: Rank deficient, rank = 13, tol = 2.2386e-014.
> In newrbe>designrbe at 120
  In newrbe at 103
ans =
    21       %  Кількість нейронів прихованого шару дорівнює 21

Зробимо моделювання мережі:

V=sim(net,P);
plot (P,V,'ob','MarkerSize',5,'LineWidth',2)
p=[-0.75 -0.25 0.25 0.75];
v=sim(net,p);
plot(p,v,'+k','MarkerSize',10,'LineWidth',2)
```

Результати моделювання наведено на рисунку 3.4.

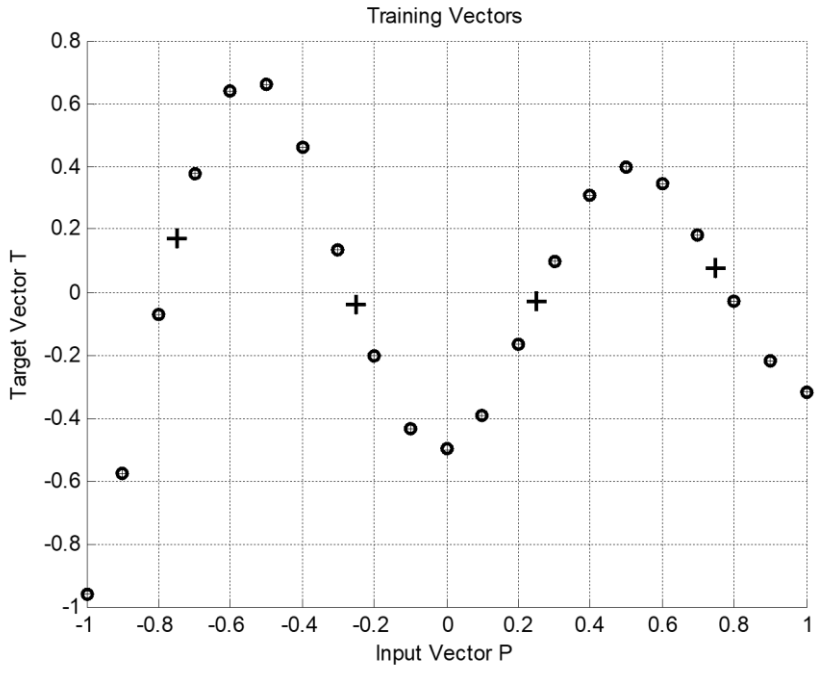


Рисунок 3.4 – Результати моделювання мережі під час подачі на вхід чотирьох нових значень

Як видно з рисунку 3.4, вектор **T** для нових значень входу визначено з високою точністю.

Створимо мережу з меншою кількістю нейронів, застосувавши функцію newrb. Нову мережу навчимо колишньою послідовністю цілей:

```
P = -1:.1:1;
T = [-.9602 -.5770 -.0729  .3771  .6405  .6600  .4609
      .1336 -.2013 -.4344 -.5000 -.3930 -.1647  .0988
     .3072  .3960  .3449  .1816 -.0312 -.2189 -.3201];
plot(P,T,'*r','MarkerSize',4,'LineWidth',2)
hold on
GOAL=0.01; % Допустиме значення помилки
net=newrb(P,T,GOAL);
net.layers{1}.size
NEWRB, neurons = 0, SSE = 3.69051
ans =
    6    % Кількість нейронів прихованого шару дорівнює 6
v=sim(net,p);
p=[-0.75 -0.25 0.25 0.75];
v=sim(net,p);
plot(p,v,'+k','MarkerSize',10,'LineWidth',2)
```

Як очевидно з М-файлу, число нейронів першого шару дорівнює 6. У цьому забезпечується середньоквадратична помилка менше 0,01. Результати моделювання наведено на рисунку 3.5.

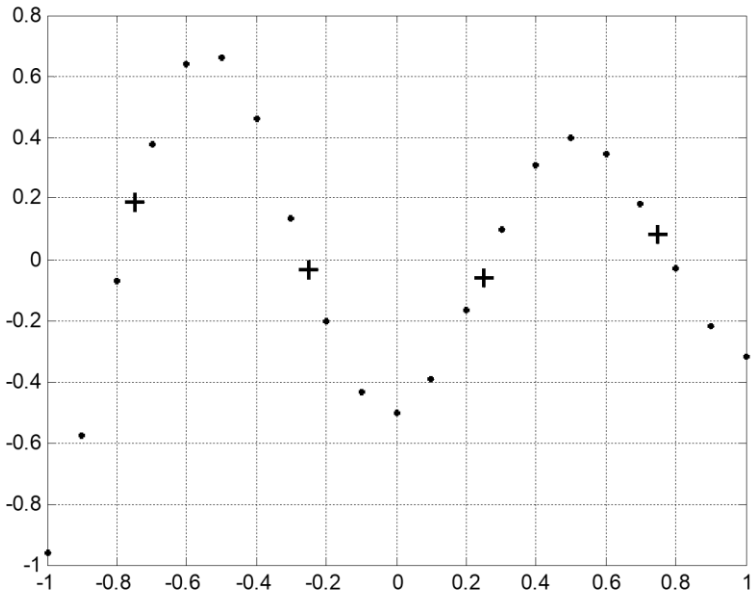


Рисунок 3.5 – Результати моделювання мережі з шістьма нейронами

Апроксимації функції. При застосуванні радіальних базисних мереж для апроксимації функцій використовується ідея розкладання довільної функції на ряд радіальних базисних функцій наступним чином:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N} a_i \phi_i(x) \ ,$$

де $\varphi_i(x)$ – радіальна базисна функція.

Розглянемо процес апроксимації трьох радіальних базисних функцій, заданих на інтервалі [-3 3]:

```
p = -3:.1:3;
a1 = radbas(p);
a2 = radbas(p-1.5);
a3 = radbas(p+2)*0.5;
a4 = a1 + a2 + a3;
plot(p,a1,'b-',p,a2,'b--',p,a3,'b--',p,a4,'m-')
title('Weighted Sum of Radial Basis Transfer Functions');
xlabel('Input p');
ylabel('Output a');
```

Результати апроксимації представлені рисунку 3.6.

З рисунка видно, що при розкладанні довільної функції радіальними функціями базисними забезпечується необхідна гладкість.

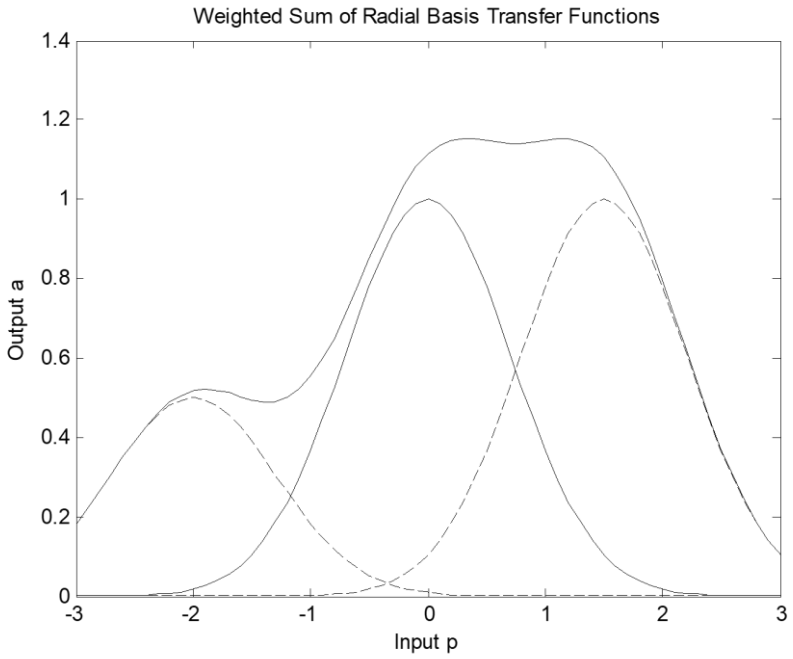


Рисунок 3.6 – Графіки базисних функцій та результат їх апроксимації

Ступінь гладкості та точність апроксимації пов'язані з параметром впливу SPREAD. Як відомо, цей параметр визначає діапазон значних входів (див. вище).

Розглянемо, у чому проявляється цей вплив.

Використовуючи попередній приклад навчальної вибірки, задаватимемо значення SPREAD, рівними 0,01; 1 та 20.

Введемо М-файл зі значенням SPREAD=0,01 та отримаємо результат (рис. 3.7).

```
P = -1:.1:1;
T = [-.9602 -.5770 -.0729  .3771  .6405  .6600  .4609
   .1336 -.2013 -.4344 -.5000 -.3930 -.1647  .0988 ...
   .3072  .3960  .3449  .1816 -.0312  -.2189 -.3201];
  GOAL=0.01;
  SPREAD=0.01;
  net=newrb(P,T,GOAL,SPREAD);
  net.layers{1}.size
NEWRB, neurons = 0, SSE = 2.758

ans =
    19      % Кількість нейронів прихованого шару дорівнює 19

X=-1:.01:1;
Y=sim(net,X);
plot(X,Y);
title('Training Vectors');
xlabel('Input Vector P');
ylabel('Target Vector T');
```

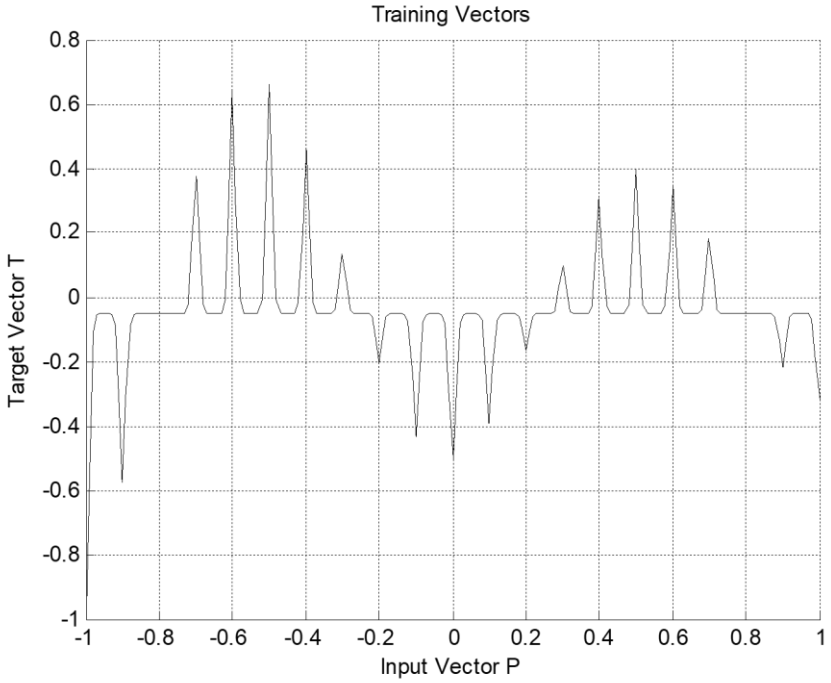


Рисунок 3.7 – Результат апроксимації при SPREAD=0,01

Як очевидно з результатів моделювання, мережа складається з 19 нейронів і забезпечує гладкості функції апроксимації.

Розглянемо процес апроксимації при SPREAD=1.

```
P = -1:.1:1;
T = [-.9602 -.5770 -.0729  .3771  .6405  .6600  .4609
      .1336 -.2013 -.4344 -.5000 -.3930 -.1647  .0988
    .3072  .3960  .3449  .1816 -.0312  -.2189 -.3201];
  GOAL=0.01;
>> SPREAD=1;
>> net=newrb(P,T,GOAL,SPREAD);
  net.layers{1}.size
NEWRB, neurons = 0, SSE = 3.69051
ans =
     6
>> X=-1:.01:1;
Y=sim(net,X);
hold on;
plot(X,Y);
title('Training Vectors');
xlabel('Input Vector P');
>> grid
```

Результати моделювання мережі представлені на рис. 3.8.

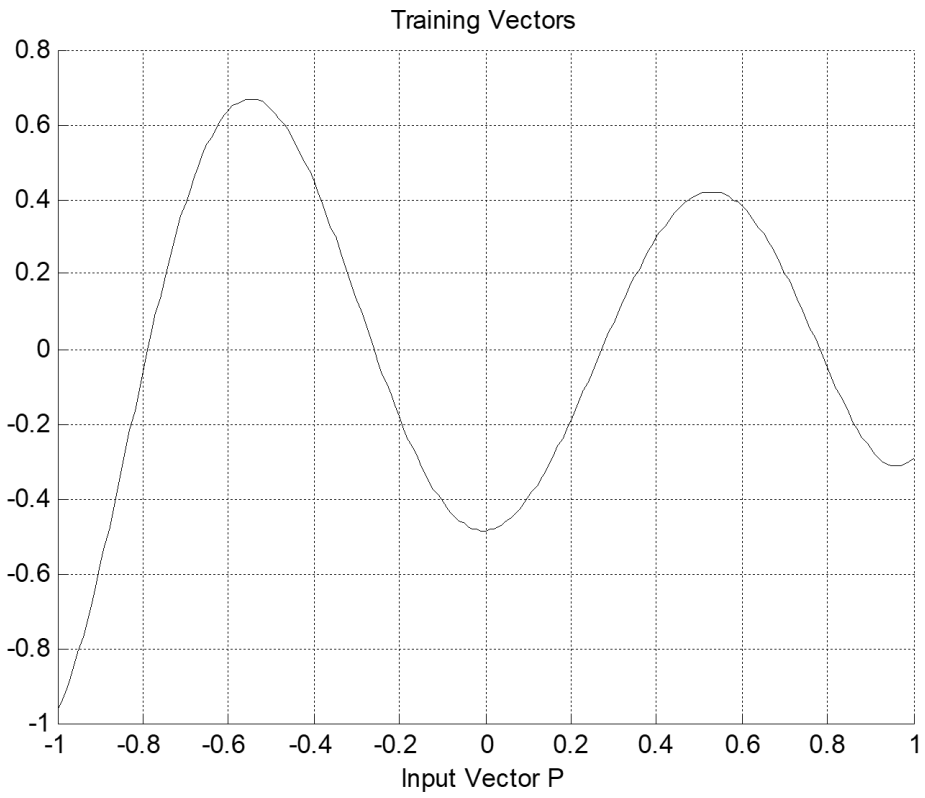


Рисунок 3.8 – Графік функції апроксимації при значенні SPREAD=1

Ця мережа складається з 6 нейронів прихованого шару і добре апроксимує нелінійну залежність, задану безліччю з 21 точки.

Встановимо параметр впливу SPREAD=20.

```
P = -1:.1:1;
T = [-.9602 -.5770 -.0729  .3771  .6405  .6600  .4609
      .1336 -.2013 -.4344 -.5000 -.3930 -.1647  .0988
     .3072  .3960  .3449  .1816 -.0312  -.2189 -.3201];
  GOAL=0.01;
SPREAD=20;
net=newrb(P,T,GOAL,SPREAD);
  net.layers{1}.size
NEWRB, neurons = 0, SSE = 3.69972
ans =
    21        % Кількість нейронів прихованого шару в мережі
X=-1:.01:1;
Y=sim(net,X);
hold on;
plot(X,Y);
title('Training Vectors');
xlabel('Input Vector P'); grid
```

Результат моделювання наведено на рисунку 3.9.

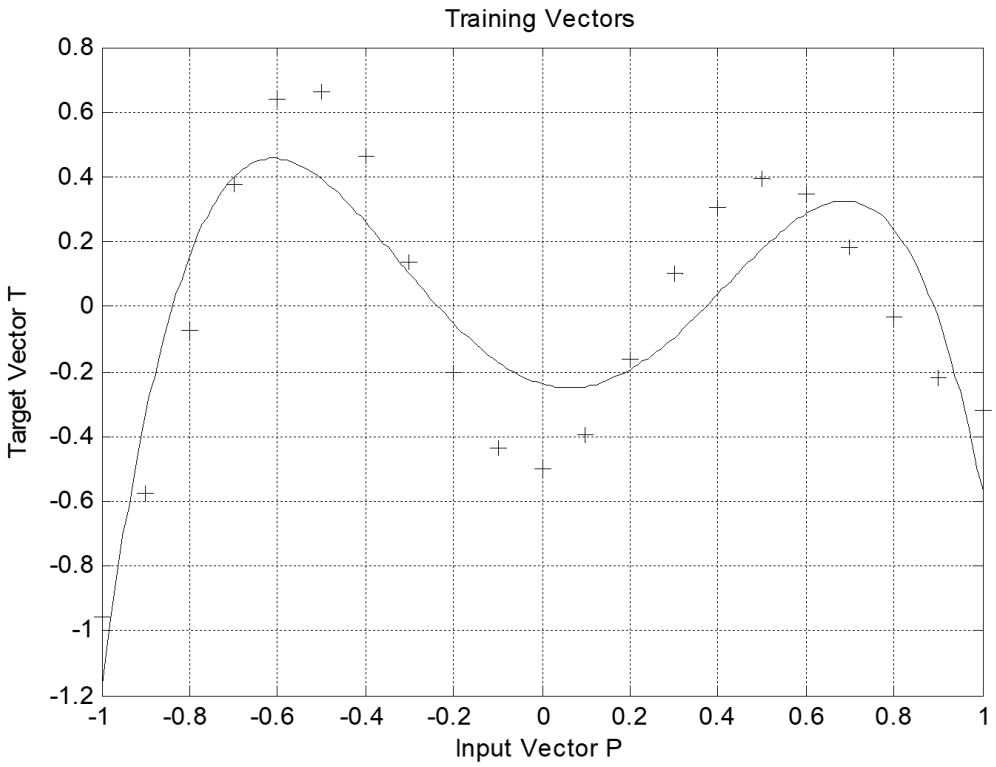


Рисунок 3.9 – Графік функції апроксимації при значенні SPREAD=20

З рисунку 3.9 видно, що при великому значенні параметра впливу SPREAD і великій кількості нейронів прихованого шару (21 нейрон) функції активації перекриваються, і кожен базисний нейрон для всіх значень входу генерує вихідні значення, близькі до 1. Це призводить до того, що мережа не може забезпечити необхідну точність через обчислювальні проблеми.

Таким чином, за результатами виконаних досліджень можна зробити висновок про те, що параметр впливу SPREAD слід брати більшим, ніж крок розбиття функції навчальної послідовності, але меншим за інтервал її розбиття. Для розглянутого прикладу цей діапазон становить від 0,1 до 2.

3.2 Методика виконання роботи

Для виконання роботи студенти отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 3.1.

У процесі виконання роботи потрібно виконати таке.

1. Із застосуванням функції newrbe створити структуру мережі з нульовою помилкою та зробити її навчання.
2. Із застосуванням функції newrb створити структуру мережі та провести її навчання за різних значень параметра впливу SPREAD.
3. Побудувати графіки функцій виходу мережі та зробити висновок про якість апроксимації.

3.3 Зміст звіту

Звіт по роботі повинен містити завдання, структуру мережі, програми та результати роботи мережі.

При захисті звіту студент повинен відповісти на питання щодо методики створення та застосування радіальної базисної нейронної мережі..

3.4 Контрольні питання

1. Чим відрізняється структура радіальних базисних мереж від структури лінійних нейронних мереж?
1. 2. Якими властивостями повинна мати радіальна базова мережа?
3. Які функції активації застосовують у радіальних базисних мережах?
4. Навіщо призначений прихований шаблонний шар?
5. Які М-функції використовуються для створення радіальних базисних мереж і в чому їхня відмінність?
6. Як задається навчальна вибірка для апроксимації функцій?
7. Яка ідея використовується для апроксимації функцій радіальної

базової мережі?

8. Від чого залежить кількість нейронів прихованого шару?

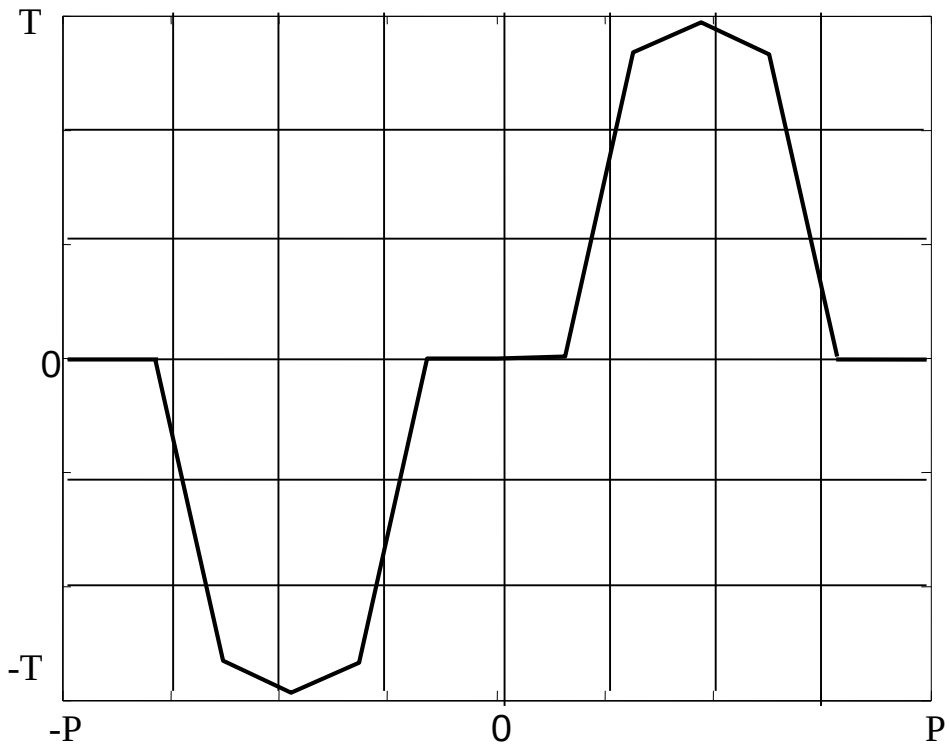
9. Як впливає параметр SPREAD на точність і гладкість функції апроксимації. У якому діапазоні він має бути?

3.5 Індивідуальні завдання

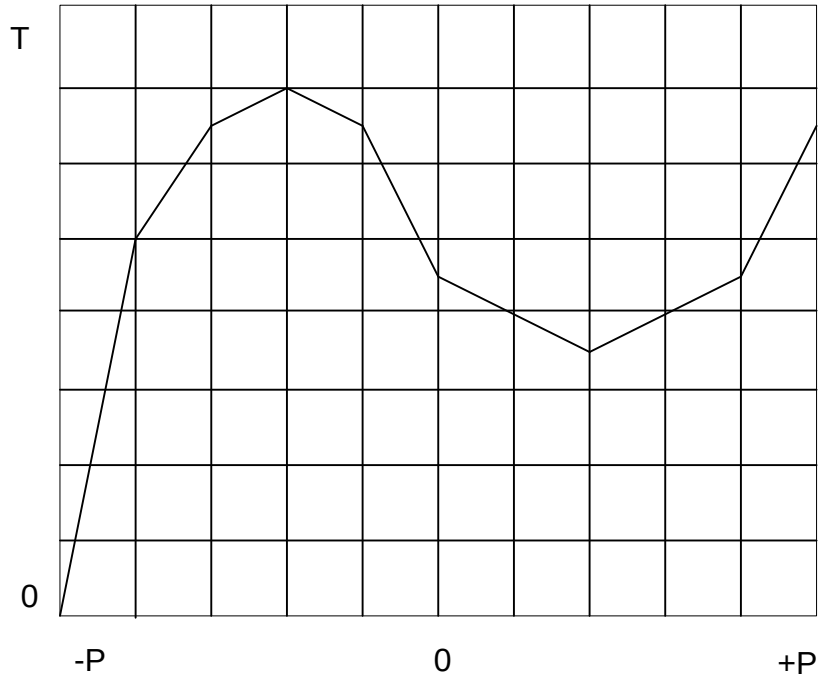
Варіант індивідуального завдання визначається номером рисунка 3.10 и рядком таблиці. Наприклад, варіант "2-а" означає, що вихідні дані для індивідуального завдання наведено на рис. 3.10,а та у рядку 2 таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

Варіант	Діапазон вхідного вектору P		Діапазон цілі T	
	от	до	от	до
1-а	-1	+1	0	+1
2-б	-2	+2	0	+2
3-в	-3	+3	-1	+1
4-г	-4	+4	-2	+2
5-а	-5	+5	-3	+3
6-б	-1	+1	0	+1
7-в	-2	+2	0	+2
8-г	-3	+3	-1	+1
9-д	-4	+4	-2	+2
Варіант	Діапазон вхідного вектору P		Діапазон цілі T	
	от	до	от	до
10-б	-5	+5	-3	+3
11-в	-1	+1	0	+1
12-г	-2	+2	0	+2
13-а	-3	+3	-1	+1
14-б	-4	+4	-2	+2
15-в	-5	+5	-3	+3

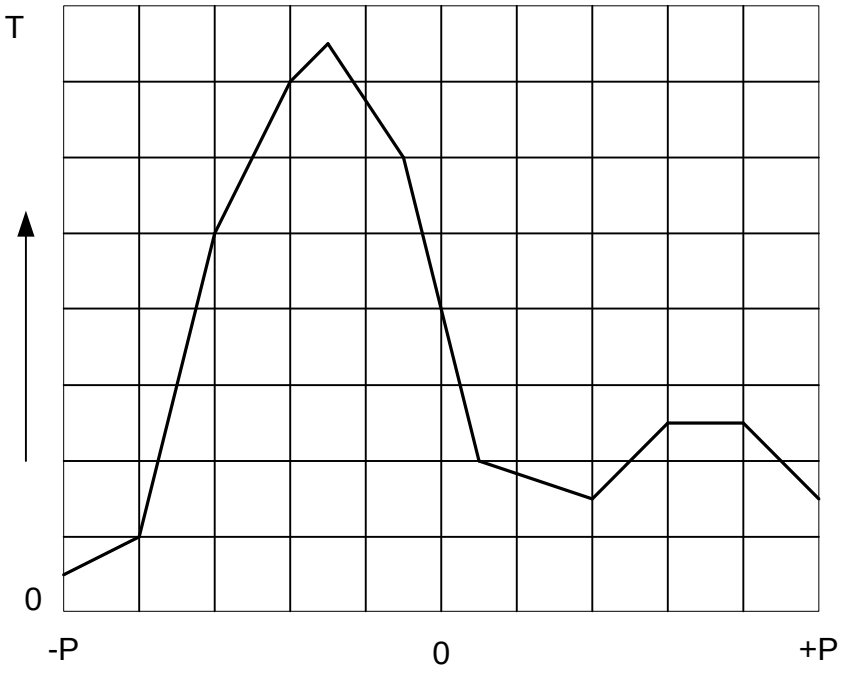


а

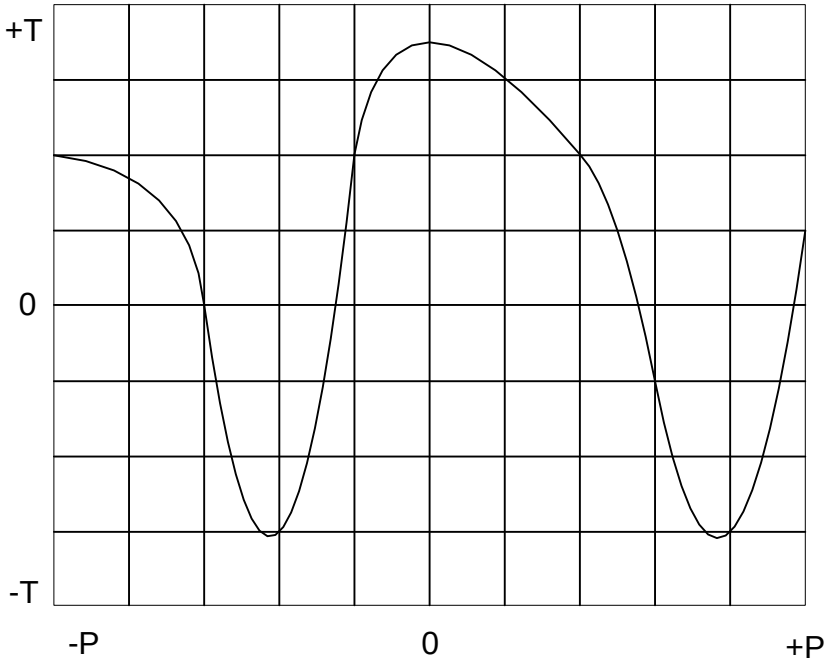


б

Рисунок 3.10 – Лист 1



в



г

Рисунок 3.10 – Лист 2

4 РАЗРАБОТКА НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РОЗРОБКА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ

Мета роботи – придбати вміння та навички у створенні та навчанні нейронних мереж для ідентифікації параметрів стаціонарних сигналів.

4.1 Постановка завдання та синтез мережі для моделювання стаціонарних сигналів

Постановка задачі передбачення стаціонарного сигналу. У цифрових системах керування безперервні сигнали видаються дискретними сигналами шляхом застосування операції квантування. Велике значення має можливість прогнозувати значення сигналу на кілька кроків уперед. Час кроку визначається періодом дискретності цифрового сигналу.

Нехай, наприклад, потрібно передбачити значення сигналу y_k на виході мережі на момент часу t_k, використовуючи для цього 5 останніх значень сигналів T. У математичному сенсі – це завдання екстраполяції функції, яка може бути сформульована в такий спосіб:

$$\begin{cases} p_{k-1} = T_{k-1}, \quad i = 1,..5; \\ y_k = \sum_{i=1}^{5} w_i p_{k-1}, \end{cases}$$

де w_i – вагові коефіцієнти мережі.

Задаємо гармонійний сигнал y_k, діапазон спостереження 0…5 с та період дискретності (такт квантування) h =0,025 с:

$$y_k = sin(4\pi\, t_k) = sin(4\pi\, kn),$$
$$t_k = t_0 : h : t_f = 0 : 0.025 : 5.$$

З позиції теорії нейронних мереж завдання екстраполяції перетворюється на завдання налаштування параметрів та навчання мережі.

Синтез нейронної мережі для передбачення значень сигналу. Оскільки сигнал стаціонарний та співвідношення між минулими та майбутніми значеннями незмінні, можна скористатися лінійною моделлю нейронної мережі. Для аналізу 5-ти сигналів мережа повинна складатися з одного нейрона з 5 входами та містити лінію затримки з п'ятьма блоками запізнення. Структура мережі наведена рисунку 4.1.

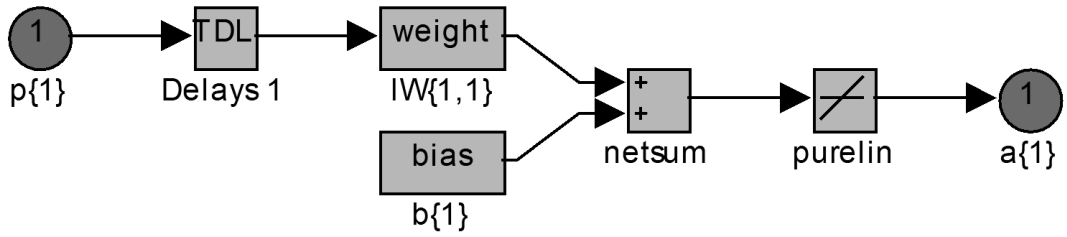


Рисунок 4.1 – Структура мережі для екстраполяції стаціонарного сигналу

Вхідну послідовність виберемо на інтервалі від 0 до 1 с, а контрольні підмножині сформуємо із значень сигналів в інтервалі від 3 до 5 с. Вхідна послідовність матиме довжину $Q1 = 1/h$, кожен вектор входу повинен бути розкладений на компоненти, які будуть відповідати запізненням сигналу.

Сформуємо сигнал, задаємо вхідний та цільовий вектори, а також задаємо структуру мережі:

```
clf;   % Очищення графічного вікна
tf=5;
h=0.025
figure(gcf)
echo on
time = 0: h:tf;  % від 0 до tf секунд
T = sin(time*4*pi);% Завдання сигналу
Q = length(T);   % Завдання довжини вектору
P = zeros(5,Q);
P(1,2:Q) = T(1,1:(Q-1));
P(2,3:Q) = T(1,1:(Q-2));
P(3,4:Q) = T(1,1:(Q-3));
P(4,5:Q) = T(1,1:(Q-4));
P(5,6:Q) = T(1,1:(Q-5));
figure(1)
plot(time,T)   % Побудова графіка
xlabel('Time');
ylabel('Target Signal');
title('Signal to be Predicted');
grid;
net = newlind(P,T);    % Завдання структури мережі
```

Графік вхідного сигналу для завдання передбачення показано на рисунку 4.2.

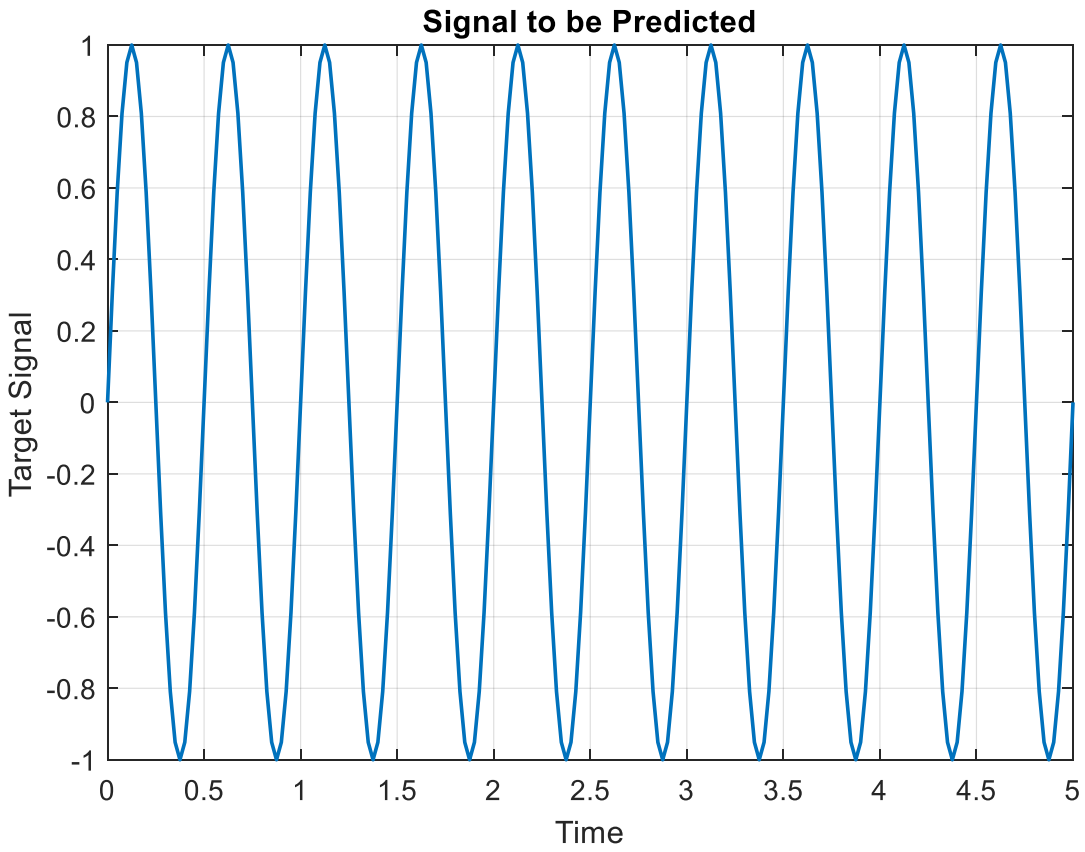


Рисунок 4.2 – Графік стаціонарного дискретного сигналу

Виконаємо перевірку мережі, використовуючи дві множини – навчальна та контрольна.

```
Q1=1/h;    % Визначення довжини навчальної множини (Q1=1/h)
P1=zeros(5,Q1);  % Обнуління матриці вхідного вектору
P1(1,1:Q1)=T(1,1:Q1);  % Зіставлення векторів входу та цілі для 5
тактів
P1(2,2:Q1)=T(1,1:(Q1-1));
P1(3,3:Q1)=T(1,1:(Q1-2));
P1(4,4:Q1)=T(1,1:(Q1-3));
P1(5,5:Q1)=T(1,1:(Q1-4));
T1=T(1,6:(Q1+5));  % Формування вектору цілі з 6 по Q1+5 такти
T2=T(1,3/h:Q);
net = newlind(P1,T1);
a=sim(net,P1(:,1:Q1));   % Моделювання мережі
t1=6:Q1+5;   %
figure(2)
plot(time(t1),a,'*r',time(1:Q1+5),T(1,1:Q1+5))
xlabel('Time,c');
grid;
```

Результати моделювання представлені на графіку рисунка 4.3.

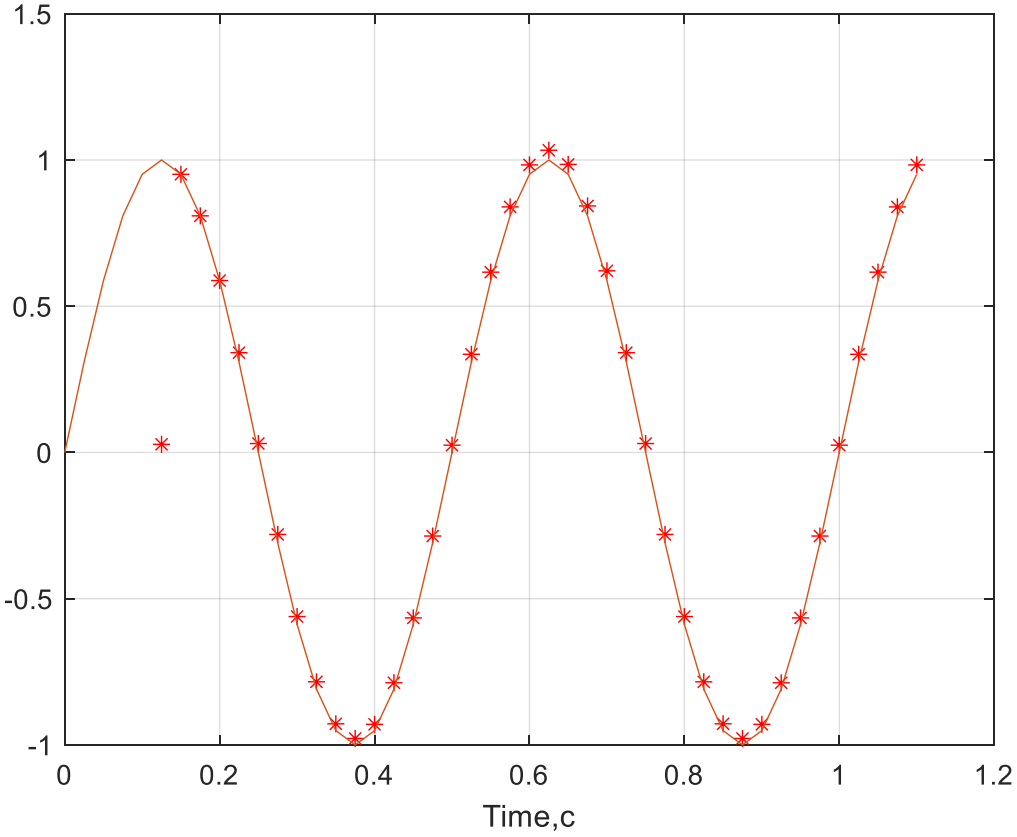


Рисунок 4.3 – Графіки зміни модельованого (зірочки) та фактичного сигналів

З рисунку 4.3 видно, що нейронна мережа забезпечує досить високу точність відстеження сигналу.

Тепер перевіримо роботу мережі, використовуючи контрольну множину. Задаємо довжину вхідної послідовності *N*1.

```
N1=20;
Tt=T2(1,1:N1);
P2(1,:)=Tt(1,:);
P2(2,2:end)=Tt(1,1:end-1);
P2(3,3:end)=Tt(1,1:end-2);
P2(4,4:end)=Tt(1,1:end-3);
P2(5,5:end)=Tt(1,1:end-4);
a=sim(net,P2);   % Моделювання мережи
figure(3),clf
h1=plot(time(1:size(P2, 2)-5), a(1:end-5),'*');
hold on
h2=plot(time(1:size(P2, 2)-5), Tt(6:end), 'r');
grid;
```

Використовуючи властивості графічного об'єкта, обчислимо похибки екстраполяції у функції довжини навчальної вибірки:

```
y1=get(h1,'YData'); y2=get(h2,'YData')
minlength=min(length(y1), length(y2));
e=y1(1:minlength)-y2(1:minlength); % Розрахунок помилки
nre=sqrt(mse(e));   % Обчислення квадратного кореня
plot(time(1:size(P2, 2)-5),e);
legend('a','T','e');
xlabel('Time,c');
ylabel('a,T,e')
```

Результати моделювання мережі та обчислення похибки екстраполяції представлені на рисунку 4.4.

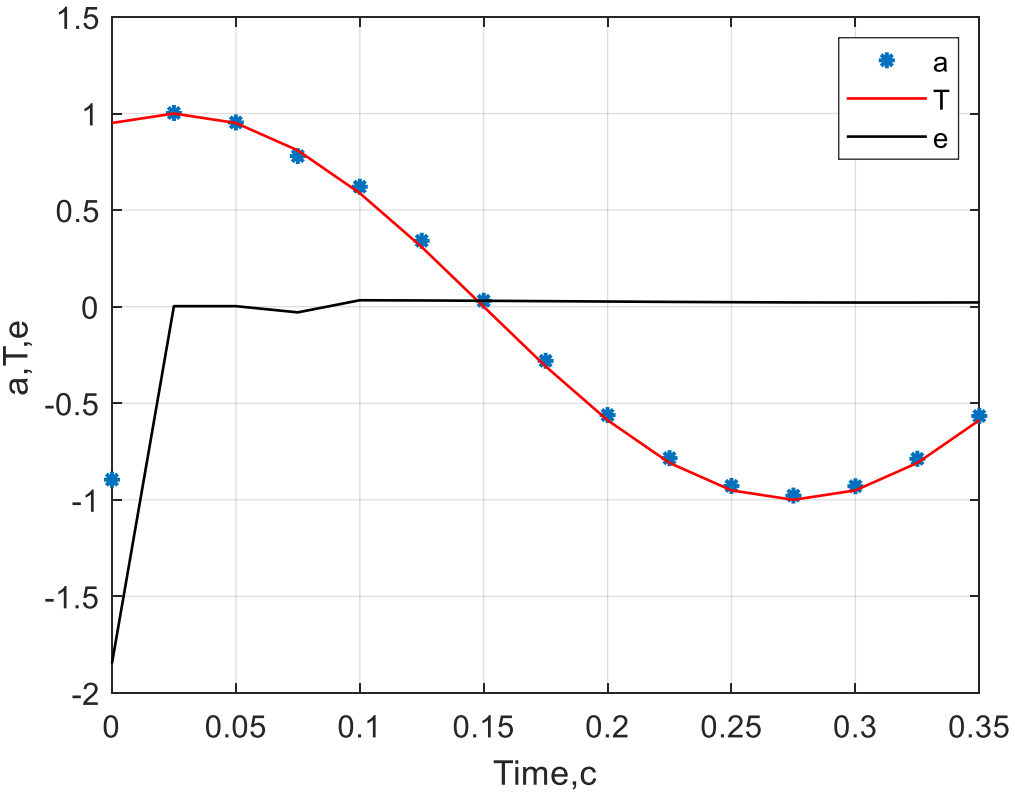


Рисунок 4.4 – Графік реакції мережі на контрольну множину

З аналізу малюнка 4.4 можна дійти невтішного висновку у тому, що нейронна мережа забезпечує достатню точність екстраполяції – помилка дорівнює $e = 0.0220$.

4.2 Методика виконання роботи

Для виконання роботи студенти отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 4.1.

У процесі виконання роботи потрібно виконати:

1. Визначити довжину вхідного вектора.
2. Сформувати навчальну послідовність (вектор мети).

3. Здійснити синтез нейронної мережі та її навчання.

4. Побудувати графіки функцій виходу мережі та зробити висновок про якість екстраполяції сигналу.

Таблиця 4.1 – Варіанти індивідуальних завдань для апроксимації функції

№ вар.	Функція	t_f	h		№ вар.	Функція	t_f	h
1	$y=\sin(2\pi t_k)$	10	0,05		11	$y=\sin(2\pi t_k)$	8	0,04
2	$y=\sin(2{,}5\pi t_k)$	7,5	0,05		12	$y=\sin(2{,}5\pi t_k)$	5	0,04
3	$y=\sin(3\pi t_k)$	6	0,02		13	$y=\sin(3\pi t_k)$	7,5	0,05
4	$y=\sin(3{,}5\pi t_k)$	5	0,02		14	$y=\sin(3{,}5\pi t_k)$	6	0,05
5	$y=\sin(4\pi t_k)$	4,5	0,02		15	$y=\sin(4\pi t_k)$	4	0,05
6	$y=\sin(4{,}5\pi t_k)$	4,25	0,01		16	$y=\sin(4{,}5\pi t_k)$	3	0,02
7	$y=\sin(5\pi t_k)$	4	0,01		17	$y=\sin(5\pi t_k)$	3	0,02
8	$y=\sin(5{,}5\pi t_k)$	3	0,01		18	$y=\sin(5{,}5\pi t_k)$	2,5	0,02
9	$y=\sin(6\pi t_k)$	2	0,005		19	$y=\sin(6\pi t_k)$	1,5	0,01
10	$y=\sin(1{,}5\pi t_k)$	8	0,04		20	$y=\sin(1{,}5\pi t_k)$	10	0,05

4.3 Зміст і захист звіту

Звіт по роботі повинен містити завдання, структуру мережі, програми та результати роботи мережі.

При захисті звіту студент повинен відповісти на питання щодо методики створення та застосування нейронної мережі для екстраполяції функцій.

4.4 Контрольні питання

1. У чому полягає сутність завдання екстраполяції функцій?
2. Що включає структура мережі для екстраполяції сигналів?
3. Як задається довжина вектора навчальної послідовності під час вирішення завдання екстраполяції сигналу?
4. Як перевіряється якість роботи нейронної мережі під час передбачення значень стаціонарного сигналу?

5 РАЗРАБОТКА НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ФИЛЬТРА

Мета роботи – придбати вміння та навички у створенні та навчанні нейронних мереж для моделювання стаціонарних фільтрів.

5.1 Постановка задачі та синтез мережі для моделювання стаціонарного фільтра

Завдання полягає у створенні мережі, яка в процесі навчання визначає параметри фільтра, а потім як модель фільтра використовується для аналізу вихідних сигналів при довільних значеннях вхідних сигналів. Перша частина цього завдання відома як завдання ідентифікації.

Розглянемо лінійний стаціонарний фільтр, що описується рекурентним виразом:

$$y[n] = -0.5y[n-1] + 1.5y[n-2] + r[n].$$

Цей цифровий фільтр другого порядку може бути представлений дискретною функцією передачі:

$$y[n] = \frac{1}{1 + 0.5z^{-1} - 1.5z^{-2}} \cdot r[n].$$

Е MATLAB такий фільтр описується М-функцією:

Y=filter([1 0.5 -1.5],1,R;

Допустимо, що на вхід фільтра подається сигнал: $r(t) = sin(10 * sin(t) * t)$.

Задаємо сигнал масивом значень з періодом дискретності 0,025 на інтервалі 5 с. Вхідну послідовність $\mathbf{P}$ задаємо на основі поточного та двох попередніх значень входу $\mathbf{X}$.

```
time = 0:0.025:5;
X = sin(10*sin(time).*time);
Q=size(X,2);
P = zeros(3,Q);
P(1,1:Q) = X(1,1:Q);
P(2,2:Q) = X(1,1:(Q-1));
P(3,3:Q) = X(1,1:(Q-2));
T = filter([1 0.5 -1.5],1,X);
%Виведемо графіки вхідного та вихідного сигналів фільтра
figure(1)
```

```
subplot(2,1,1)
plot(time,X)
axis([0 5 -2 2]);
xlabel('Time');
ylabel('Input Signal');
grid;
title('Input Signal to the System');
subplot(2,1,2)
plot(time,T)
axis([0 5 -2 2]);
xlabel('Time');
ylabel('Output Signal');
title('Output Signal of the System');
grid;
```

Графік вихідного сигналу фільтра наведено на рисунку 5.1

Завдання нейронної мережі – визначити у процесі навчання параметри фільтра, та був використовувати їх задля моделювання при довільних значеннях входу.

Оскільки фільтр має один вихід, то нейронна мережа має складатися з одного нейрона. Щоб отримати та обробити одне поточне та два значення запізнення, нейрон повинен мати три входи.

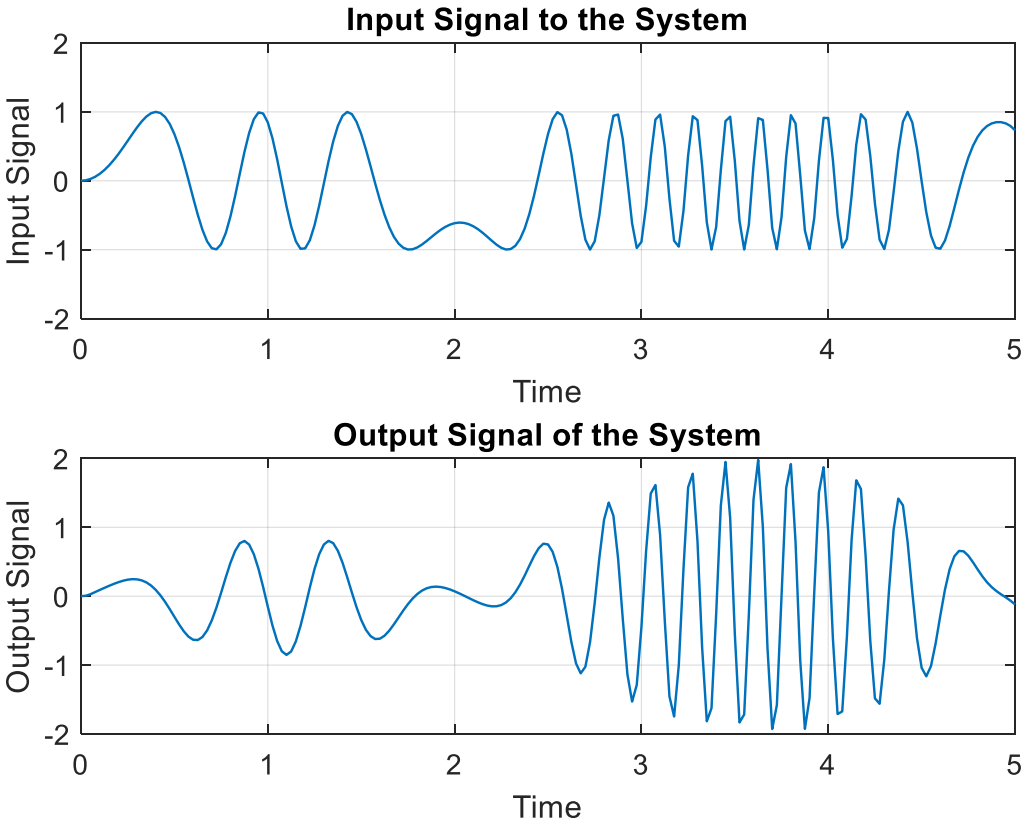


Рисунок 5.1 – Графіки вхідного та вихідного сигналів фільтра при моделюванні фільтра засобами MATLAB

Як цільовий вектор **T** приймаємо масив виходу **Y**, а вхідний послідовності **P** зіставимо поточне значення та два наступних значення входів **R**. Щоб отримати два значення, що запізнюються, введемо М-функцію затримки newlind.

Структура мережі для моделювання фільтра представлена на рисунку 5.2.

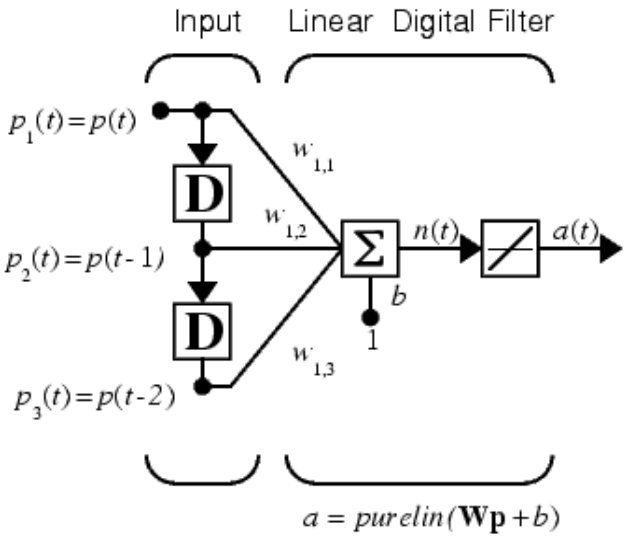


Рисунок 5.2 – Структура мережі для моделювання фільтра другого порядку

Введемо сигнали навчання та зробимо налаштування мережі:

```
R=X;
Q=size(R,2);
P=zeros(3,Q);
P(1,1:Q)=R(1,1:Q);
P(2,2:Q)=R(1,1:(Q-1));
P(3,3:Q)=R(1,1:(Q-2));
net=newlind(P,T);
net.IW{1}, net.b;
```

```
ans =
    1.0000    0.5000   -1.5000
ans =
  1×1 cell array
    {[-1.4869e-17]}
```

Для перевірки функціонування мережі порівняємо вихід **a** із цільовою послідовністю **T**:

```
a=sim(net,P);
figure(2),clf
```

```
subplot(2,1,1)
plot(time,T,'ok'),hold on
plot(time,a,'k'), grid on
axis([0 5 -2 2]);
ylabel('a- вихід НМ, T - цільова ф-ція');
% Тут же обчислимо та побудуємо графік похибки моделювання:
subplot(2,1,2)
e=T-a;
plot(time,e)
xlabel('Time, c')
ylabel('Помилка')
grid
```

Результати моделювання представлені на рисунку 5.3.

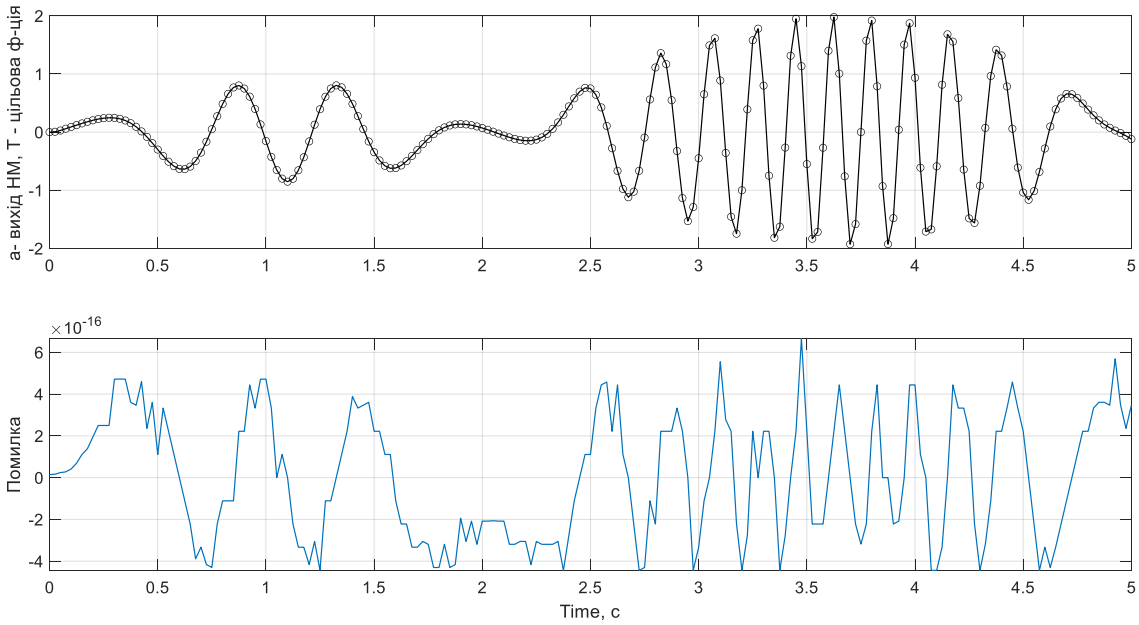


Рисунок 5.3 – Результати моделювання фільтра мережею

Результати моделювання показують, що мережа забезпечує вирішення поставленої задачі з високою точністю. Похибка моделювання знаходиться в межах точності обчислень (10^{-15}).

5.2 Методика виконання роботи

Для виконання роботи студенти отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 5.1.

При вирішенні задачі моделювання стаціонарного фільтра необхідно виконати наступне:

1. Здійснити моделювання фільтра засобами MATLAB.
2. Зробити синтез нейронної мережі для моделювання фільтра.

3. Здійснити навчання та моделювання мережі.

4. Вивести графіки результатів моделювання та оцінити якість роботи мережі.

Таблиця 5.1 – Варіанти завдань для моделювання фільтра

№ вар.	Функція вхідного сигналу	№ вар.	Функція вхідного сигналу
1	$r(t)=\sin(2*\sin(t)*t)$	11	$r(t)=\sin(2*\sin(t)*t)$
2	$r(t)=\sin(3*\sin(t)*t)$	12	$r(t)=\sin(3*\sin(t)*t)$
3	$r(t)=\sin(4*\sin(t)*t)$	13	$r(t)=\sin(4*\sin(t)*t)$
4	$r(t)=\sin(5*\sin(t)*t)$	14	$r(t)=\sin(5*\sin(t)*t)$
5	$r(t)=\sin(6*\sin(t)*t)$	15	$r(t)=\sin(6*\sin(t)*t)$
6	$r(t)=\sin(7*\sin(t)*t)$	16	$r(t)=\sin(7*\sin(t)*t)$
7	$r(t)=\sin(8*\sin(t)*t)$	17	$r(t)=\sin(8*\sin(t)*t)$
8	$r(t)=\sin(9*\sin(t)*t)$	18	$r(t)=\sin(9*\sin(t)*t)$
9	$r(t)=\sin(10*\sin(t)*t)$	19	$r(t)=\sin(10*\sin(t)*t)$
10	$r(t)=\sin(12*\sin(t)*t)$	20	$r(t)=\sin(12*\sin(t)*t)$
$y[n]=\frac{1}{1+0.5z^{-1}-1.5z^{-2}}\cdot r[n]$		$y[n]=\frac{1}{1+1.5z^{-1}-3.5z^{-2}}\cdot r[n]$	

5.3 Зміст і захист звіту

Звіт по роботі повинен містити завдання, структуру мережі, програми та результати роботи мережі.

При захисті звіту студент повинен відповісти на питання щодо методики створення та застосування нейронної мережі для моделювання стаціонарного фільтра.

5.4 Контрольні питання

1. У чому полягає суть завдання моделювання стаціонарного фільтра?
2. Як надаються параметри цифрового фільтра?
3. Що включає структура нейронної мережі для моделювання стаціонарного фільтра?

6 КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

6.1 Кластеризація за допомогою алгоритму нечітких центрів

Мета роботи: Освоїти методику знаходження центрів кластерів простору розташування сенсорів.

Завдання*:* Знайти центри кластерів сенсорів бездротової мережі, використовуючи алгоритм нечітких центрів за допомогою програми *Clustering* (Кластеризація), що входить до *Fuzzy Logic Toolbox* математичного середовища MATLAB.

Основні теоретичні відомості:

Кластеризація – це об'єднання об'єктів у групи (кластери) на основі схожості ознак для об'єктів однієї групи та відмінностей між групами.

Кластер (від англійського cluster) – гроно, пучок, скупчення, група елементів, що характеризуються якоюсь загальною властивістю.

Кластеризація допомагає уявити неоднорідні дані у наочнішому вигляді й у подальшого, зручнішого, використання цих даних.

Кластеризація може бути використана для вирішення наступних завдань:

- обробка зображень;
- класифікація;
- тематичний аналіз колекцій документів;
- побудова репрезентативної вибірки;
- аналізу експериментальних даних;
- при побудові сенсорних мереж та інш.

Кластерний аналіз призначений для розбиття безлічі об'єктів на задану чи невідому число класів на підставі деякого математичного критерію якості класифікації. Критерій якості кластеризації тією чи іншою мірою відображає такі неформальні вимоги:

- усередині груп об'єкти мають бути тісно пов'язані між собою;
- об'єкти різних груп мають бути далекі один від одного.

Ці вимоги виражають стандартну концепцію компактності класів розбиття. Вузловим моментом у кластерному аналізі вважається вибір міри близькості об'єктів (метрики), від якого вирішальним чином залежить остаточний варіант розбиття об'єктів групи при заданому алгоритмі розбиття. У кожній конкретній задачі цей вибір проводиться по-своєму, з урахуванням основних цілей дослідження, фізичної та статистичної природи інформації, що використовується і т.д.

У кластерному аналізі так само важлива відстань між цілими групами об'єктів. Наведемо приклади найбільш поширених відстаней та заходів близькості, що характеризують взаємне розташування окремих груп об'єктів.

Нехай: ω_i – *i*-я група (клас, кластер) об’єктів;

Ni – кількість об'єктів, що утворюють групу ω_i, кожен об'єкт є крапкою в *n*- мірному просторі;

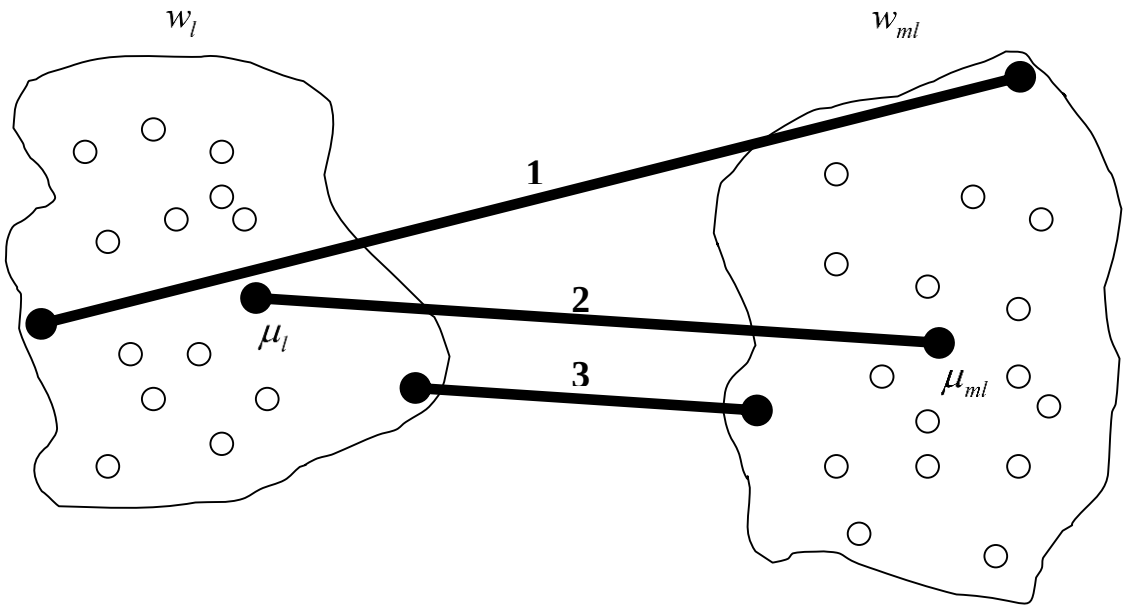
μ_i – середнє арифметичне об'єктів, що входять до ω_i (тобто. μ_i – «центр ваги» *i*-й групи);

p – число груп (кластерів);

x_i – *i*-й об’єкт кластера;

q (ω_l, ω_m) – відстань між групами ω_l та ω_m.

Різні способи визначення відстані між кластерами ω_l та ω_m (див. рис. 6.1.)



1 – по найдальших об'єктах, 2 – по центрам тяжіння, 3 – по найближчим об'єктам

Рисунок 6.1. Способи визначення відстані між кластерами ω_l та ω_m

Відстань далекого сусіда – відстань між найдальшими об'єктами кластерів (рис. 6.1 відрізок 1):

$$q_{\min}(\omega_l, \omega_m) = \max d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j), i = \overline{1, p}, j = \overline{1, p}.$$

Відстань центрів тяжіння дорівнює відстані між центральними точками кластерів (рис. 6.1 – відрізок 2):

$$q(\omega_l, \omega_m) = d(\mu_l, \mu_m).$$

Відстань найближчого сусіда є відстань між найближчими об'єктами кластерів (рис. 6.1 відрізок 3):

$$q_{\min}(\omega_l, \omega_m) = \min d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j), i = \overline{1, p}, j = \overline{1, p}.$$

Вибір тієї чи іншої міри відстані між кластерами впливає на вид геометричних угруповань об'єктів, що виділяються алгоритмами кластерного аналізу, в просторі ознак. Так, алгоритми, що ґрунтуються на відстані найближчого сусіда, добре працюють у разі угруповань, що мають складну, зокрема, ланцюжкову структуру. Відстань далекого сусіда застосовується, коли шукані угруповання утворюють у просторі ознак кулясті хмари. І проміжне місце займають алгоритми, що використовують відстані центрів тяжкості та середнього зв'язку, які найкраще працюють у разі угруповань еліпсоїдної форми.

Алгоритми кластерного аналізу відрізняються великою різноманітністю. Це можуть бути, наприклад, алгоритми, що реалізують повний перебір поєднань об'єктів або здійснюють випадкові розбиття безлічі об'єктів. У той же час більшість таких алгоритмів складається з двох етапів:

- на першому етапі задається початкове (можливо, штучне або навіть довільне) розбиття безлічі об'єктів на класи та визначається деякий математичний критерій якості автоматичної класифікації;
- • на другому етапі об'єкти переносяться з класу до класу, доки значення критерію не перестане покращуватися..

Таким чином, алгоритми кластеризації засновані на подобі образів та розміщують близькі образи в один кластер.

Виявлення центрів – це значний етап під час попередньої обробки даних, оскільки дозволяє порівняти з цими центрами функції приналежності змінних під час проектування системи нечіткого виводу.

Програма *Clustering* (Кластеризація) пакету *Fuzzy Logic Toolbox* математичного середовища MATLAB виявляє центри кластерів, тобто. точки в багатовимірному просторі даних, у яких групуються (накопичуються) експериментальні дані.

У програмі *Clustering* (Кластеризація) використовуються два алгоритми виявлення центрів кластерів: *Subtractive clustering* (що віднімає кластеризація) та *Fuzzy c-means* (алгоритм нечітких центрів).

В основі першого алгоритму лежить пропозиція, що кожна експериментальна точка може бути центром кластера, при цьому спочатку для кожної точки обчислюється міра правдоподібності даного припущення («потенціал точки»), заснована на щільності крапок у заданій околиці. Подальші обчислення відбуваються ітеративне:

1) точка з найбільшим потенціалом оголошується центром першого кластеру;

2) із зазначеної околиці цієї точки видаляються всі інші точки;

3) з точок, що залишилися, оголошується центр наступного кластера і т.д., поки не будуть розглянуті (виключені або оголошені центрами) всі точки.

Алгоритм Fuzzy c-means є більш точним, для його роботи потрібне завдання таких опцій як число кластерів і число ітерацій. Розглянемо його докладніше.

Кластеризація на основі алгоритму нечітких центрів.

На основі нечіткого c-means алгоритму виконується кластеризація даних. Цей алгоритм кластеризації запропонував Джеймс Бездек (James Bezdek) у 1981 році.

Існує безліч методів кластеризації, які можна класифікувати на чіткі та нечіткі. Чіткі методи кластеризації розбивають вихідне безліч об'єктів X на кілька підмножин, що не перетинаються. При цьому будь-який об'єкт із X належить лише одному кластеру. Нечіткі методи кластеризації дозволяють одному й тому об'єкту належати одночасно кількох (чи навіть усім) кластерам, але з різною мірою істинності. Нечітка кластеризація у багатьох ситуаціях «природніша», ніж чітка, наприклад, для об'єктів, розташованих на межі кластерів.

Завдання нечіткої кластеризації ставиться так:

Дано:

- $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, ..\mathbf{x}_n^T)^T$ – об'єкти, що підлягають кластеризації, де *n* – кількість об'єктів, T – символ транспонування. Кожен об'єкт $\mathbf{x}_k = (x_{k_1}, x_{k_2}, ..., x_{k_p})^T$, $k = \overline{1.n}$ являє собою точку в p-вимірному просторі ознак;
- *c* – кількість кластерів ($2 \le c < n$).

Необхідно кожному елементу множини поставити у відповідність до ступеня належності до класів.

Елементи одного кластера повинні бути такі близькі один до одного, як це тільки можливо, і, одночасно, кластери повинні бути на найбільшому віддаленні один від одного. Для забезпечення керованості процесу кластеризації необхідно використовувати міру близькості, якою зазвичай визначають відстань між двома об'єктами (точками в *p*-мірному просторі) $\mathbf{x}_k$ та $\mathbf{x}_l$ у вигляді речової функції $d : x \times x \to R^+$ такий що:

$$d(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_l) = d_{kl} \ge 0;$$
$$d_{kl} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x}_k = \mathbf{x}_l;$$
$$d_{kl} = d_{lk}.$$

Додатково, якщо функція d задовольняє правилу трикутника, тобто. $d_{kl} \le d_{kj} + d_{jl}$, тоді ця функція є метрикою, хоча виконання цієї властивості не завжди необхідне задач кластеризації.

Будь-яке розбиття безлічі $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, ...\mathbf{x}_n^T)^T$ на нечіткі підмножини S_i ($i = \overline{1.c}$) може бути повністю описано функцією приналежності $\eta_{S_i} : \mathbf{X} \to [0,1]$.

Позначимо через η_{ik} – ступінь належності об'єкта $\mathbf{x}_k = (x_{k_1}, x_{k_2}, ..., x_{k_p})^T$, к підмножиною S_i, тобто $\eta_{ik} \equiv \eta_{S_i}(\mathbf{x}_k)$, а через $\mathbf{V}_{cn}$ – безліч усіх дійсних матриць розміром $c \times n$. Тоді нечітким з-розбиттям (або матрицею ступенів приналежності) називається матриця $\mathbf{M} = [\eta_{ik}] \in V_{cn}$ при виконанні наступних умов:

$$\eta_{ik} \in [0,1], i = \overline{1.c}, k = \overline{1.n}; \quad (4.1)$$

$$\sum_{i=1}^{c} \eta_{ik} = 1, k = \overline{1.n}; \quad (4.2)$$

$$\sum_{k=1}^{n} \eta_{ik} \in (0, n), i = \overline{1.c}. \quad (4.3)$$

На відміну від чіткого, при нечіткому с-розбиття будь-який об'єкт одночасно належить до різних кластерів, але з різним ступенем. Умови (4.2) та (4.3) потребують лише, щоб сума ступенів належності об'єкта до всіх кластерів була нормалізована до 1, а також щоб кількість кластерів, до яких належить об'єкт не перевищувала *c*.

Позначимо центри кластерів, тобто. точки в *p*-мірному просторі, навколо яких сконцентровані відповідні об'єкти, через $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, ..., v_{ip})$, $i = \overline{1.c}$

При використанні евклідової відстані завдання нечіткої кластеризації полягає у знаходженні такої матриці ступенів належності **M** та таких координат центрів кластерів $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, ..., \mathbf{v}_c)$, які забезпечують мінімум наступного критерію:

$$\sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{n} (\eta_{ik})^m \cdot \|\mathbf{x}_k - \mathbf{v}_i\|^2 \to \min,$$

де $\mathbf{v}_i = \dfrac{\sum_{k=1}^{n} (\eta_{ik})^m \cdot \mathbf{x}_k}{\sum_{k=1}^{n} \eta_{ik}}$ – центр *i*-го кластера, $i = \overline{1.c}$, m – так звана експоненційна вага ($m \geq 1$). У математиці під позначенням $\|\bullet\|$ зазвичай розуміють норму, тобто. функцію, задану на векторному просторі та узагальнюючу поняття довжини вектору.

Значення експоненційної ваги встановлюється на початок кластеризації. Експонентна вага *m* впливає на матрицю ступенів належності **M**. Чим більше *m*, тим кінцева матриця *c*- розбиття стає більш «розмазаною», а при $m \to \infty$ все об'єкти належать всім кластерам

з однаковим ступенем приналежності, що дуже поганим рішенням. Експонентна вага дозволяє також при формуванні координат центрів кластерів посилити вплив об'єктів з великими значеннями ступенів належності та зменшити вплив об'єктів з малими значеннями ступенів належності. На даний момент не існує теоретично обґрунтованого правила вибору значення *m*. Зазвичай встановлюють *m=2.*

Аналітичного вирішення задачі знаходження оптимальних координат центрів кластерів та матриці ступенів належності не існує, тому вона вирішується чисельне. У середовищі MATLAB алгоритм нечітких центрів реалізовано у функції *fcm*.

Функція *fcm* може мати три вхідні аргументи:

1) **X** – матриця, що представляє дані, що підлягають кластеризації. Кожен рядок матриці відповідає одному об'єкту (образу);
2) *c* – кількість кластерів, яка має бути отримана в результаті виконання функції *fcm*. Кількість кластерів має бути більшою за 1 і менше числа образів, заданих матрицею **X.**
3) *options* – необов'язковий аргумент, що встановлює параметри алгоритму кластеризації:

- options(1) – значення експоненційної ваги (за замовчуванням – 2.0);
- options(2) – максимальна кількість ітерацій алгоритму кластеризації (за замовчуванням значення - 100);
- options(3) – мінімально допустиме значення покращення цільової функції за одну ітерацію алгоритму (за замовчуванням значення – 0.000001);
- options(4) – виведення проміжних результатів під час роботи функції fcm (значення за замовчуванням – 1).

Для використання значень за промовчанням можна ввести NaN як значення відповідної координати вектору *options*.

Алгоритм кластеризації зупиняється, коли виконано максимальну кількість ітерацій або коли покращення цільової функції за одну ітерацію менше вказаного мінімально допустимого значення.

Функція *fcm* має три вихідні аргументи:

1) **V** – матриця координат центрів кластерів, отриманих у результаті кластеризації. Кожен рядок матриці відповідає центру одного кластера;
2) **M** – матриця ступенів належності образів до кластерів. Кожен рядок матриці відповідає функції приналежності одного кластера;
3) **obj_fcn** – вектор значень цільової функції на кожній ітерації алгоритму кластеризації.

Модуль графічного інтерфейсу Findcluster:

GUI-модуль (Модуль графічного інтерфейсу) **Findcluster** дозволяє автоматично знаходити центри кластерів багатовимірних даних за допомогою нечіткого *c-means* алгоритму та алгоритму кластеризації, що віднімає (*subtractive clustering*). Завантаження модуля **Findcluster** здійснюється за командою **findcluster.** Основне графічне вікно модуля **Findcluster** із зазначенням призначення функціональних областей наведено на рис. 6.2.

Модуль **Findcluster** із зазначенням призначення функціональних областей наведено на рисотримачем 7 верхніх типових меню графічного вікна. 2 (**File (Файл), Edit (Редагування)**, **View (Огляд)**, **Insert (Вставка)**, **Tools (Інструменти)**, **Windows (Вікна)** та **Help (Допомога)**), область візуалізації, область завантаження даних, область кластеризації, область виведення поточної інформації, а також кнопки **Info (Інформація)** та **Close (Зачинити)**, які дозволяють викликати вікно довідки та закрити модуль, відповідно.

Область візуалізації

У цій галузі у двовимірному просторі виводяться експериментальні дані (образи) та знайдені центри кластерів. Для образів використовується маркер у вигляді червоного кола (o), а центрів кластерів – маркер як чорної точки ( ).

В області також розташовані меню вибору координатних осей **X-axis** та **Y-axis**, що дозволяють асоціювати ознаки образів з осями абсцис та ординат.

Область загрузки даних

У цій області, яка розташована у верхньому правому куті вікна, знаходиться кнопка **Load Data (Завантаження даних)**. Натискання цієї кнопки дозволяє завантажити дані для кластеризації, що зберігаються на диску. Після натискання кнопки **Load Data…** відкривається типове вікно відкриття файлу. У файлі дані повинні бути записані рядково, тобто кожному образу повинен відповідати один рядок файлу даних.

Область виведення поточної інформації

У цій галузі, яка розташована внизу графічного вікна, виводиться найважливіша поточна інформація, наприклад, стан модуля, номер ітерації алгоритму кластеризації, значення цільової функції тощо..

Область кластеризації

У цій галузі користувач може вибрати алгоритм кластеризації, встановити параметри алгоритму кластеризації, провести кластеризацію та зберегти координати центрів кластерів у вигляді файлу. В області розташовані наступні меню та кнопки.

Меню **Method (Метод)** дозволяє вибрати один із двох алгоритмів кластеризації:

- **subtractiv** – алгоритм віднімання кластеризації;
- **fcm -** нечіткий c-means алгоритм.

При виборі алгоритму кластеризації, що віднімає, графічне вікно модуля **Findcluster** має вигляд, показаний на рис. 6.2.

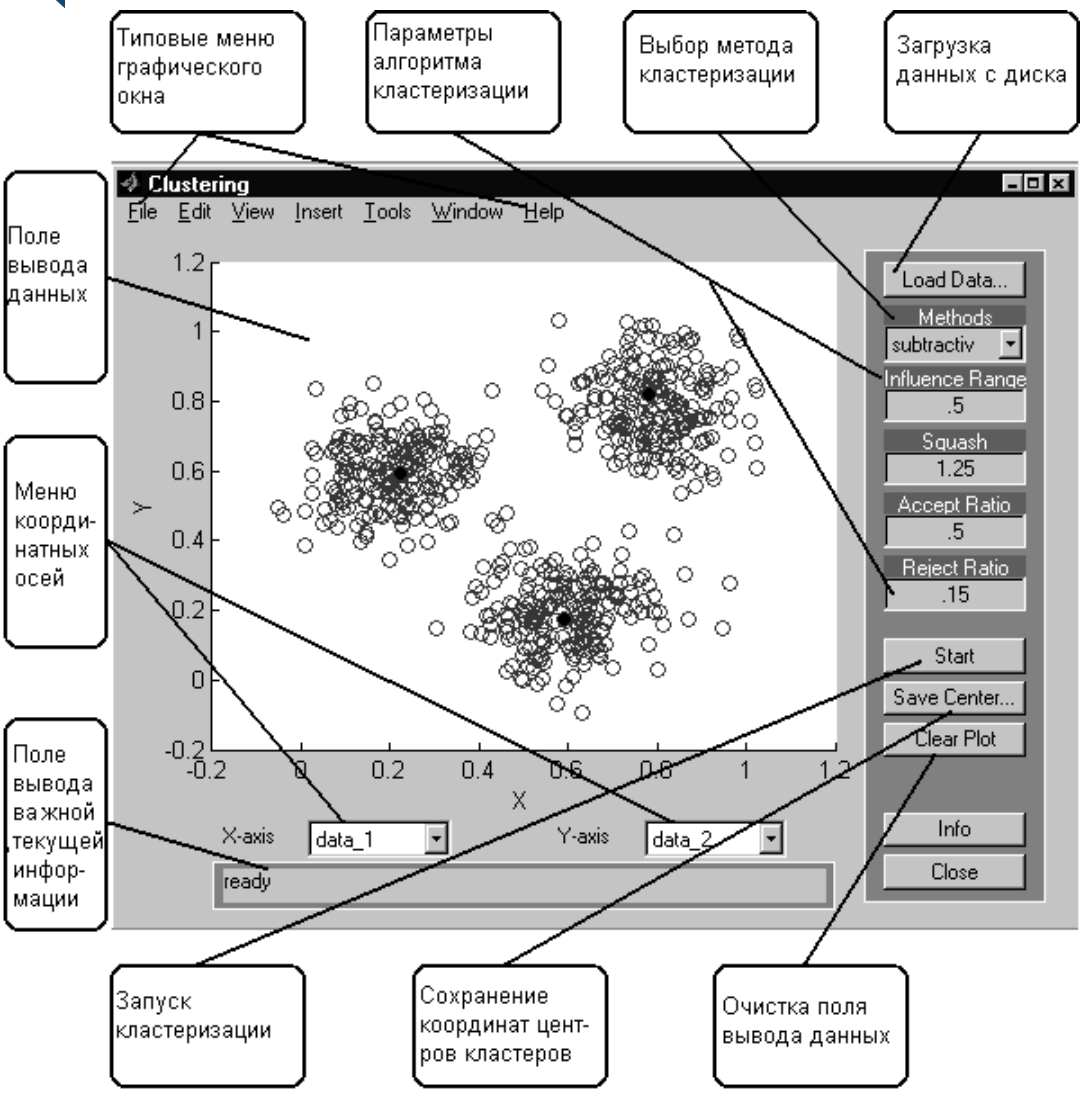


Рисунок 6.2 - Головне вікно модуля ***Findcluster***

У цьому випадку користувач має можливість встановити значення наступних параметрів алгоритму **Influence Range (Діапазон впливу)**, **Squash (Давка)**, **Accept Ratio (Коефіцієнт, що приймається) та Reject Ratio (Відхилений коефіцієнт)**, смысл которых объяснен в описании функции **subclust**.

При виборі нечіткого *c-means* алгоритму область кластеризації набуває вигляду, зображеного на рис. 6.3. У цьому випадку користувач має можливість встановити значення наступних параметрів:

- **Cluster Num. –** кількість кластерів;
- **Max Iteration # -** максимальна кількість ітерацій алгоритму;
- **Min –** мінімально допустиме значення покращення цільової функції за одну ітерацію алгоритму;
- **Exponent –** значення експоненційної ваги.

Рисунок 6.3 – Область кластеризації

Кнопка **Start –** запускає кластеризацію. У разі використання алгоритму fcm значення координат центрів кластерів виводяться у вікні візуалізації після кожної ітерації. При використанні алгоритму, що віднімає, відкривається додаткове вікно (див. рис. 6.3), що показує динаміку процес кластеризації. Координати центрів кластерів виводяться після закінчення алгоритму.

Кнопка **Clear Plot** запускає кластеризацію. У разі використання алгоритму fcm значення координат центрів кластерів виводяться у вікні візуалізації після кожної ітерації. При використанні алгоритму, що віднімає, відкривається додаткове вікно (див. рис. 6.3), що показує динаміку процес кластеризації. Координати центрів кластерів виводяться після закінчення алгоритму).

```
0.636308 0.211547 0.608300
0.595761 -0.018493 0.580148
0.591420 0.172150 0.487198
0.509358 0.193506 0.385195
0.380619 0.140240 0.577906
0.386364 0.235873 0.423574
0.611046 0.061674 0.638085
0.502620 0.091982 0.584804
0.625099 0.093233 0.324443
0.492908 0.131983 0.302384
0.717591 0.314972 0.868287
```

Рисунок 6.4 - Файл clusterdemo.dat

Приклад виконання:

1) загрузим файл даних MATLABR2021b\toolbox\fuzzy\fuzdemos\ clusterdemo.dat з допомогою кнопки «Load Data»;

2) виберемо алгоритм кластеризації *Fuzzy c-means (fcm),* з допомогою кнопки «Method»;

3) задаємо число кластерів рівне 3, за допомогою кнопки опції «Cluster num»;

4) поставимо число ітерацій рівне 100, за допомогою кнопки опції «Max Iteration#»;

5) натискаємо кнопку Start та отримуємо результат (див. рис. 6.5).

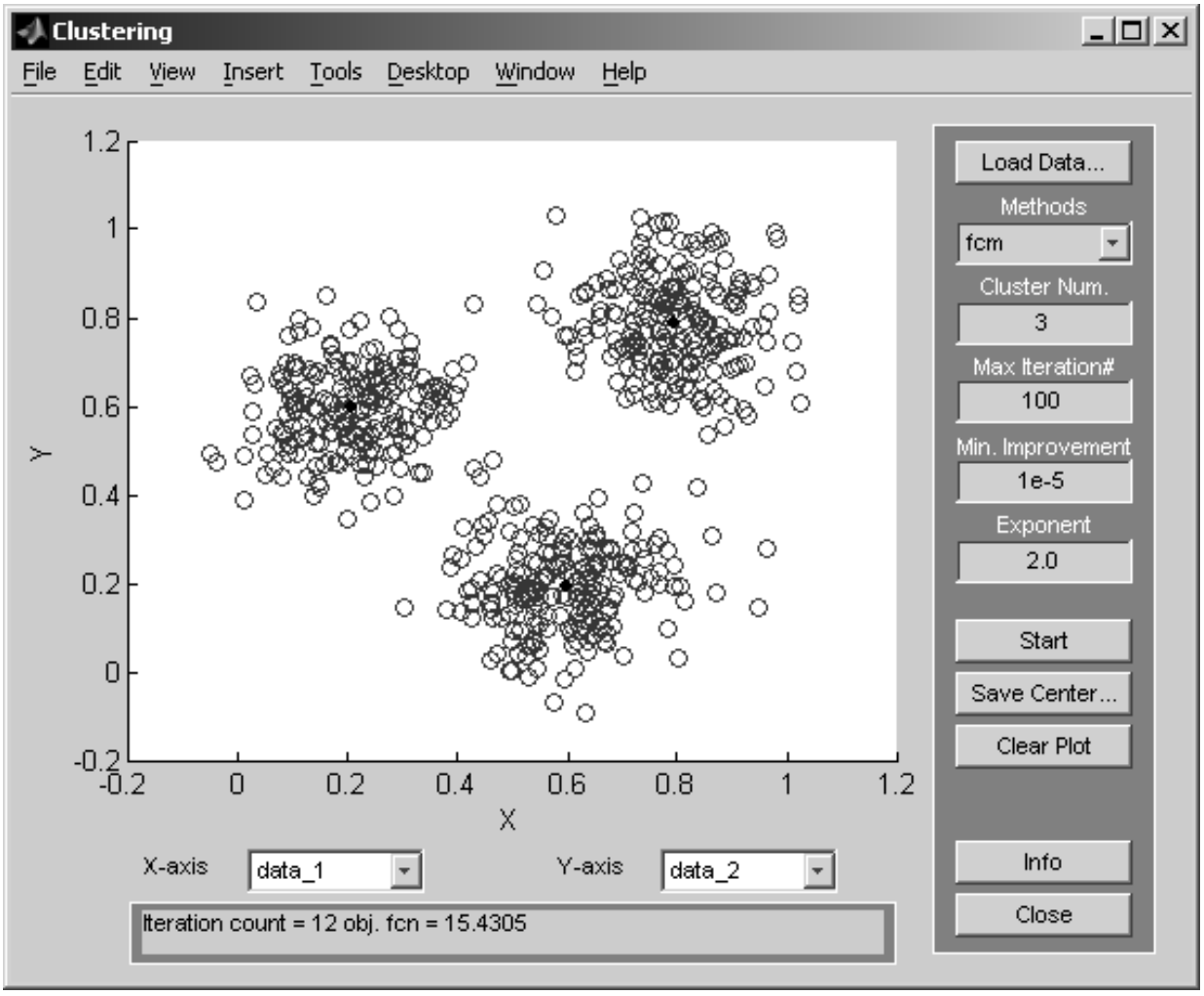


Рисунок 6.5 - Результат роботи програми Clustering (Центри кластерів пофарбовані в чорний колір).

При збільшенні кількості кластерів до 30 отримаємо результат, поданий на рис. 6.6.

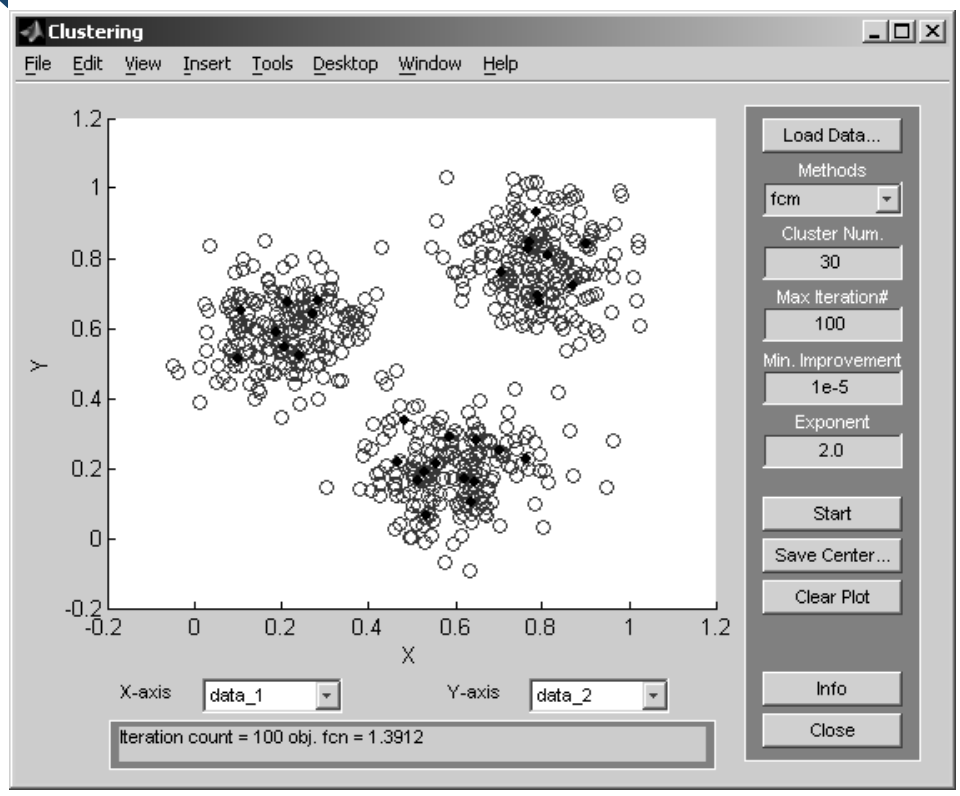


Рисунок 6.6 - Результат роботи програми Clustering (Центри кластерів пофарбовані в чорний колір).

Приклад.

Функція командного рядка fem призначена для вирішення задачі нечіткої кластеризації з використанням алгоритму FCM. Вона може бути викликана в одному з наступних форматів:

[center, U, obj_fcn) = fcm(data, cluster_n) або

[center, U, obj_fcn] = fcm(data, cluster_n, options)

Вхіднимн аргументами цієї функції є:

- **data**: матриця початкових даних X кластеризації, s-рядок якої представляє інформацію про один об'єкт нечіткої кластеризації $a_s \in A$ у формі векторе $x^s = (x^s_1, x^s_2, ..., x^s_N)$, x_{sj} – кількісне значення ознаки $p_j \in P$ для об'єкта даних $a_s \in A$, s=1, 2,..., S –кількість екземплярів кластеризації, N – кількість параметрів (ознак), що описують один екземпляр (або кластер);

- **cluster_n**: кількість шуканих нечітких кластерів $v \in V$ (більше одиниці).

Вихідними аргументами цієї функції є:

- center: матриця центрів шуканих нечітких кластерів $C = (C^1, C^2, ..., CV)^T$, v = 1, 2, ..., V, кожен рядок якої представляє собою координати центру одного з нечітких кластерів у формі вектор $C^v = (C^v_1, C^v_2, \ldots, C^v_N)$;

- U: матриця значень функцій приналежності шуканого нечіткого розбиття $u_s = (u^s_1, u^s_2, ..., u^s_V)$, $u^s_v \hat{I} [0,1]$;

obj_fcn: значення цільової функції J(x,u,C) на кожній з ітерацій роботи алгоритму FCM.

Функція fcm(data, cluster_n, options) може бути викликана з додатковими аргументами options, які призначені для управління процесом нечіткої кластеризації, а також для зміни критерію зупинки роботи алгоритму і відображення інформації на екрані монітора.

Ці додаткові аргументи мають наступні значення:

- options (1) : експоненціальна вага m для розрахунку матриці нечіткого розбиття U (за умовчанням це значення дорівнює т=2);
- options (2): максимальне число ітерацій k (за умовчанням це значення дорівнює k=100);
- options (3): параметр збіжності алгоритму e (за умовчанням це значення дорівнює e=0.00001);
- options (4): інформація про поточну ітерацію, що відображується на екрані монітора (за умовчанням це значення дорівнює 1).

Якщо будь-яке із значень додаткових аргументів дорівнює NAN (не число), то для цього аргументу використовується значення за умовчанням. Функція fcm закінчує свою роботу, коли алгоритм FCM виконає максимальну кількість ітерацій k, або коли різниця між значеннями цільових функцій J(x,u,C) на двох послідовних ітераціях буде менше заданого апріорі значення параметра збіжності алгоритму e.

Функція *fcm* реалізована у вигляді m-файлу і використовує, у свою чергу, три інші функції: функцію *initfcm* для формування матриці вихідного розбиття деяким випадковим чином, функцію *distfcm* розрахунку матриці відстаней між точками даних та центрами кластерів та функцію *stepf cm* для значень цільової функцій належності об'єктів нечітким кластерам на кожній ітерації роботи алгоритму FCM. Всі ці функції також реалізовані у вигляді m-файлів і знаходяться у папці C:\MATLAB\toolbox\fuzzy\fuzzy.

Розглянемо множину даних, що містяться в системі MATLAB і використовуються як тестова сукупність об’єктів нечіткої кластеризації. Ці дані представляють собою матрицю спостережень X розмірністю 140x2, яка міститься у файлі fcmdata.dat, що поставляється разом з системою MATLAB. В цьому випадку матриця спостережень X відповідає 140 об’єктам, для кожного з яких виконані виміри по двох ознаках, що є зручним для візуалізації вихідних даних і результатів нечіткої кластеризації в двовимірному просторі на площині. Графік координат точок на площині, відповідних об’єктам нечіткої кластеризації, представлений на рис. 6.7.

У лістингу 1 наводиться послідовність команд, які забезпечують рішення задачі нечіткої кластеризації множини даних X і візуалізацію отриманих результатів. В даному прикладі використовується перший формат запису функції fcm.

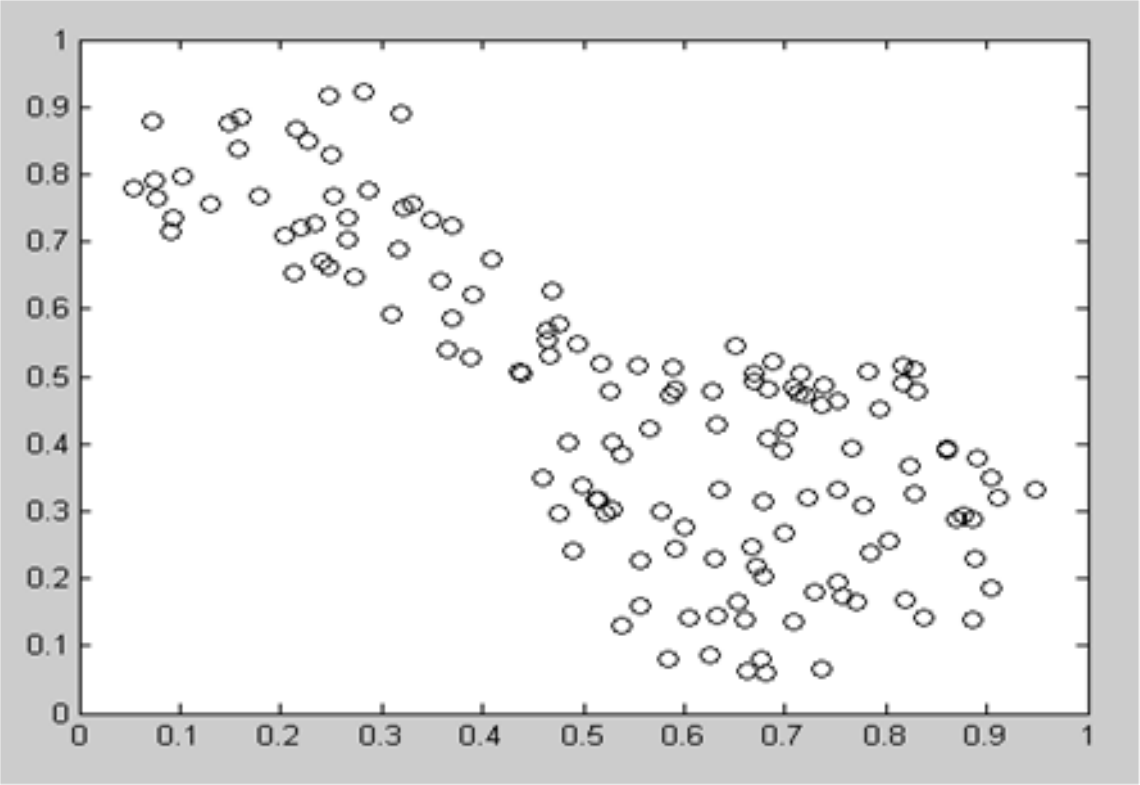


Рисунок 6.7 – Множина об'єктів нечіткої кластеризації

Лістинг 1

```
load fcmdata.dat
plot(fcmdata(:, 1), fcmdata(:,2), 'o', 'color', 'k')
[center, U, obj_fcm] = fcm(fcmdata, 2);
maxU =  max(U);
index1 = find(U(1, :) == maxU);
index2 = find(U(2, :)== maxU);
line(fcmdata(index1, 1), fcmdata(index1, 2), 'linestyle', 'none', 'marker', 'o',
'color', 'g');
line(fcmdata(index2, 1), fcmdata(index2, 2), 'linestyle', 'none', 'marker', 'x',
'color', 'r');
hold on
plot(center(1,1), center(1,2), 'ko', 'MarkerSize', 12, 'LineWidth', 2)
plot(center(2,1), center(2,2), 'kx', 'MarkerSize', 12, 'LineWidth', 2)
[center, U, obj_fcm] = fcm(fcmdata, 2)
```

Результат рішення задачі нечіткої кластеризації для двох нечітких кластерів з використанням вказаної послідовності команд може бути візуалізований (див. рис. 6.8).

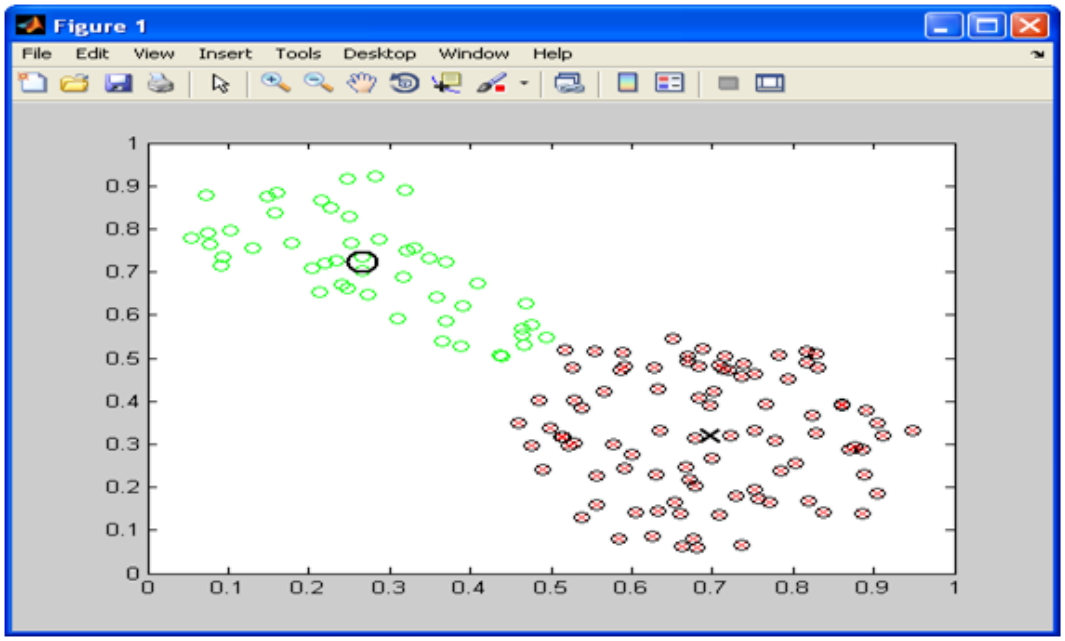


Рисунок 6.8 – Результат рішення задачі нечіткої кластеризації

Якщо після запису функції fcm в третьому рядку не вказувати крапку з комою (;), то у вікні команд відображуватимуться значення координат центрів нечітких кластерів, значення функцій приналежності об'єктів нечітким кластерам і значення цільової функції на кожній з ітерацій роботи алгоритму FCM (див. рис. 6.9).

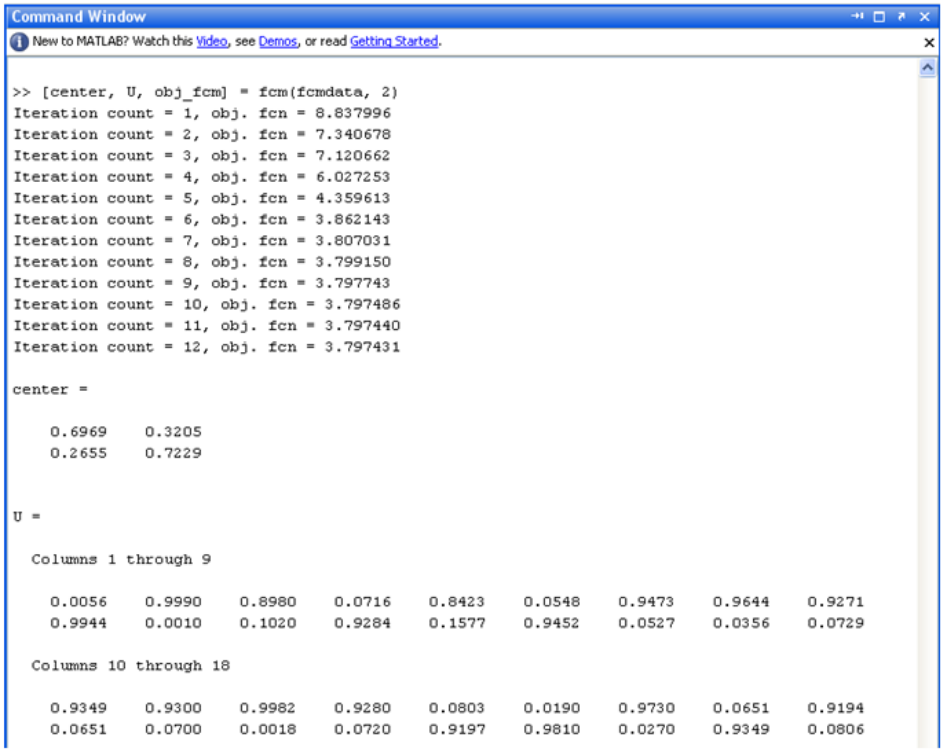


Рисунок 6.9 – Результат рішення задачі нечіткої кластеризації в командному вікні системи Matlab

Контрольні питання:

1. Яка програма використовувалася виявлення центрів кластерів?
2. Дайте визначення кластеризації.
3. Для яких завдань можна використовувати кластеризація?
4. Як можна визначити відстань між кластерами?
5. Назвіть етапи алгоритму кластерного аналізу.
6. Як визначаються центри кластерів?

6.2. Кластеризація за допомогою нейронних мереж

Цель роботи: освоїти основні принципи вирішення задачі кластеризації з використанням нейронних мереж з шаром Коханена і карт, що самоорганізуються.

Завдання: використовуючи вбудовані функції пакету нейронних мереж математичного середовища MATLAB вирішити обрану задачу кластеризації, а також розглянути використання карт, що самоорганізуються..

Поняття кластеризації. Завдання кластеризації (категоризації, класифікації " без вчителя ") – завдання розміщення вхідних векторів (образів) за категоріями (кластерам), те щоб близькі вектори (подібні образи) опинилися у однієї категорії. Відмінність завдання кластеризації від схожої неї завдання класифікації у тому, що набір категорій спочатку не заданий й у процесі навчання нейронної мережі. Прикладом завдання кластеризації є завдання стиснення інформації шляхом зменшення різноманітності даних.

Кластеризація може бути використана для вирішення наступних завдань:

- обробка зображення;
- класифікація;
- тематичний аналіз колекцій документів;
- побудова репрезентативної вибірки.

Методи кластеризації з допомогою нейронних мереж є розвитком класичних методів кластеризації. Наприклад, метод кластеризації векторів з допомогою мережі Кохонена містить у основі метод *K середніх*. У той же час нейронні мережі є набагато більш гнучким інструментом у застосуванні до даних, що мають великий об'єм та надмірну розмірність..

Приклад виконання:

Задача. Використовуючи вбудовані функції пакета нейронних мереж математичного середовища MATLAB, побудувати нейронну мережу з шаром Коханена, яка безліч вхідних даних (сенсорів)

розділить на кластери і виявить їх центри (місто встановлення шлюзу). На навчену мережу подати новий вхідний вектор і визначити до якого кластера він належить.

Для створення нейронної мережі із шаром Коханена скористаємося вбудованою в середу MATLAB функцією ***newc***:

```
X=[0 1;0 1];                    % Завдання діапазону зміни елементів
clusters=5;                     % Завдання кількість кластерів
points=5;                       % Завдання кількість точок у кластері
std_dev=0.01;
P=nngenc(X,clusters,points,std_dev);    % Моделювання вхідних даних
h=newc([0 1; 0 1],5,.1)                 % створення шару Коханена
h.trainParam.epochs=50;                 % Завдання кількості циклів навчання
h=train(h,P)
w=h.IW{1};
% виведення графіків вихідних даних та виявлених центрів кластерів
plot(P(1,:),P(2,:),'^r'),grid;
hold on; plot(w(:,1),w(:,2),'ob');
xlabel('p(1)');
ylabel('p(2)');
A=0.6
B=0.5
p=[A;B];                        % Завдання нового вхідного вектора
plot(A,B,'+k')
y=sim(h,p)                      % Опитування мережи
```

Результат роботи програми представлено на рис. 6.10. Крім того, його можна побачити у командному вікні:

y = (4,1) 1

Пред'явлений вектор віднесено до четвертого кластера.

Розглянемо застосування нейронної мережі із шаром Кохонена для кластеризації масиву даних із файлу clusterdemo.dat, вже використаного нами. Цей масив має розмірність 600x3. Використовуємо з файлу матрицю, що складається з перших двох стовпців і всіх рядків. Визначимо для цієї множини 9 кластерів, після чого подамо новий вектор і визначимо номер кластера, до якого він віднесений:

```
load clusterdemo.dat
P=[clusterdemo(:,1)'; clusterdemo(:,2)']*100
% створюємо НС Кохонена з 9 кластерами (нормальний росто-ваговий показник, надлишок ваги та недолік ваги)
```

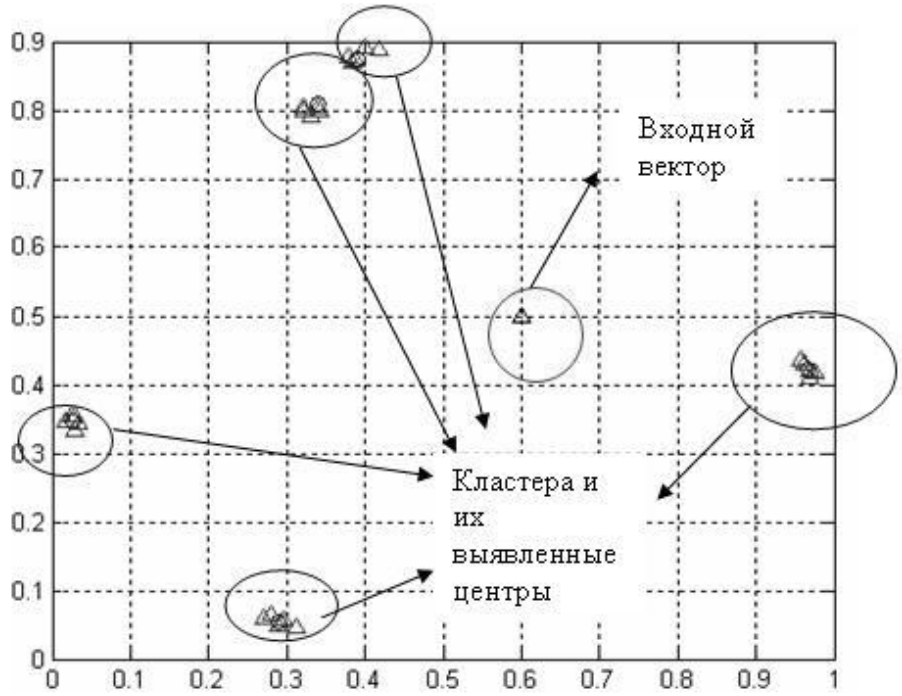


Рисунок 6.10 – Виявлені центри кластерів

```
h=newc([0 105; 0 105],9,.1)
h.trainParam.epochs=100; % Завдання кількості циклів навчання
h=train(h,P)
w=h.IW{1}
plot(P(1,:),P(2,:),'^r');
hold on; plot(w(:,1),w(:,2),'ob');
A=62
B=50
p=[A;B]; % Задание нового входного вектора
plot(A,B,'+k'),grid
y=sim(h,p)
```

Результат роботи програми представлено на рис. 6.11. Крім того, його можна побачити у командному вікні:

```
w =
 82.0621 89.6343
 60.3012 8.5841
 15.0290 66.3286
 46.3310 19.4929
 67.0821 27.2685
 86.8517 69.9695
 34.1376 64.4572
 14.8135 47.9045
 69.8167 73.3353
y = (5,1) 1
```

Пред'явлений вектор віднесено до п'ятого кластера, центр якого має координати. (*67.0821, 27.2685*).

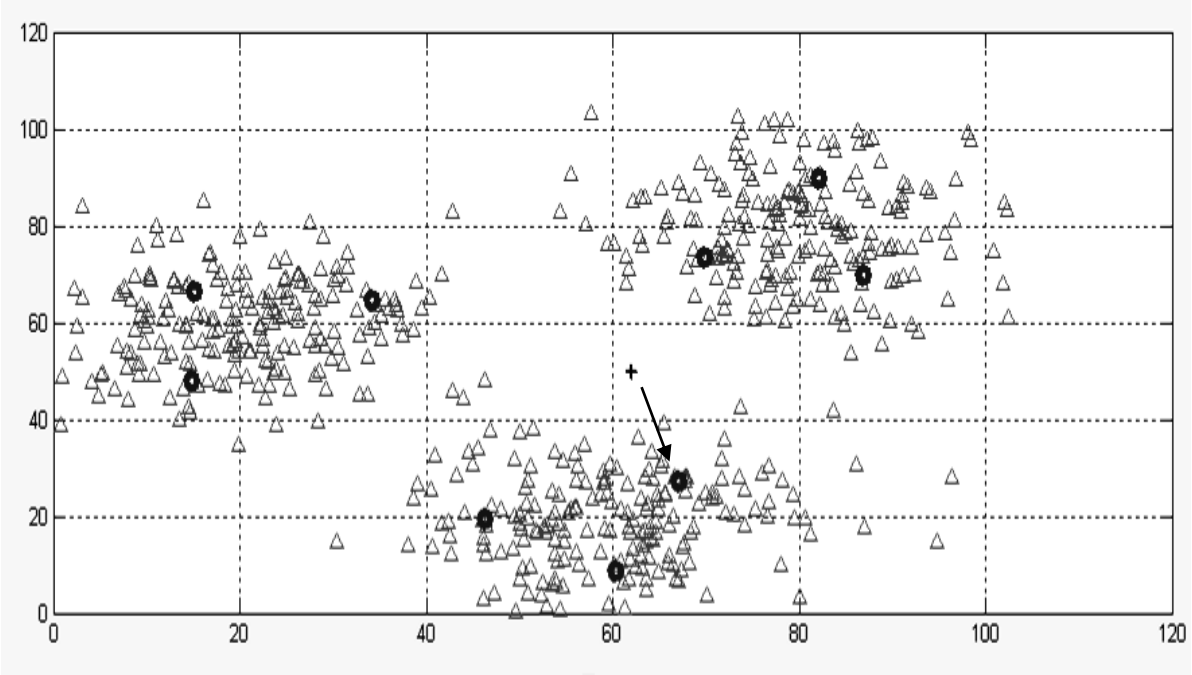


Рисунок 6.11 - Виявлені кластери (плюс на рисунку – вхідний вектор)

6.3. Самоорганізовані карти

Розглянемо поняття самоорганізованої карти. *Самоорганізовані карти* (Self Organizing Maps – SOM) – це один з різновидів нейромережевих алгоритмів. Основною відмінністю даної технології від розглянутих нами раніше нейромереж, які навчаються за алгоритмом зворотного поширення, і те, що з навчанні використовується метод навчання без вчителя, тобто результат навчання залежить від структури вхідних даних. Нейронні мережі даного типу часто застосовуються для вирішення найрізноманітніших завдань, від відновлення перепусток у даних до аналізу даних та пошуку закономірностей, наприклад, у фінансовій задачі.

Алгоритм функціонування карток, що самонавчаються, являє собою один з варіантів кластеризації багатовимірних векторів. Прикладом таких алгоритмів може бути алгоритм k-найближчих середніх (c-means). Важливою відмінністю алгоритму SOM є те, що в ньому всі нейрони (вузли, центри класів) упорядковані до певної структури (зазвичай двовимірної сітки). При цьому під час навчання модифікується не тільки нейрон-переможець, а й його сусіди, але меншою мірою. За рахунок цього SOM можна вважати одним із методів проектування багатовимірного простору у простір з більш низькою розмірністю. З використанням цього алгоритму вектора, схожі у вихідному просторі, виявляються поруч і отриманої карті.

Структура самоорганізованих карт. SOM передбачає використання впорядкованої структури нейронів. Зазвичай використовуються одне та двовимірні сітки. При цьому кожен нейрон є *n*-мірний вектор-стовбець $\mathbf{w} = [w_1, w_2, ..., w_n]^T$, де *n* - визначається розмірністю вихідного простору (розмірністю вхідних векторів). Застосування одна і двовимірних сіток пов'язано з тим, що виникають проблеми при відображенні просторових структур більшої розмірності (при цьому знову виникають проблеми зі зниженням розмірності до двовимірної монітора).

Зазвичай нейрони розташовуються у вузлах двомірної сітки з прямокутними або шестикутними осередками (рис. 6.12). При цьому, як було зазначено вище, нейрони також взаємодіють один з одним. Розмір цієї взаємодії визначається відстанню між нейронами на карті. На малюнку дано приклад відстані для шестикутної та чотирикутної сіток.

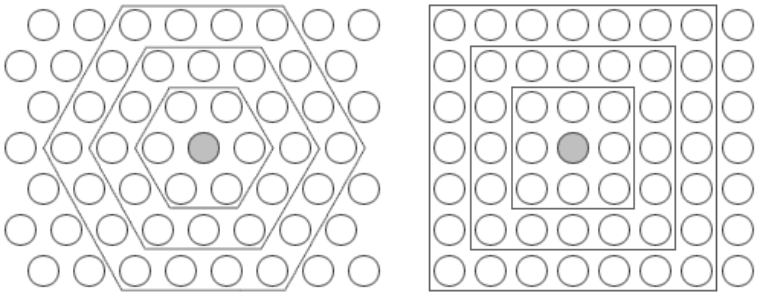


Рисунок 6.12 - Розташування нейронів у вузлах двовимірної сітки з чотирикутними та шестикутними осередками

Легко помітити, що з шестикутної сітки відстань між нейронами більше збігається з евклидовой відстанню, ніж чотирикутної сітки.

При цьому кількість нейронів у сітці визначає ступінь деталізації результату роботи алгоритму, і, зрештою, від цього залежить точність узагальнюючої здатності карти.

Початкова ініціалізація картки. При реалізації алгоритму SOM заздалегідь визначається конфігурація сітки (прямокутна або шестикутна), а також кількість нейронів в мережі. Деякі джерела рекомендують використовувати максимально можливу кількість нейронів у карті. При цьому початковий радіус навчання (neighborhood в англомовній літературі) значною мірою впливає на здатність узагальнення за допомогою отриманої картки. У разі коли кількість вузлів карти перевищує кількість прикладів у навчальній вибірці, то успіх використання алгоритму великою мірою залежить від вибору початкового радіусу навчання. Однак, у випадку, коли розмір карти становить десятки тисяч нейронів, то час, необхідний на навчання карти зазвичай буває занадто велике для вирішення практичних завдань,

таким чином, необхідно досягати допустимого компромісу при виборі кількості вузлів.

Перед початком навчання картки необхідно проініціалізувати вагові коефіцієнти нейронів. Вдало обраний спосіб ініціалізації може суттєво прискорити навчання, і призвести до отримання якісніших результатів. Існують три способи ініціювання початкових ваг.

- Ініціалізація випадковими значеннями, коли всі ваги дають малі випадкові величини.
- Ініціалізація прикладами, коли як початкові значення задаються значення випадково вибраних прикладів з навчальної вибірки
- Лінійна ініціалізація. В цьому випадку ваги ініціюються значеннями векторів, лінійно впорядкованих уздовж лінійного підпростору, що проходить між двома головними власними векторами вихідного набору даних. Власні вектори можуть бути знайдені, наприклад, за допомогою процедури Грама-Шмідта..

Навчання самоорганізованих карт. Навчання складається з послідовності корекцій векторів, що являють собою нейрони. На кожному кроці навчання з вихідного набору даним випадково вибирається один із векторів, а потім проводиться пошук найбільш схожого на нього вектора коефіцієнтів нейронів. При цьому вибирається нейрон-переможець, який найбільше схожий на вектор входів. Під схожістю в даній задачі розуміється відстань між векторами, що зазвичай обчислюється в евклідовому просторі. Після того, як знайдений нейрон-переможець, проводиться коригування ваг нейромережі. При цьому вектор, що описує нейрон-переможець і вектора, що описують його сусідів у сітці, переміщуються в напрямку вхідного вектора.

Наведемо приклад використання карти, що самоорганізується, на прикладі двовимірних векторів. Використовуючи карти, що самоорганізуються, двомірні вектори необхідно розбити на кластери, потім подати на вхід самоорганізуючої карти новий вектор і визначити кластер до якого він відноситься.

```
P=rands(2,100)          % Завдання випадкових двомірних вхідних
векторів
figure(1)
hold on
plot(P(1,:),P(2,:),'+r')        % візуальне зображення вхідних векторів
%Створення СР з 3*4 нейронами
%За умовчанням функція TFCN = 'hextop', тобто нейрони
розташовуються у вузлах двомірної сітки з шестикутними
осередками
net=newsom([0 1;0 1],[3 4]);
net.trainParam.epoch=1    % Завдання числа циклів налаштування
net=train(net,P)          % налаштування мережи
```

```
A=0.5
B=0.3
p=[A;B];                    % Завдання нового вхідного вектору
plot(A,B,'^k') % промальовування на малюнку вхідного вектору
(чорний трикутник)
figure(2)
plotsom(net.iw{1,1},net.layers{1}.distances)
a=sim(net,p)                % опитування мережи
```

Результат роботи програми представлено на рис. 6.13, 6.14.

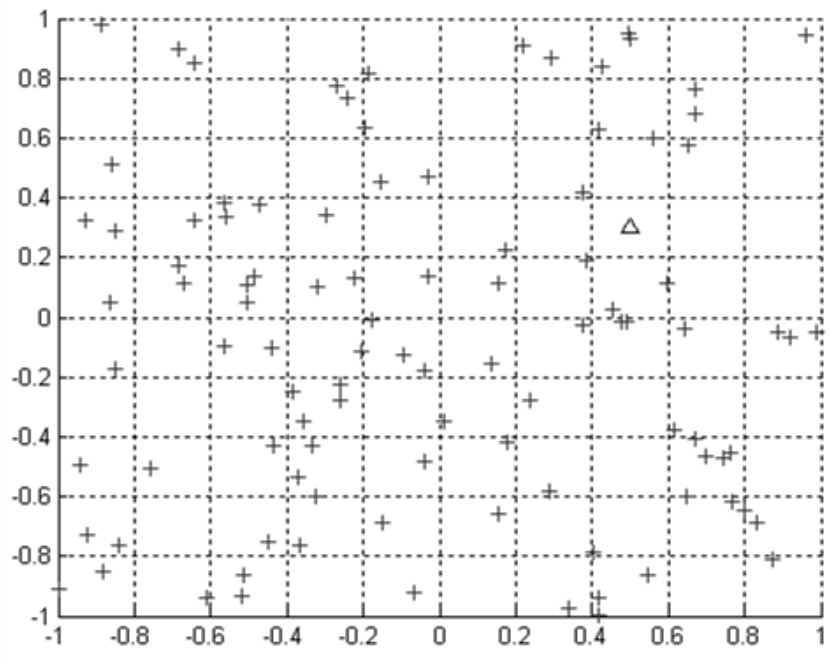


Рисунок 6.13 – Вхідні вектори

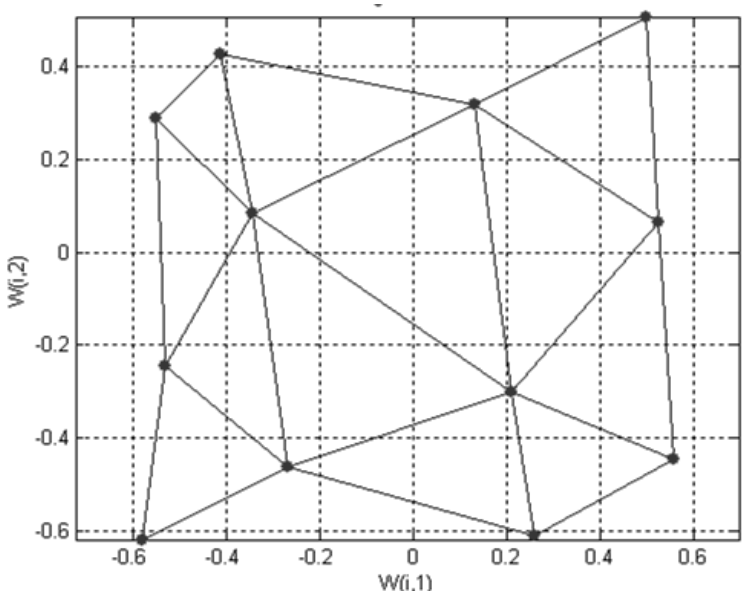


Рисунок 6.14 – Виявлені центри кластерів

Результат роботи програми можна побачити і у командному вікні:

a =

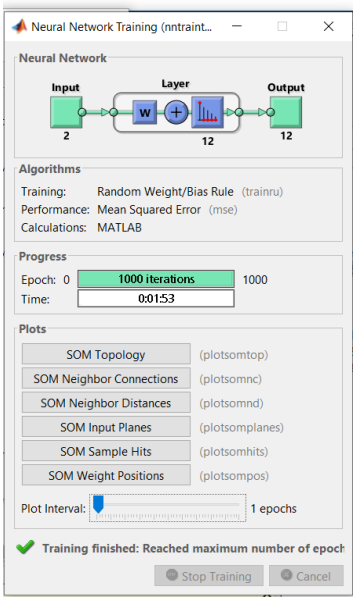
(12,1) 1

Пред'явлений вектор віднесено до дванадцятого кластера.

Приклад. Побудови мережі SOM/

```
load clusterdemo.dat
P=[clusterdemo(:,1)'; clusterdemo(:,2)']*100
figure(1)
hold on
plot(P(1,:),P(2,:),'+r')          % візуальне зображення вхідних векторів
%Створення СР з 3*4 нейронами
%За умовчанням функція TFCN = 'hextop', тобто нейрони розташовуються у вузлах двомірної сітки з шестикутними осередками
net=newsom([0 1;0 1],[3 4]);
net.trainParam.epoch=1      % Завдання числа циклів налаштування
net=train(net,P)            % налаштування мережи
A=0.5
B=0.3
p=[A;B];                    % Завдання нового вхідного вектору
plot(A,B,'^k') % промальовування на малюнку вхідного вектору (чорний трикутник)
figure(2)
plotsom(net.iw{1,1},net.layers{1}.distances)
a=sim(net,p)                % опитування мережи
```

Результат виконання програми наведено на рисунках 6.15 – 6.17



Рисунко 6.15 – Результати навчання мережі SOM

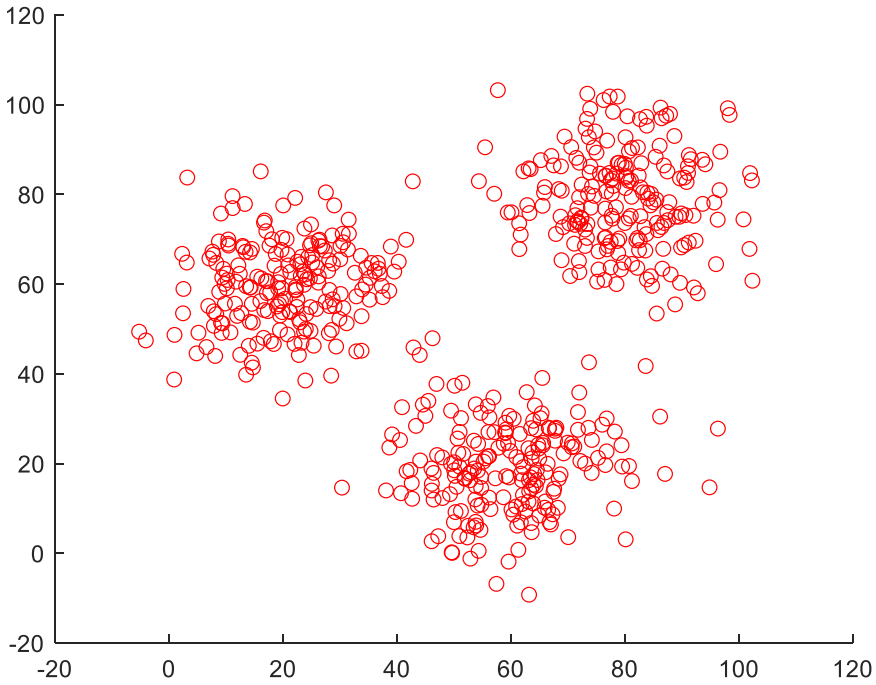


Рисунок 6.16 – Вхідні вектори

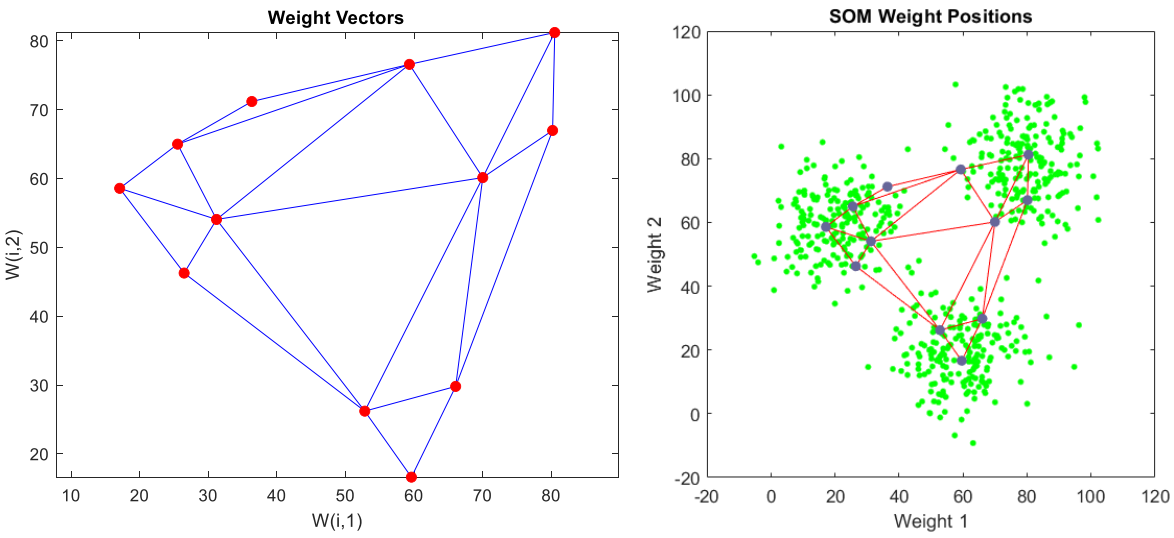


Рисунок 6.17 – Виявлені центри кластерів та дистанція міжними

Контрольні питання:

1. Що розуміємо під кластеризацією?
2. Опишіть вбудовані оператори MATLAB для кластеризації.
3. Опишіть мережу Кохонена.
4. Навіщо використовуються карти, що самоорганізуються.
5. Опишіть відмінність мережі Кохонена від SOM.

7 РОБОТА З НЕЧІТКИМИ МНОЖИНАМИ В MATLAB

Мета роботи: освоїти методику опису функцій приналежності у MatLab та виконання арифметичних обчислення над нечіткими множинами.

7.1 Опис функцій приналежності

У системі MatLab реалізовано набір команд для опису функцій приналежності (ФП) (див. табл. 7.1).

Таблиця 7.1 – Команди для опису функцій приналежності у MatLab

Команда	Функція
dsigmf	ФП у вигляді різниці між двома сигмоїдами
evalmf	Обчислення значень довільної ФП
evalmmf	Розрахунок ступенів приладдя для кількох ФП
gauss2mf	Двостороння гауссівська ФП
gaussmf	Гауссівська ФП
gbellmf	Узагальнена Дзвоноподібна ФП
pimf	π-подібна ФП
psigmf	Добуток двох сигмоїдних ФП
sigmf	Сигмоїдна ФП
smf	*s*-подібна ФП
trapmf	Трапецієподібна ФП
trimf	Трикутна ФП
zmf	*z*-подібна ФП
fuzarith	Калькулятор для виконання арифметичних операцій складання, віднімання, множення та поділу над нечіткими числами

Розглянемо приклади опису функцій приналежності (ФП) у MatLab. Для опису трикутної ФП використовується команда

```
>> y = trimf(x, [ABC]);
```

де *x* – базова шкала, де описується ФП; *A*, *B* та *C* – координати вершин трикутника на базовій шкалі. Наприклад:

```
x = (0:0.2:10);
y = trimf(x, [3 4 5]);
plot(x, y);
grid;
ylabel('y');
```

```
xlabel('x')
```

Отриманий графік показано на рис. 7.1.

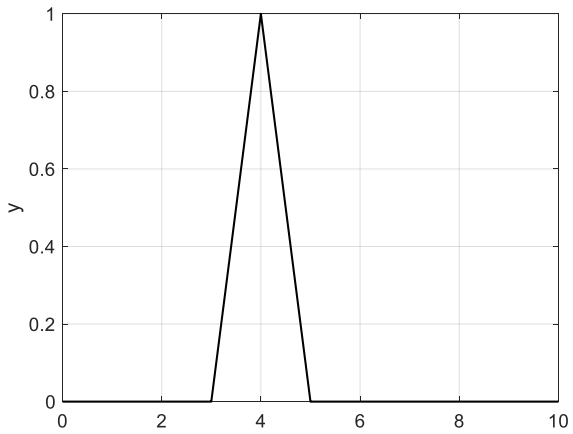


Рисунок 7.1 – Трикутна функція приналежності

Для опису трапецеподібної ФП використовується команда виду

```
>> y = trapmf(x, [A B C D]);
```

де x - Базова шкала; A, B, C та D – координати вершин трапеції на базовій шкалі.
Наприклад:

```
x = (0:0.2:10);
y = trapmf(x, [3 4 6 8]); plot(x, y)
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Отриманий графік показано на рис. 7.2.

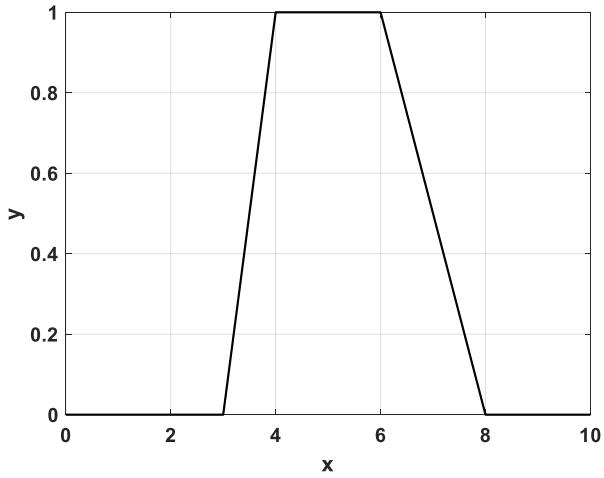


Рисунок 7.2 – Трапецієподібна функція приналежності

Для опису гаусової ФП використовується команда виду

```
>> y = gaussmf(x, [AB]);
```

Наприклад:

```
x = (0:0.2:10);
y = gaussmf(x, [1 5]); plot(x, y)
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Отриманий графік показано на рис. 7.3.

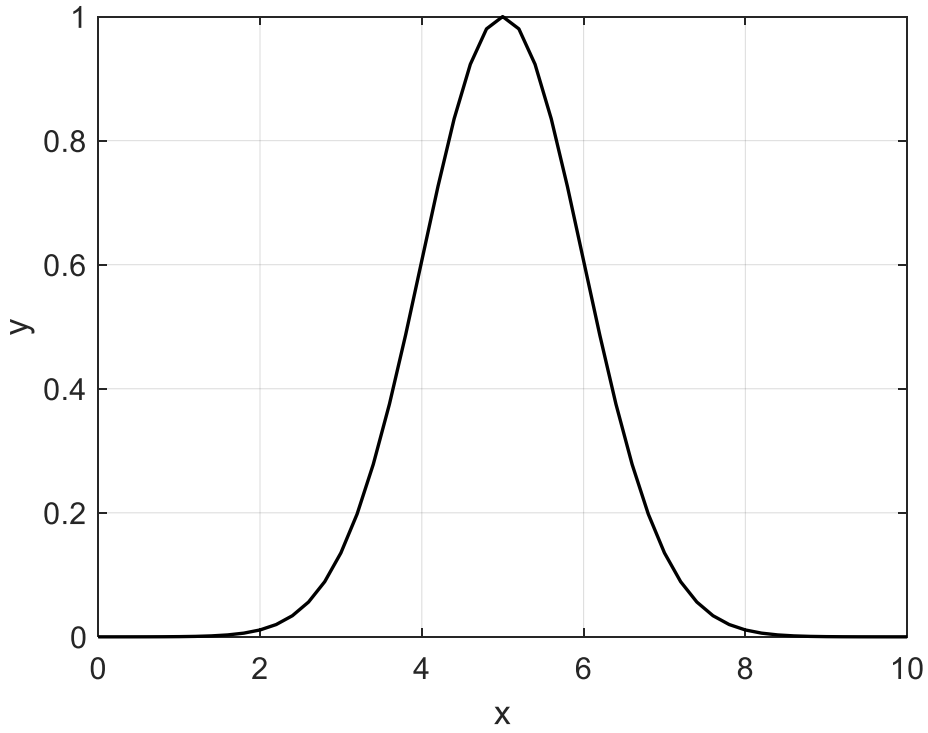


Рисунок 7.3 – Гаусовська функція приналежності

У MatLab передбачено варіант комбінації двох гаусових функцій, так що в проміжку між їхніми центрами значення ФП дорівнює 1.

```
>> y = gauss2mf(x,[B1 A1 B2 A2]);
```

Наприклад:

```
x = (0:0.2:10);
y = gauss2mf(x, [1 5 1.5 6]);
plot(x, y);
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Отриманий графік показано на рис. 7.4.

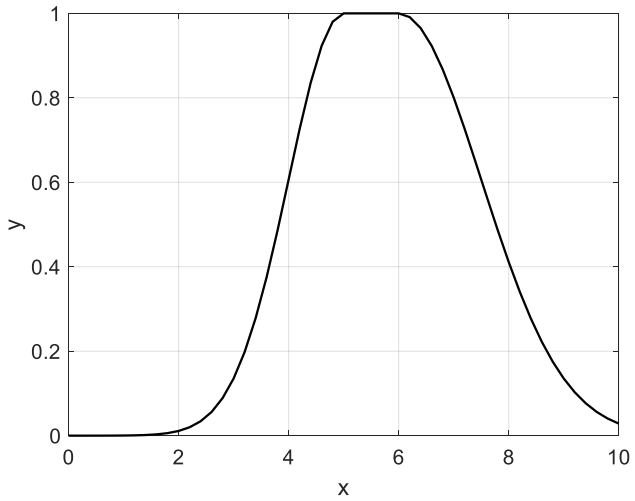


Рисунок 7.4 – Двостороння Гаусовська функція приналежності

Дзвоноподібна ФП описується командою:

```
>> y = gbellmf(x, [ABC]);
```

де A і B - параметри; C – центр ФП.

Розглянемо вплив параметра B:

```
x = (0:0.2:10);
y1 = gbellmf(x, [1 1 5]);
y2 = gbellmf(x, [1 2 5]);
y3 = gbellmf(x, [1 3 5]);
plot (x, y1, x, y2, x, y3);
grid
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Сімейство графіків, що вийшло, показано на рис. 7.5.

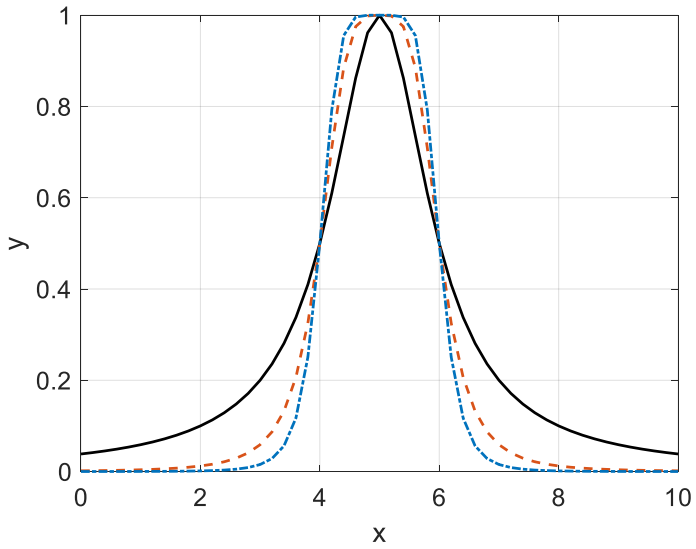


Рисунок 7.5 - Зміна «різкості» дзвоноподібної функції приналежності

Розглянимо вплив параметра *A*:

```
x = (0:0.2:10);
y1 = gbellmf(x, [1 1 5]);
y2 = gbellmf(x, [2 1 5]);
y3 = gbellmf(x, [3 1 5]);
plot(x,y1,x,y2,x,y3);
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Сімейство графіків, що вийшло, показано на рис. 7.6.

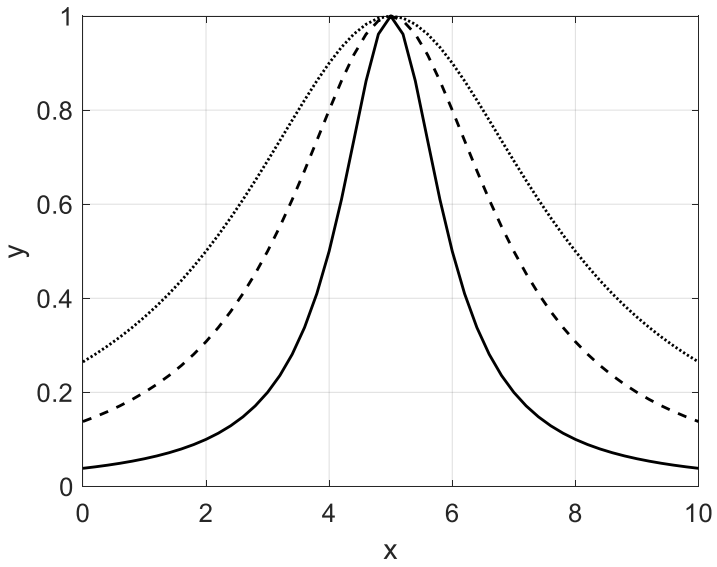


Рисунок 7.6 - Зміна «ширини» дзвоноподібної функції приналежності

Для визначення сигмоїдної ФП використовується команда виду

```
>> y = sigmf(x, [AB]);
```

Для з'ясування впливу параметрів A та B побудуємо сімейство графіків:

```
x = (0:0.2:10);
y1 = sigmf(x, [3 5]);
y3 = sigmf(x, [1 5]);
y2 = sigmf(x, [2 5]);
plot(x,y1,x,y2,x,y3)
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Як свідчить рис. 7.7, параметр *B* визначає координату x, в якою функція приналежності перетинає значення 0,5. Параметр *A* визначає "розмитість" сигмоїдної функції.

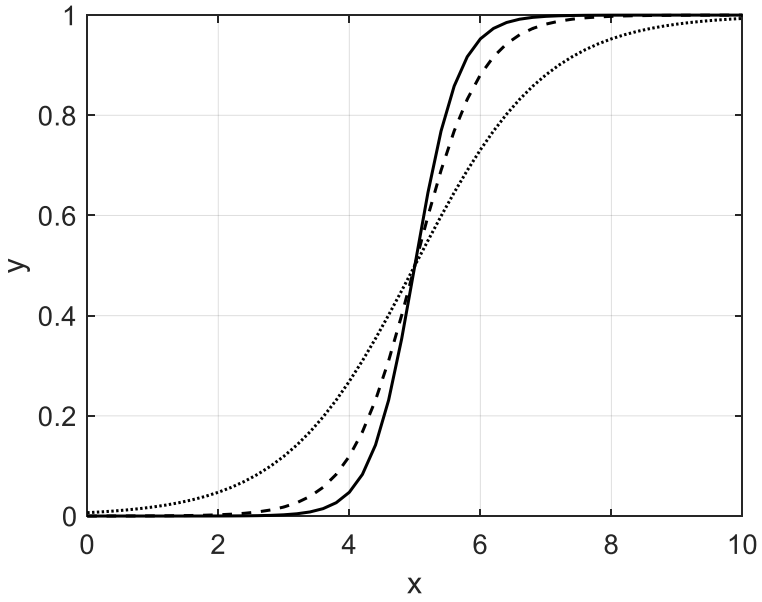


Рисунок 7.7 – Вплив параметрів на опис сигмоїдної функції

Вибираючи негативне значення *A*, можна отримати правосторонню сигмоїдну функцію (див. рис. 7.8):

```
x = (0:0.2:10);
y1 = sigmf(x, [-3 5]);
y2 = sigmf(x, [-4 5]);
y3 = sigmf(x, [-1 5]);
plot(x,y1,x,y2,x,y3)
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

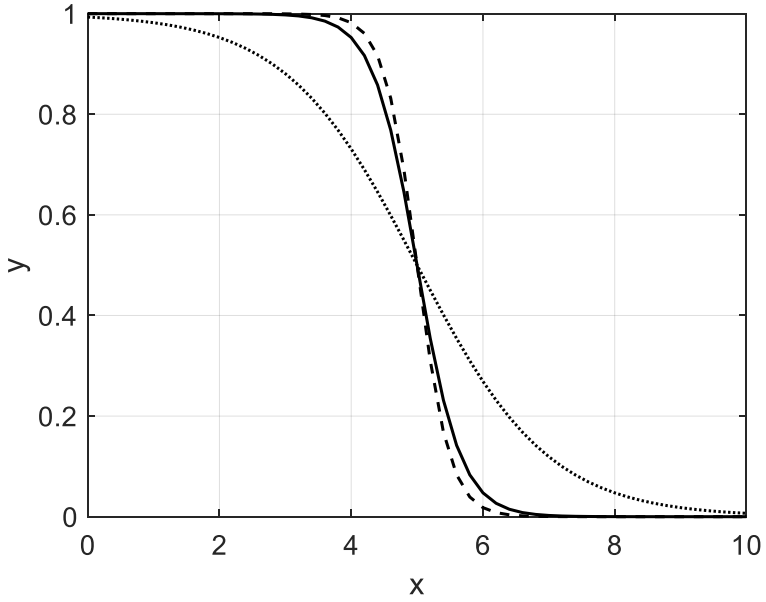


Рисунок 7.8 – Правостороння сигмоїдна функція

За допомогою функції *psigmf* може бути використаний добуток «лівосторонньої» та «правосторонньої» сигмоїдних функцій, наприклад:

```
x = (0:0.2:10);
params1 = [2 3];
params2 = [-5 8];
y = psigmf(x, [params1 params2]);
plot(x,y);
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Графік добутоку сигмоїдних функцій показаний на рис. 7.9.

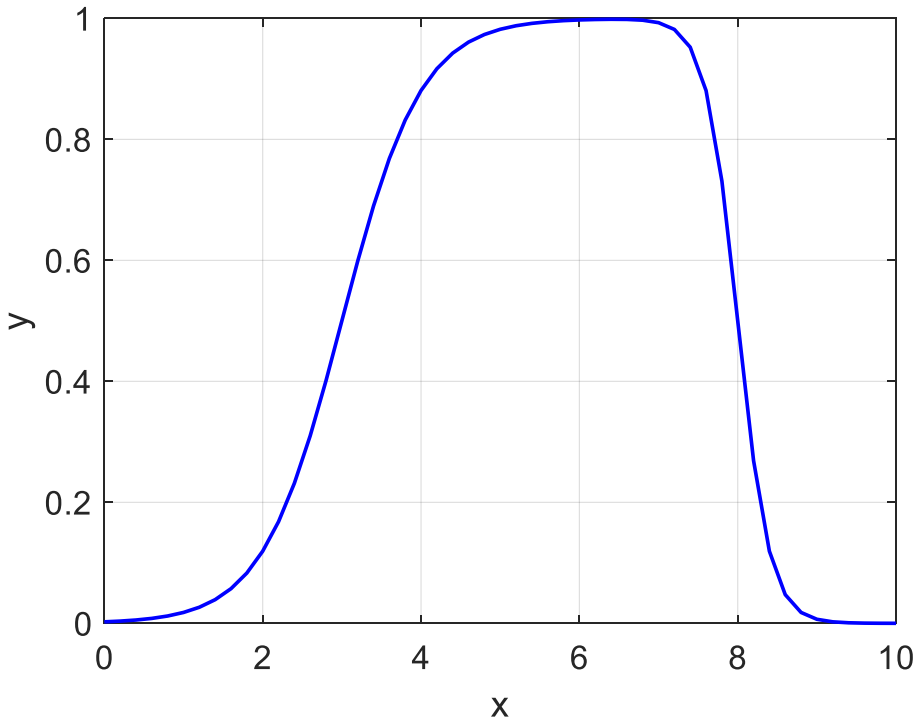


Рисунок 7.9 – Добуток сигмоїдних функцій

Різниця сигмоїдних функцій задається командою виду:

```
>> dsigmf(x,[A1 B1 A2 B2])
```

Наприклад:

```
x = (0:0.2:10);
y=dsigmf(x,[5 2 5 7]);
plot(x,y);
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Ця команда відповідає наступній групі команд:

```
x = (0:0.2:10);
y1 = sigmf(x, [5 2]);
y2 = sigmf(x, [5 7]);
y3 = y1-y2;
plot(x,y3);
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Графік ФП показано на рис. 7.10.

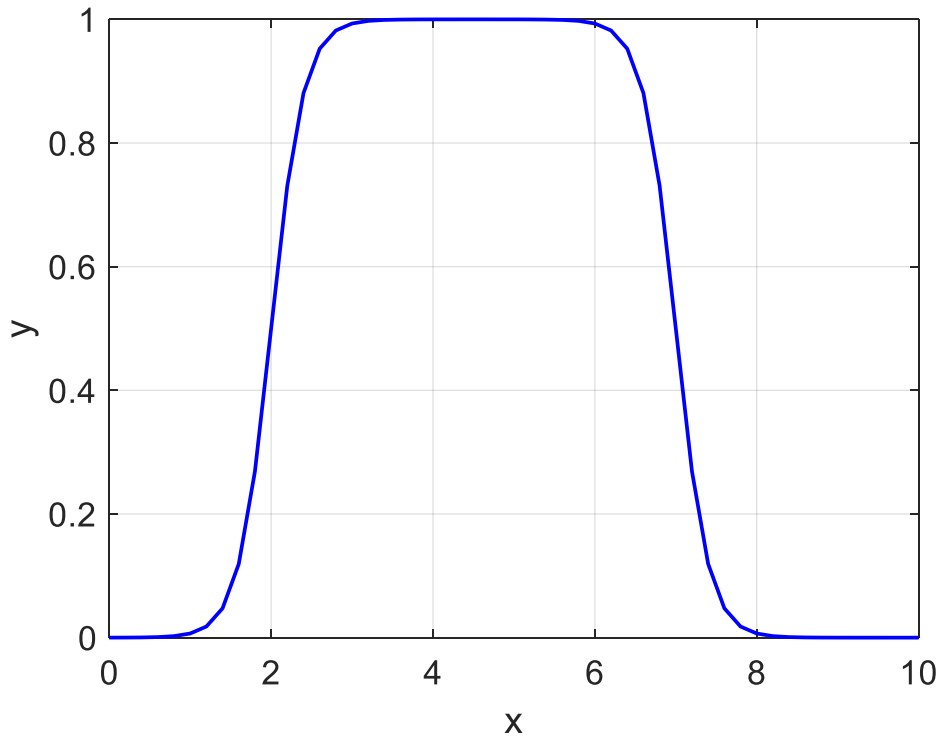


Рисунок 7.10 – Різниця сигмоїдних функцій

На основі сплайн-апроксимації побудована *Z*-подібна ФП, яка дозволяє описати плавне зменшення приналежності від *A* до *B*:

```
>> zmf(x,[a b])
```

Наприклад:

```
x = (0:0.2:10);
plot(x, zmf(x, [2 8]));
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Графік цієї функції показано на рис. 7.11.

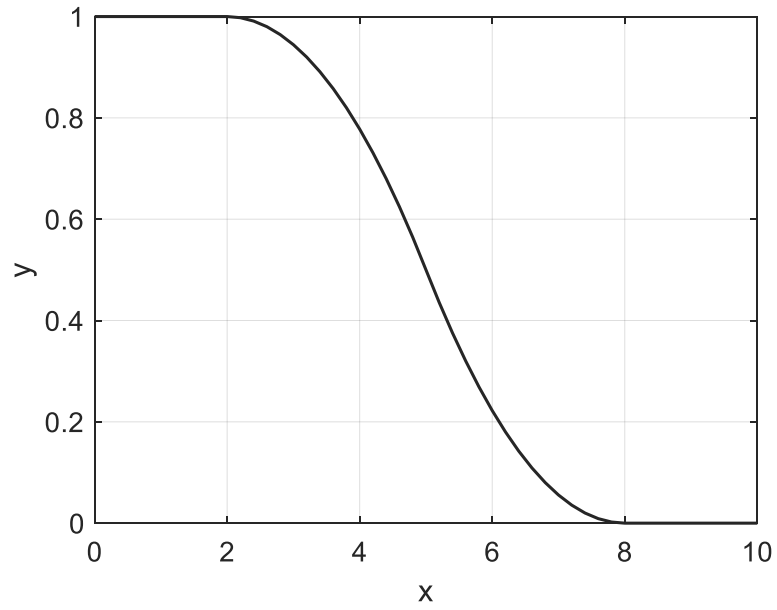


Рисунок 7.11 – Графік Z-подібна функції приналежності

S-подібна ФП є «парною» до Z-подібної функції:

```
>> smf(x,[a b])
```

Наприклад:

```
x = (0:0.2:10);
y=smf(x,[1 8]);
plot(x,y);
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Графік Z-подібної функції показано на рис. 7.12.

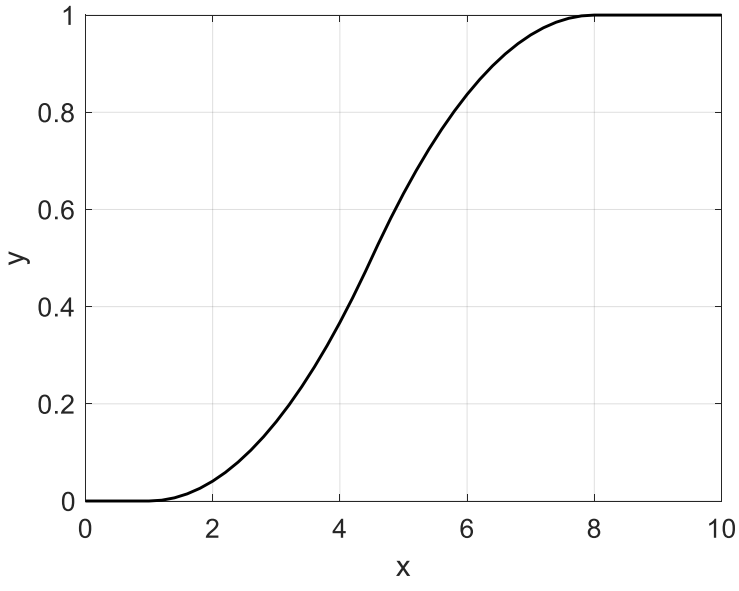


Рисунок 7.12 – Графік Z-подібної функції приналежності

Для опису π-подібної функції приналежності використовуються чотири параметри:

```
x = (0:0.2:10);
y = pimf(x, [2 5 8 9]);
plot(x,y);
grid;
ylabel('y');
xlabel('x')
```

Графік, що вийшов, показаний на рис. 7.13.

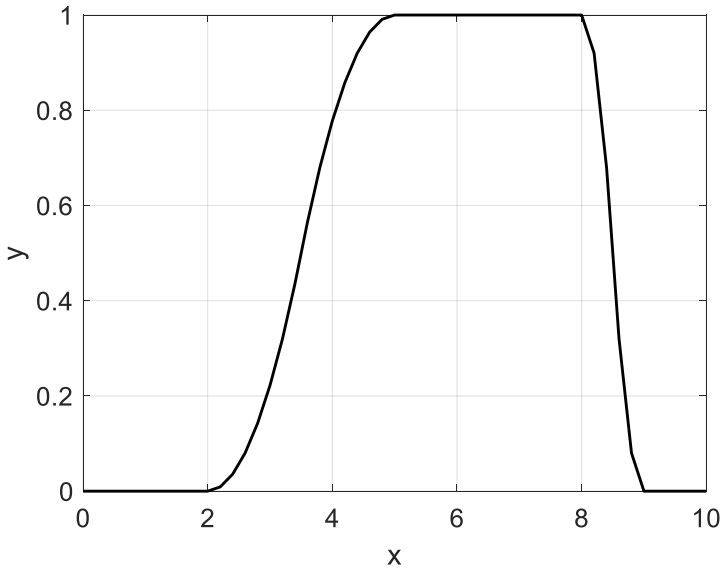


Рисунок 7.13 – Графік π-подібної функції приналежності

За допомогою функції evalmf можна оцінити ступінь приналежності елементів заданого вхідного вектора до нечіткої множини. Функція має формат:

y = evalmf (x, params, type),

де *x* - вектор, для координат якого необхідно розрахувати ступеня належності; *params* - вектор параметрів функції приналежності, порядок завдання яких визначається її типом; *type* – тип функції приналежності, який може бути заданий ім'ям функції або її кодом: 1 – *trimf*; 2 - *'trapmf'*; 3 - *'gaussmf'*; 4 - *'gauss2mf'*; 5 - *'sigmf'*; 6 - *'dsigmf'*; 7 - *'psigmf'*; 8 - *'gbellmf'*; 9 - *'smf'*; 10 - *'zmf'*; 11 - 'pimf'.

При заданні іншого типу функції приналежності передбачається, що її визначено користувачем і задана відповідним m-файлом.
Розглянемо приклад

```
x = [3 4 5];
y = evalmf (x, [2 5 8 9], 'pimf')
```

```
y =
0.2222 0.7778 1.0000
```

Обчислити значення кількох функцій приналежності нечітких множин, заданих на одній й тій же універсальній множині, можна з допомогою функції

y = evalmmf(x, params, types),

де *x* - вектор, для координат якого необхідно розрахувати ступеня належності; *params* – матриця властивостей функції приналежності. Перший рядок матриці визначає параметри першої функції приладдя, другий рядок – параметри другої функції приналежності тощо; *types* – матриця типів функції приналежності. Перший рядок матриці визначає тип першої функції приналежності, другий рядок – тип другої функції приналежності (див. опис команди *evalmf*).
Розглянемо приклад.

```
mf = [fismf(@gaussmf,[1.5 5]) fismf(@trapmf,[3 4 6 7])];
x = (-2:0.1:12)';
y = evalmmf(mf,x);
plot(x,y); grid;
xlabel('Universe of discourse (x)'),ylabel('Membership value (y)')
legend('gaussmf, P=[1.5 5]','trapmf, P=[3 4 6 7]')
```

Результат обчислення функцій приналежності наведено на рисунку 7.14

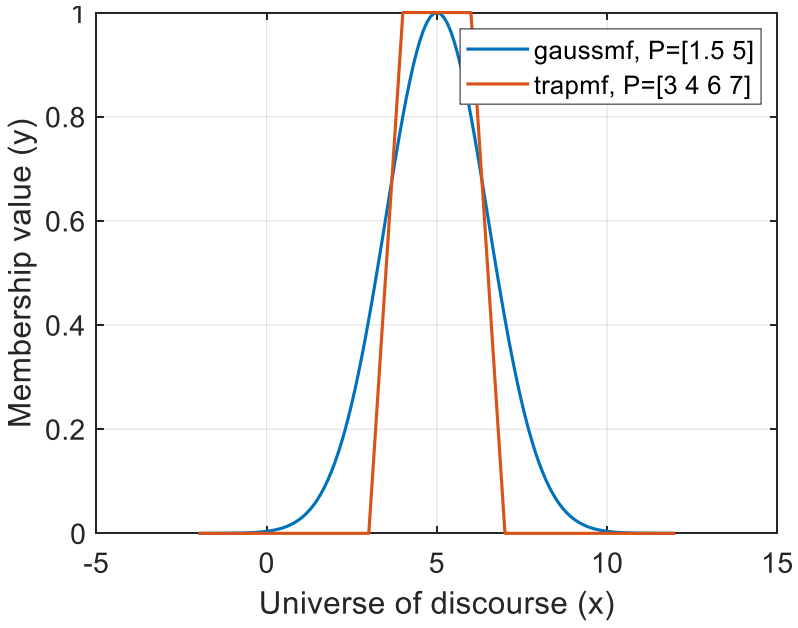


Рисунок 7.14 – Графіки обчислення функцій приналежності гаусовської та трапецеїдальної

Розглянемо приклади виконання операцій над нечіткими множинами MatLab. Нехай дано базова множина X = [-5,20]:

```
N = 501;
minX = -5;
maxX = 20;
x = linspace(minX,maxX,N);
mf1 = gaussmf(x,[1 5]);
mf2 = gaussmf(x,[1 7]);
% обчислення max та побудова графіку обчислення
mf = max(mf1,mf2);
figure(1)
plot(x,mf,'LineWidth',3)
% обчислення min та побудова графіку обчислення
figure(2)
mf3 = min(mf1,mf2);
plot(x,mf3,'LineWidth',3)
% обчислення об’єднання та побудова графіку обчислення
figure(3)
mf4 = probor([mf1;mf2])% об’єднання
plot(x,mf4,'LineWidth',3)
% обчислення перетин та побудова графіку обчислення
figure(4)
mf4 = prod([mf1;mf2])
plot(x,mf4,'LineWidth',3)% перетин
```

На рис. 7.15 та 7.16 показано виконання операцій об'єднання та перетину при використанні відповідно операторів *max* та *min*.

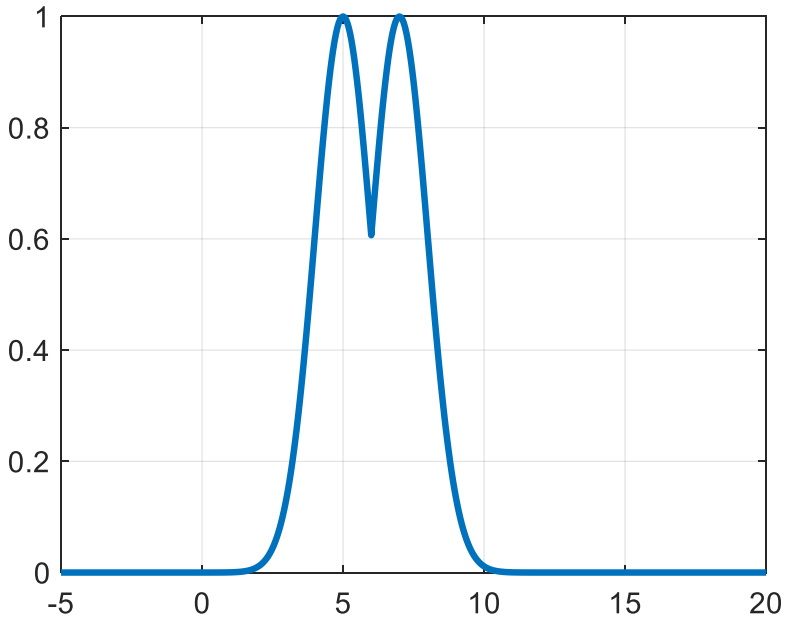


Рисунок 7.15 – Графіки об'єднання нечітких множин (операція max)

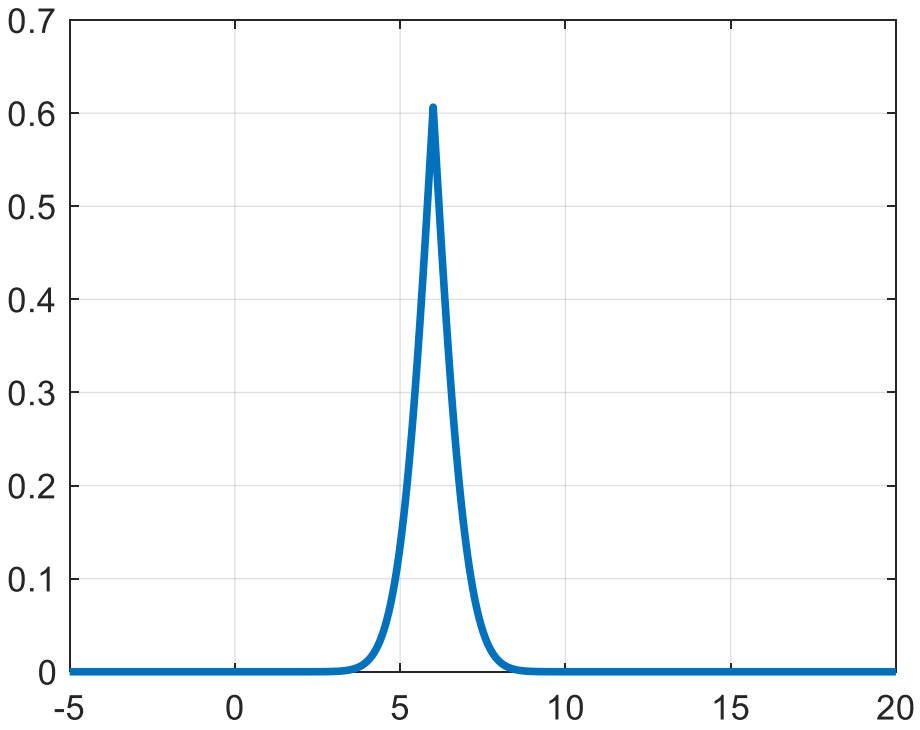


Рисунок 7.16 – Графіки перетину нечітких множин (операція min)

На рис. 7.17 та 7.18 показано виконання операцій об'єднання та перетину при використанні відповідно операторів обмеженої суми та додатку.

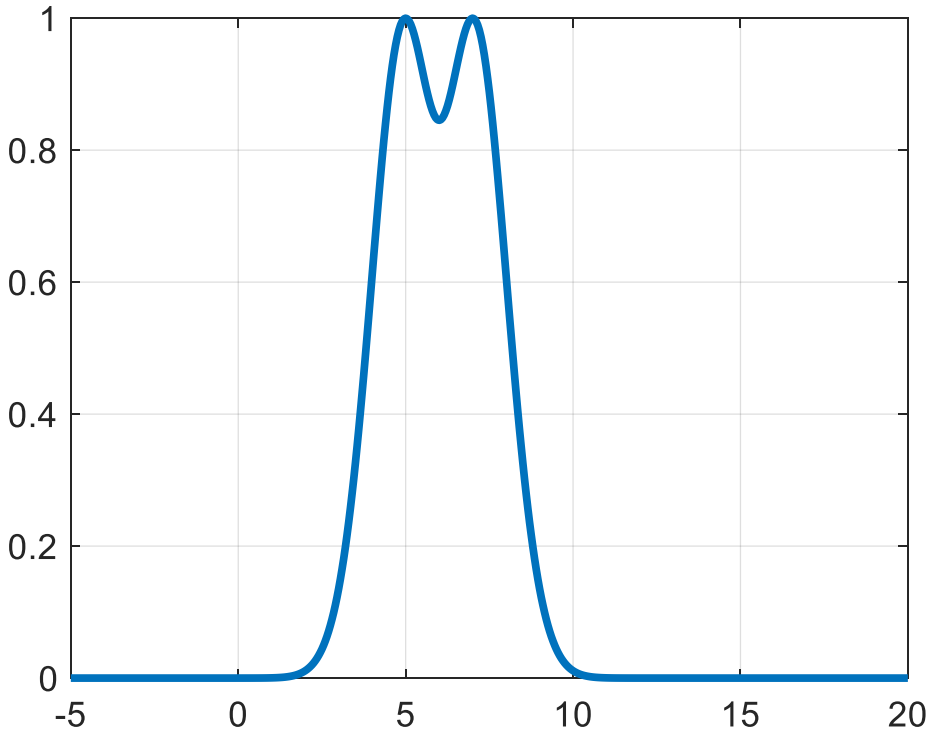


Рисунок 7.17 – Графіки об'єднання нечітких множин (операція обмежена *сума)*

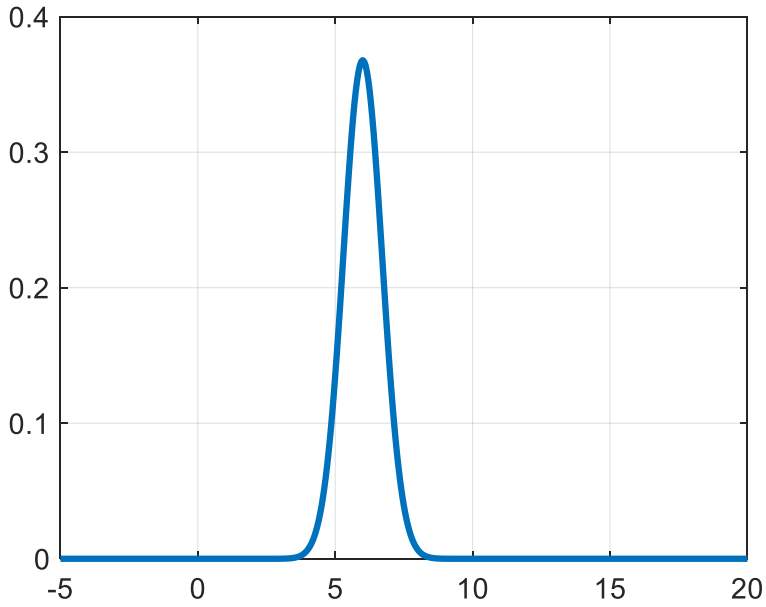


Рисунок 7.18 – Графіки перетину нечітких множин (операція добуток)

Для виконання арифметичних операцій складання, віднімання, множення та поділу над нечіткими числами нечіткої множини у складі MatLab є калькулятор fuzarith. Для його використання необхідно задати рядок виду

c = fuzarith(x, a, b, operator),

де *x* – універсальна множина, на якій задані нечіткі числа; *a* – вектор ступенів приналежності елементів універсальної множини першої нечіткої множини; *b* – вектор ступенів приналежності елементів універсальної множини другої нечіткої множини; *operator* - одна з допустимих арифметичних операцій: *'sum'* - додавання; *'sub'* - віднімання; *'prod'* – множення; *'div'* – ділення .

Вихідною змінною функцією *fuzarith* є вектор ступенів приналежності елементів універсальної множини *x* результату виконання нечіткої арифметичної операції. Розмірності векторів *x*, *a*, *b* та *c* повинні бути однаковими.

Приклад виконання арифметичних операцій складання, віднімання, множення та ділення над нечіткими числами нечіткої множини у MatLab:

```
N = 501;
minX = -20;
maxX = 20;
x = linspace(minX,maxX,N);
A = trapmf(x,[-10 -2 1 3]);
B = gaussmf(x,[2 5]);
```

```
%Evaluate the sum, difference, product, and quotient of A and B.
Csum = fuzarith(x,A,B,'sum');
Csub = fuzarith(x,A,B,'sub');
Cprod = fuzarith(x,A,B,'prod');
Cdiv = fuzarith(x,A,B,'div');
%Plot the addition and subtraction results.
figure(5)
subplot(2,1,1)
plot(x,A,'--',x,B,':',x,Csum,'c')
title('Fuzzy Addition, A+B')
legend('A','B','A+B')
subplot(2,1,2)
plot(x,A,'--',x,B,':',x,Csub,'c')
title('Fuzzy Subtraction, A-B')
legend('A','B','A-B')
figure(6)
subplot(2,1,1)
plot(x,A,'--',x,B,':',x,Cprod,'c')
title('Fuzzy Multiplication, A*B')
legend('A','B','A*B')
subplot(2,1,2)
plot(x,A,'--',x,B,':',x,Cdiv,'c')
title('Fuzzy Division, A/B')
legend('A','B','A/B')
```

На рис. 7.19 та показаний результат арифметичного обчислення нечітких множин

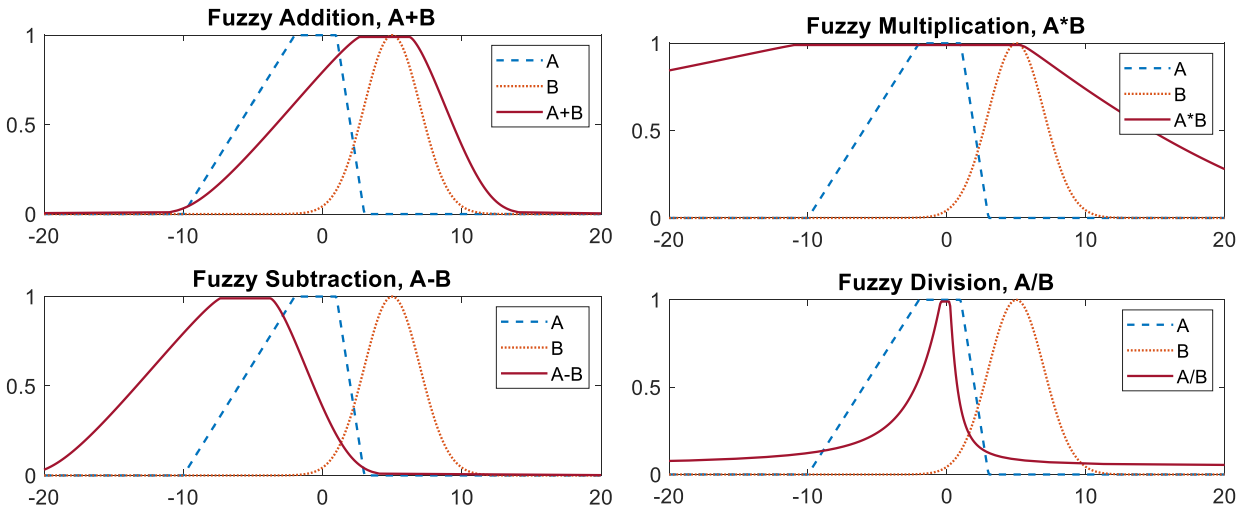


Рисунок 7.19 – Графіки результатів арифметичного обчислення нечітких множин

Нечіткі арифметичні операції виконуються за таким алгоритмом:

– перетворення нечітких чисел-операндів в α-рівневі нечіткі множини;

– виконання арифметичної операції для кожного α-рівня відповідно до принципу розширення;

– перетворення результуючого нечіткого числа з α-рівневого уявлення до традиційного виду.

Кількість α-рівнів може вибиратися користувачем.

7.2 Зміст і захист звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 7.2.

За вказаними даними у табл. 7.2 необхідно виконати:

1. операцій max, min, об’єднання, перетин над нечіткими множинами у MatLab

2. арифметичні операцій складання, віднімання, множення та ділення над нечіткими числами нечіткої множини у MatLab

Звіт по роботі повинен містити завдання, програму обчислення арифметичних операції над функціями приналежності, графіки результатів обчислень

Таблиця 7.2 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар.	Діапазон базової множини *X*	Функція приналежності 1	Функція приналежності 1
1	[0,20]	*‘trimf’*	*'gaussmf'*
2	[-20,20]	*'trapmf'*	*'gauss2mf'*
3	[-5,20]	*'gaussmf'*	*'dsigmf'*
4	[20,40]	*'gauss2mf'*	*'psigmf'*
5	[10,50]	*'sigmf'*	*‘trimf’*
6	[-10,20]	*'dsigmf'*	*'trapmf'*
7	[-15,15]	*'psigmf'*	*'gaussmf'*
8	[-10,30]	*'gbellmf'*	*'gauss2mf'*
9	[0,20]	*'smf'*	*'sigmf'*
10	[-20,20]	*'zmf'*	*'dsigmf'*
11	[-5,20]	'pimf'	*'psigmf'*
12	[20,40]	*‘trimf’*	*'gbellmf'*
13	[10,50]	*'trapmf'*	*'smf'*
14	[-10,20]	*'gaussmf'*	*'zmf'*
15	[-15,15]	*'gauss2mf'*	'pimf'
16	[-10,30]	*'sigmf'*	*‘trimf’*
17	[-5,20]	*'dsigmf'*	*'smf'*
18	[20,40]	*'psigmf'*	*'zmf'*
19	[10,50]	*'gbellmf'*	'pimf'
20	[-10,20]	*'smf'*	*‘trimf’*

7.3 Контрольні питання

1. Опишіть основні варіанти операції об'єднання нечітких множин.
2. Опишіть основні варіанти операції перетину нечітких множин.
3. Опишіть основні варіанти операції доповнення нечітких множин.
4. Опишіть операції різниці та симетричної різниці нечітких множин.
5. Опишіть операції твору алгебри та алгебраїчної суми нечітких множин.
6. Опишіть операції розтягування та стиснення нечітких множин.

8 АПРОКСИМАЦІЯ ЗАЛЕЖНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ

Мета роботи: отримати у редакторі нечіткого висновку апроксимаційну криву яка відповідає графіку завданої вихідної функції

8.1 Методика виконання роботи

Допустимо, потрібно підібрати такі параметри системи нечіткого висновку, при яких виходить апроксимація заданої кривої (див. рис. 8.1).

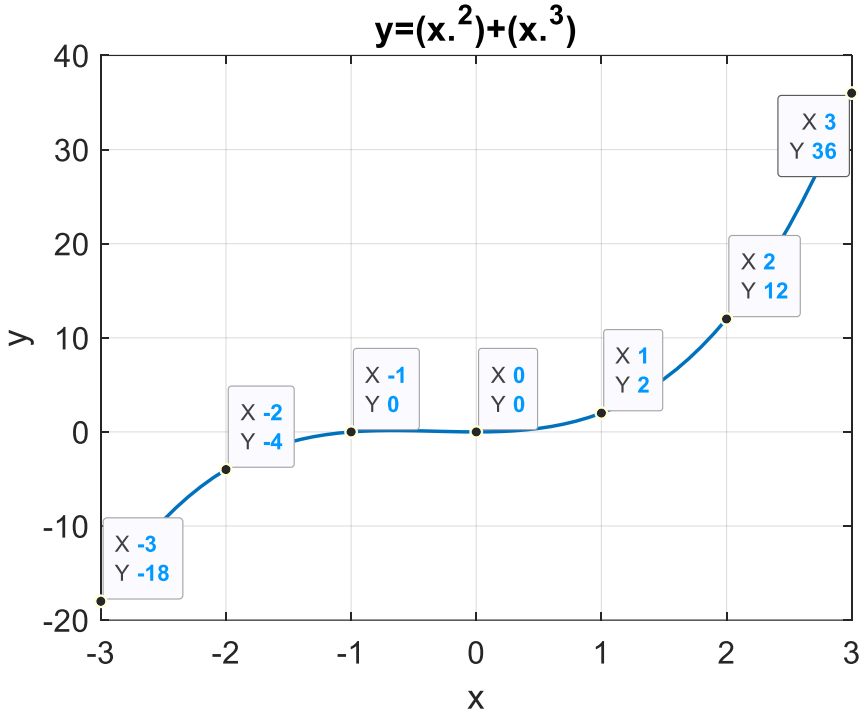


Рисунок 8.1 – Графік функції $y = x^2 + x^3$

Для виконання апроксимації потрібно вибрати набір точок (див. табл. 8.1).

Таблиця 8.1 – Набір точок для апроксимації функції

№ з/п	1	2	3	4	5	6	7
x	-3	-2	-1	0	1	2	3
y	-17	-4	0	0	3	12	36

1 варіант вирішення поставленого завдання шляхом програмної реалізації.

Програмна реалізація для апроксимації функції з використанням нечіткої системи:

```
% Побудова графіку залежності, що завдана
xx = -3:0.1:3;
```

```
yy=(xx.^2)+(xx.^3);
figure (1)
plot(xx,yy); grid;
title('y=(x.^2)+(x.^3)');
xlabel('x');
ylabel('y');
fis = mamfis('Name','Graffuzzy');
% Додається та налаштується вхідна змінна.
fis.Inputs = fisvar;
fis.Inputs.Name = "x";
fis.Inputs.Range = [-3 3];
% Задаються функції приналежності вхідної змінної.
% Для кожного MF створюється об'єкт fismf і встановлюються
властивості
% за допомогою покрокового опису.
% Виберемо центри термів X, що описуються гаусовими функціями,
відповідно до табл. 8.1.
fis.Inputs.MembershipFunctions = fismf;
fis.Inputs.MembershipFunctions.Name = "x1";
fis.Inputs.MembershipFunctions.Type = "gaussmf";
fis.Inputs.MembershipFunctions.Parameters = [0.4247 -3];
fis.Inputs.MembershipFunctions(2) = fismf;
fis.Inputs.MembershipFunctions(2).Name = "x2";
fis.Inputs.MembershipFunctions(2).Type = "gaussmf";
fis.Inputs.MembershipFunctions(2).Parameters = [0.4247 -2];
fis.Inputs.MembershipFunctions(3) = fismf;
fis.Inputs.MembershipFunctions(3).Name = "x3";
fis.Inputs.MembershipFunctions(3).Type = "gaussmf";
fis.Inputs.MembershipFunctions(3).Parameters = [0.4247 -1];
fis.Inputs.MembershipFunctions(4) = fismf;
fis.Inputs.MembershipFunctions(4).Name = "x4";
fis.Inputs.MembershipFunctions(4).Type = "gaussmf";
fis.Inputs.MembershipFunctions(4).Parameters = [0.4247 0];
fis.Inputs.MembershipFunctions(5) = fismf;
fis.Inputs.MembershipFunctions(5).Name = "x5";
fis.Inputs.MembershipFunctions(5).Type = "gaussmf";
fis.Inputs.MembershipFunctions(5).Parameters = [0.4247 1];
fis.Inputs.MembershipFunctions(6) = fismf;
fis.Inputs.MembershipFunctions(6).Name = "x6";
fis.Inputs.MembershipFunctions(6).Type = "gaussmf";
fis.Inputs.MembershipFunctions(6).Parameters = [0.4247 2];
fis.Inputs.MembershipFunctions(7) = fismf;
fis.Inputs.MembershipFunctions(7).Name = "x7";
fis.Inputs.MembershipFunctions(7).Type = "gaussmf";
fis.Inputs.MembershipFunctions(7).Parameters = [0.4247 3];
```

```
% Додається та налаштовується вихідна змінна
% та її функція приналежності.
fis.Outputs = fisvar([-17 36],'Name',"y");
% Вказується вихідні функції приналежності
% за допомогою вектора об’єктів fismf.
% Виберемо центри термів У, що описуються гаусовими функціями,
відповідно до табл. 8.1
mf1 = fismf("gaussmf",[3.751 -17],'Name',"y1");
mf2 = fismf("gaussmf",[3.751 -4],'Name',"y2");
mf3 = fismf("gaussmf",[3.751 0],'Name',"y3");
mf4 = fismf("gaussmf",[3.751 0],'Name',"y4");
mf5 = fismf("gaussmf",[3.751 3],'Name',"y5");
mf6 = fismf("gaussmf",[3.751 12],'Name',"y6");
mf7 = fismf("gaussmf",[3.751 36],'Name',"y7");
fis.Outputs.MembershipFunctions = [mf1 mf2 mf3 mf4 mf5 mf6 mf7];
% Створюються правила для нечіткої системи.
rule1 = fisrule([1 1 1 1],1);
rule2 = fisrule([2 2 1 1],1);
rule3 = fisrule([3 3 1 1],1);
rule4 = fisrule([4 4 1 1],1);
rule5 = fisrule([5 5 1 1],1);
rule6 = fisrule([6 6 1 1],1);
rule7 = fisrule([7 7 1 1],1);
rules = [rule1 rule2 rule3 rule4 rule5 rule6 rule7];
rules = update(rules,fis);
fis.Rules = rules;
% Перевірка введених правил
showrule(fis,[1 2 3 4 5 6 7],'symbolic')
% Графіки опису термів
figure(2)
plotmf(fis,'input',1); grid
figure(3)
plotmf(fis,'output',1);grid
% Перевірка правил
showrule(fis,[1 2 3 4 5 6 7],'symbolic')
% Побудова графіку апроксимації ф-ції
figure(4);
gensurf(fis); grid
% Графічний опис властивості описаної нечіткої системи
figure(5)
plotfis(fis);
```

Графічне уявлення опису термів вхідної змінної наведено на рисунку 8.2, а вихідної змінної на рису. 8.3. Терми описано гаусовським функціями приналежності, центри термів співпадають з значеннями

наведеними у таблиці 8.1.

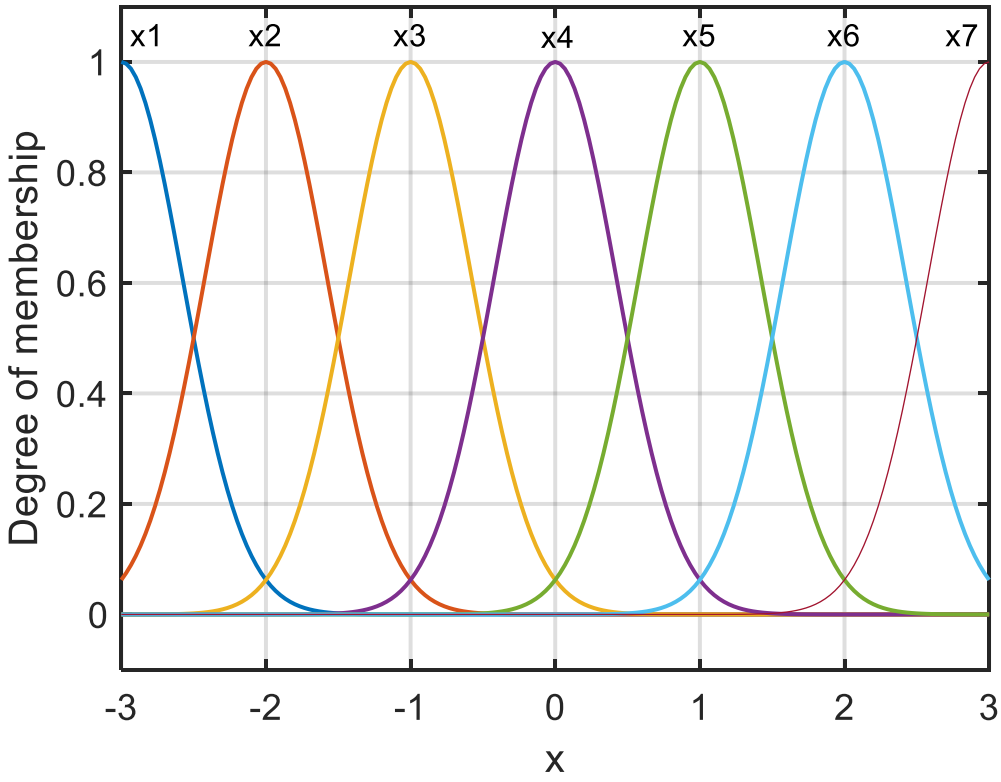


Рисунок 8.2 - Графічне уявлення опису термів вхідної змінної

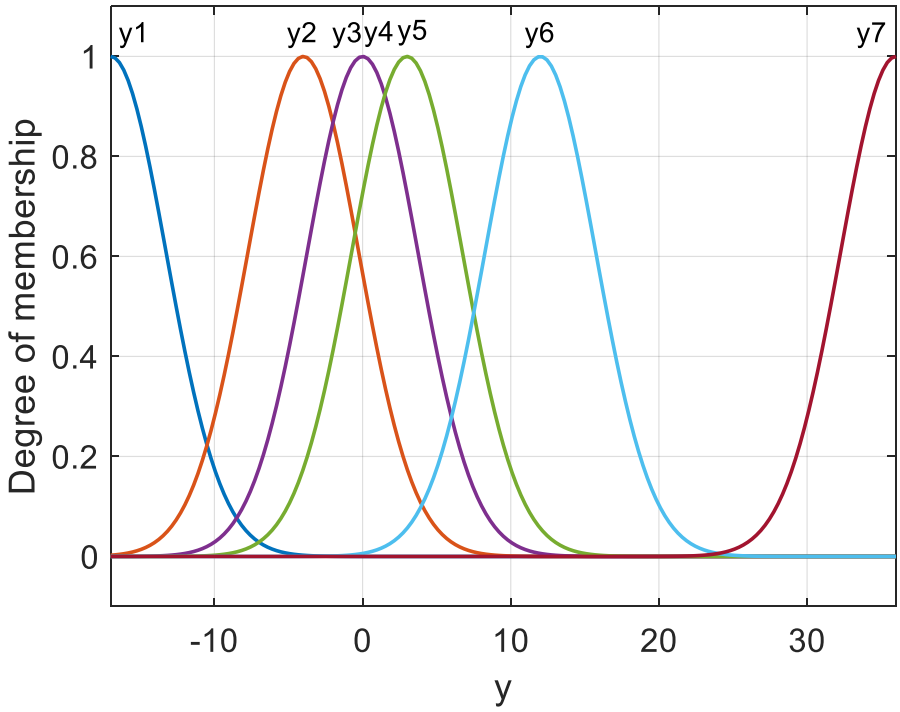


Рисунок 8.3 - Графічне уявлення опису термів вихідної змінної

На рис. 8.4 показаний результат апроксимації вихідної функції за допомогою системи нечітких правил.

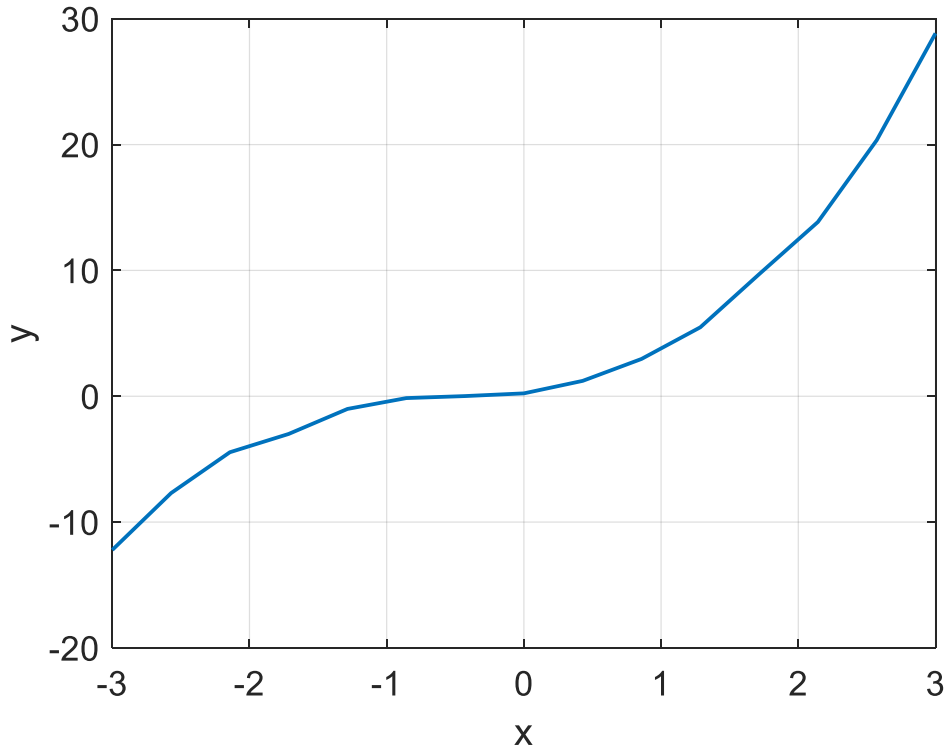


Рисунок 8.4 – Результат апроксимації вихідної функції за допомогою системи нечітких правил

На рисунку 8.5 зображено графічний опис властивості описаної нечіткої системи.

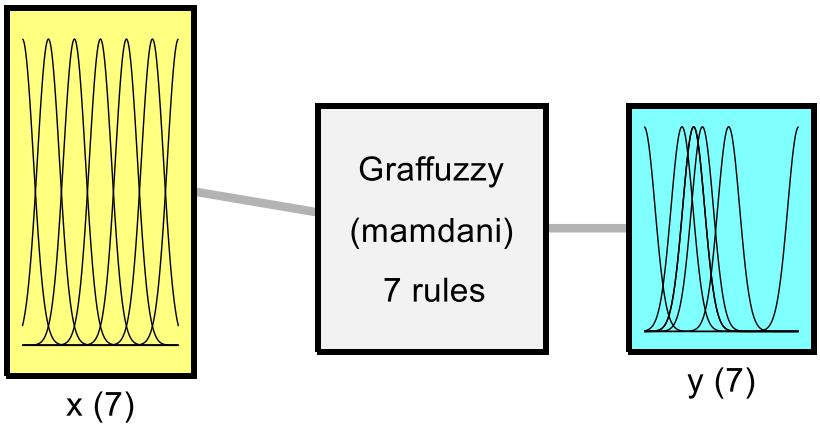


Рисунок 8.5 – Графічний опис властивості описаної нечіткої системи

2 варіант вирішення завдання з використанням редактора системи нечіткого висновку.

Викликається редактор системи нечіткого виведення (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головне вікно редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 8.6.).

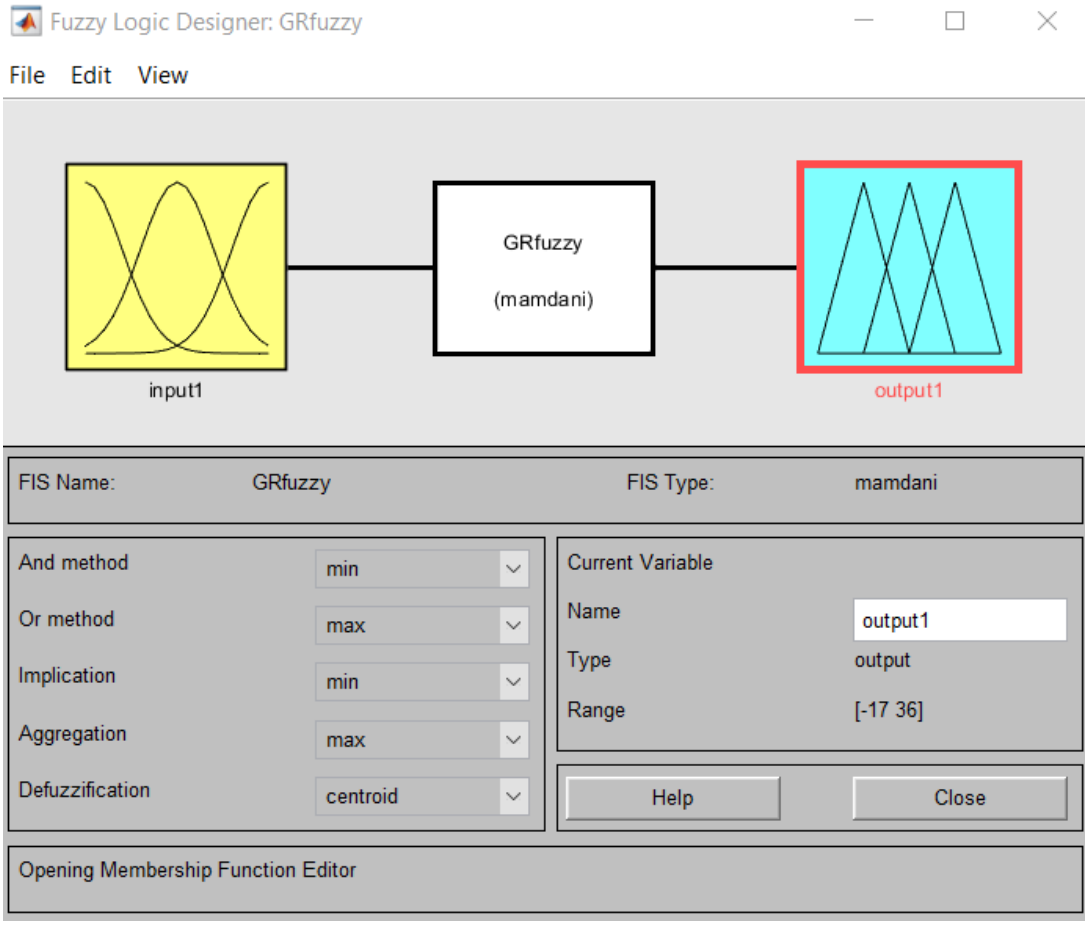


Рисунок 8.6 - Інтерфейс FIS editor

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язоку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

У меню *Edit* послідовно додаємо 7 вхідних з розміром базової шкали (*Range*= [-3 3]) та 7 вихідних змінних з розміром базової шкали (*Range*= [-17 36]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної *x* гаусовську функцію приналежності. З параметрами:

Name = "x1"; Type = "gaussmf"; Param = [0.4247 -3];
Name = "x2"; Type = "gaussmf"; Param = [0.4247 -2];
Name = "x3"; Type = "gaussmf"; Param = [0.4247 -1];
Name = "x4"; Type = "gaussmf"; Param = [0.4247 0];
Name = "x5"; Type = "gaussmf"; Param = [0.4247 1];
Name = "x6"; Type = "gaussmf"; Param = [0.4247 2];
Name = "x7"; Type = "gaussmf"; Param = [0.4247 3];

Для опису вихідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної

вихідної змінної *y* гаусовську функцію приналежності. З параметрами:
Name = "y1"; Type = "gaussmf"; Param = [3.751 -3];
Name = "y2"; Type = "gaussmf"; Param = [3.751 -2];
Name = "y3"; Type = "gaussmf"; Param = [3.751 -1];
Name = "y4"; Type = "gaussmf"; Param = [3.751 0];
Name = "y5"; Type = "gaussmf"; Param = [3.751 1];
Name = "y6"; Type = "gaussmf"; Param = [3.751 2];
Name = "y7"; Type = "gaussmf"; Param = [3.751 3];

Примітка. У якості центрів термів, що описуються гаусовими функціями, обрані значення відповідно до табл. 8.1.

Приклад налаштування головного вікна редактора *Membership Function Editor* показано на рис. 8.7.

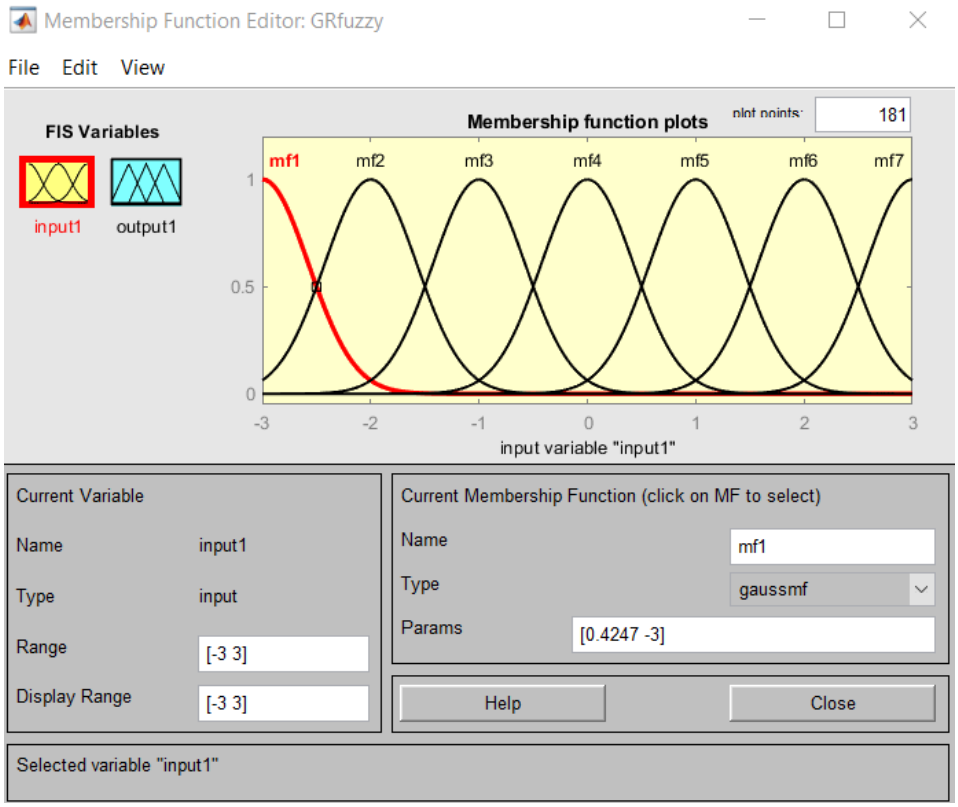


Рисунок 8.7 - Приклад налаштування головного вікна редактора Membership Function Editor

Після опису вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor. Налаштовування правил для даного випадку наведено на рисунку (рис. 8.8).

Посилки у правилах можуть бути пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1).

Після опису правил можливо за допамогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого логічного висновку за різних вхідних даних (див. рис. 8.9);

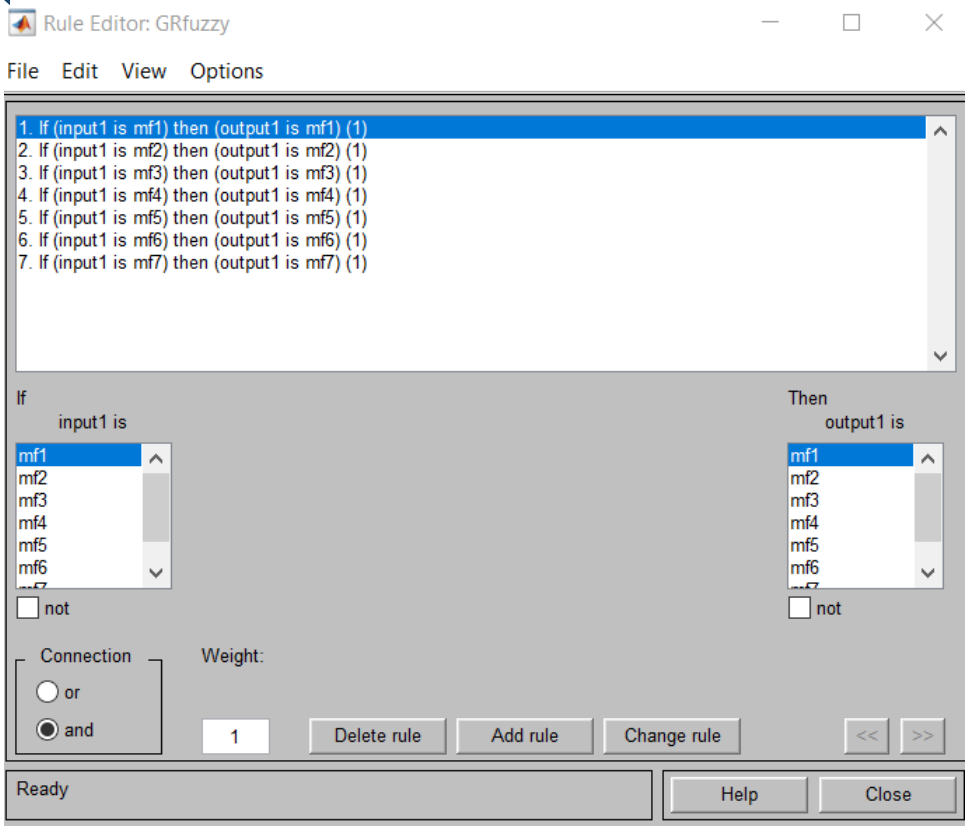


Рисунок 8.8 – Інтерфейс ruleedit

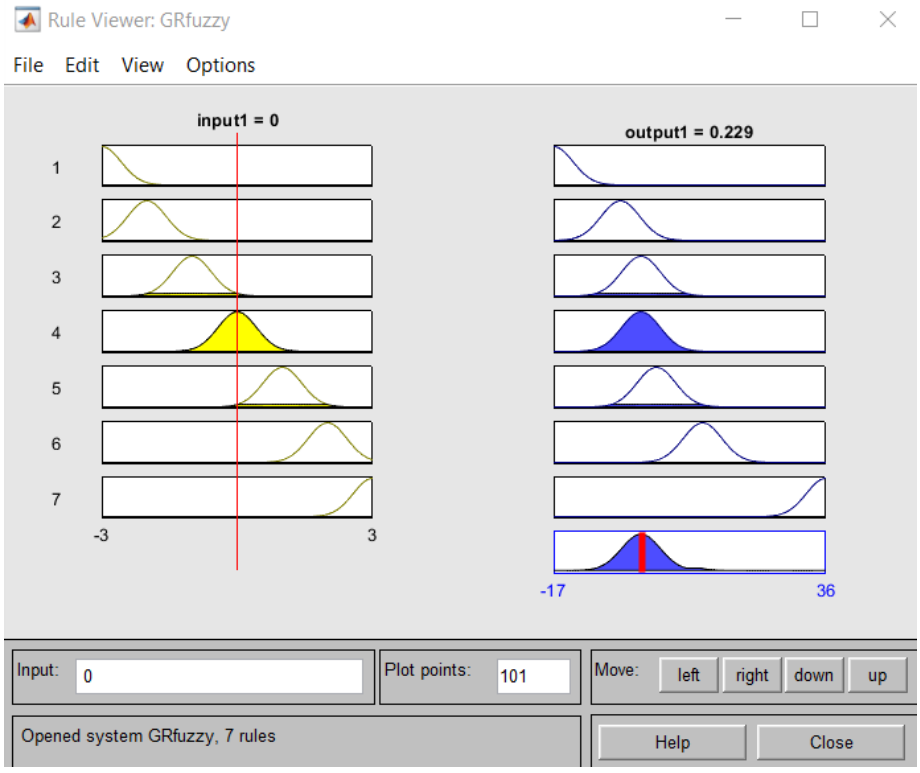


Рисунок 8.9 - Робота системи нечіткого логічного висновку

– інтерфейсу *Surface Viewer* можливо переглянути керуючу поверхню нечіткої логічної системи, яка виходить при подачі на вхід

системи різних допустимих значень (рис. 8.10).

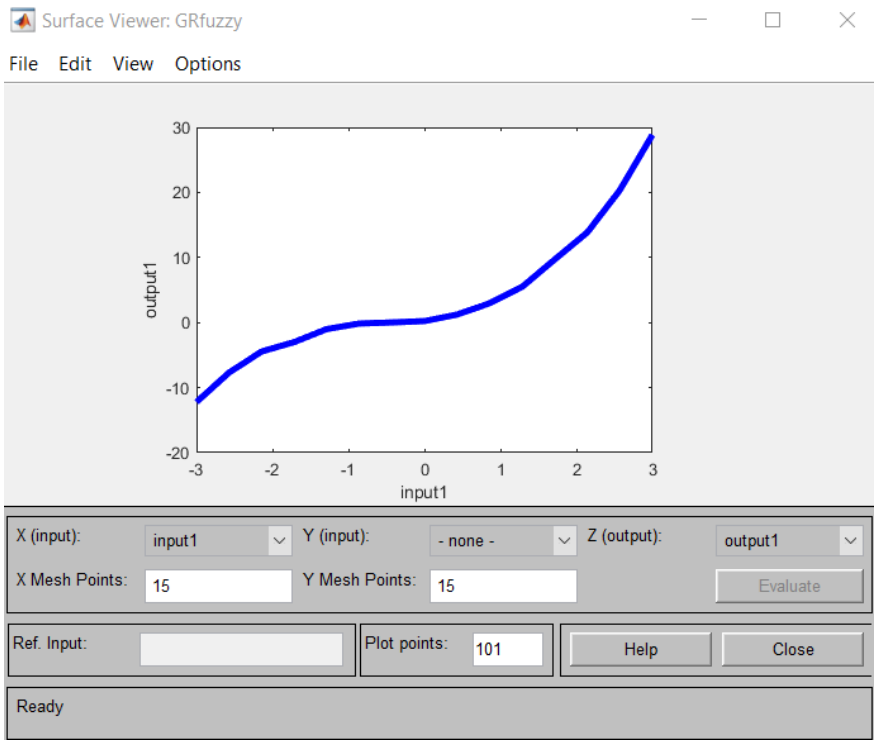


Рисунок 8.10 – Апроксимаційна крива побудована системою нечіткого логічного висновку

Отримана крива не цілком відповідає графіку вихідної функції $y=x^2 + x^3$, проте якість апроксимації можна покращити, якщо змінити форму термів, що описують входи та виходи нечіткої системи, або додати нові правила.

8.2 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 8.2.
За вказаними у табл. 8.2 потрібно підібрати такі параметри системи нечіткого висновку, при яких виходить апроксимація заданої кривої:

Таблиця 8.2 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар.	Завдана функція	Функція приналежності
1	$y = 3x^2 + x^3 + 2x$	*'gaussmf'*
2	$y = 2x^2 + 2x^3 + 3$	*'trapmf'*
3	$y = x^2 + 2x^3 + 4$	*'gauss2mf'*
4	$y = 2x^2 + x^3 + 3x$	*'sigmf'*
5	$y = x^2 + x^3 + 3x + 2$	*'smf'*
6	$y = 3x^2 + 2x^3 + x + 1$	*'zmf'*

Продовження табл. 8.2

№ вар.	Завдана функція	Функція приналежності
7	$y = 5x^2 + x^3 + 2x$	*'zmf'*
8	$y = 2x^2 + 2x^3$	*'sigmf'*
9	$y = 3x^2 + x^3 + 2x$	*'smf'*
10	$y = 2x^2 + 2x^3 + 3$	*'trapmf'*
11	$y = x^2 + 2x^3 + 4$	*'gauss2mf'*
12	$y = 2x^2 + x^3 + 3x$	*'gaussmf'*
13	$y = x^2 + x^3 + 3x + 2$	*'gaussmf'*
14	$y = 3x^2 + 2x^3 + x + 1$	*'gauss2mf'*
15	$y = 5x^2 + x^3 + 2x$	*'sigmf'*
16	$y = 2x^2 + 2x^3$	*'smf'*
17	$y = x^2 + 2x^3 + 4$	*'zmf'*
18	$y = 2x^2 + x^3 + 3x$	*'gauss2mf'*
19	$y = x^2 + x^3 + 3x + 2$	*'gaussmf'*
20	$y = 3x^2 + 2x^3 + x + 1$	*'smf'*

8.3 Контрольні питання

1. Опишіть схему нечіткого виводу Mamdani.
2. Чим відрізняється схема нечіткого виведення Larsen від схеми Mamdani?
3. Чим відрізняється схема нечіткого виведення Tsukamoto від схеми Mamdani?
4. Опишіть схему нечіткого виводу Sugeno.
5. Які варіанти існують для операції агрегування у нечіткій логічній системі?
6. Нечітка продукційна система є універсальним апроксиматором – що це означає?
7. Які умови повинні виконуватися для нечіткої системи як універсального апроксиматора?
8. Що таке дефаззифікація?
9. Опишіть основні варіанти виконання операції дефазифікації?

9 СИНТЕЗ НЕЛІНІЙНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА П-ТИПУ

Мета роботи: засвоєння методики синтезу нелінійного нечіткого регулятору П-типу з використанням редактора системи нечіткого висновку

9.1 Теоретичні основи синтезу нечіткого регулятору П-типу

Сформулюємо умови лінійної поведінки нечіткого логічного регулятору П-типу (НЛР_П):

1) використовуються трикутні функції приналежності;

2) терми утворюють нечітке розбиття відповідних базових множин;

3) для дефазифікації використовується дискретний метод центру тяжкості.

При цих припущеннях кожне значення e має ненульове значення приналежності до двох сусідніх терм T_i та T_{i+1} з центрами e_i та e_{i+1} (див. рис. 9.1).

Значення приналежності для точки $e_i < e < e_{i+1}$ розраховуються за формулами:

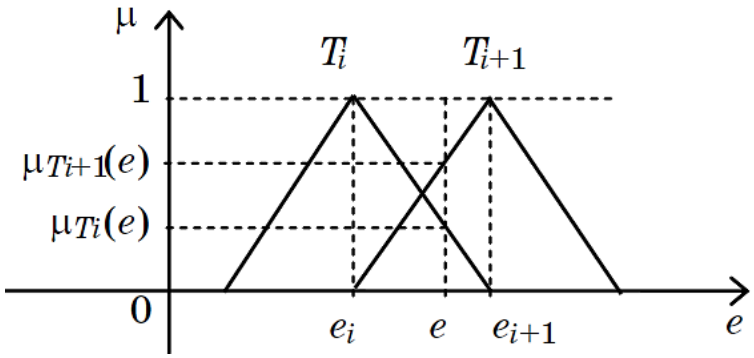


Рисунок 9.1 – Перехідні процеси при різних коефіцієнтах підсилення

$$\mu_{T_i}(e) = \frac{e_{i+1} - e}{e_{i+1} - e_i}, \mu_{T_{i+1}}(e) = \frac{e - e}{e_{i+1} - e_i}.$$

У такій ситуації спрацьовують два правила:

R_1: Якщо $e = T_i(e)$, то $u = T_i(u)$,
R_2: Якщо $e = T_{i+1}(e)$, $u = T_{i+1}(u)$.

При використанні дискретного методу центру тяжіння має значення тільки u_i − центральна точка терму $T_i(u)$ і результат дефазифікації описується формулою:

$$u = \frac{\mu_{T_i}(e)u_i + \mu_{T_{i+1}}(e)u_i}{\mu_{T_i}(e) + \mu_{T_{i+1}}(e)} = \mu_{T_i}(e)u_i + \mu_{T_{i+1}}(e)u_{i+1=}$$
$$= \frac{e_{i+1} - e}{e_{i+1} - e_i}u_i + \frac{e - e}{e_{i+1} - e_i}u_{i+1}.$$

Цей вираз можна переписати у вигляді

$$u = \frac{u_{i+1} - u_i}{e_{i+1} - e_i}e + \frac{e_{i+1}u_i - e_iu_{i+1}}{e_{i+1} - e_i} = Ke + C, \qquad (9.1)$$

де *K* – коефіцієнт підсилення; *C* - зміщення

Зауважимо, що (9.1) стосується лише постійного діапазону між e_i та e_{i+1}. Якщо відстань між термами змінюється, змінюватимуться і константи *K* і *C*.

Формула (9.1) показує, що для еквівалентності поведінки НЛР_П і звичайного П-регулятора необхідно виконання двох умов:

1) значення *K* має бути однаковим у всьому діапазоні зміни помилки *e*:

$$\frac{u_{i+1} - u_i}{e_{i+1} - e_i} = K, \qquad \forall i \in \{1, N-1\} \qquad (9.2)$$

2) значення зсуву *C* повинно бути нульовим, що виконується при:

$$\frac{e_{i+1}}{e_{i+1}} = \frac{u_{i+1}}{u_i}, \quad \forall i \in \{1, N-1\} \qquad (9.3)$$

де N – кількість термів.

Таким чином, НЛР _П, для якого справедливо (9.2) та (9.3), описується формулою

$$u = Ke. \qquad (9.4)$$

Оскільки для лінійного НЛР_П кількість термів не має значення, розглянемо регулятор із трьома правилами.

У разі використання дискретного методу центру тяжкості вихід регулятора можна описати з допомогою рис. 11.56.

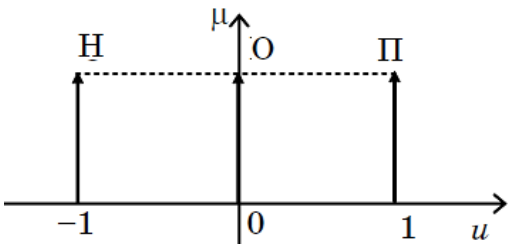


Рисунок 9.2 – Опис виходу регулятора з трьома правилами

Відповідно до рис. 9.2 виконується умова:

$$u_{i+1} - u_i = 1.$$

Нехай базову шкалу вхідної змінної описано відповідно до рис. 9.3.

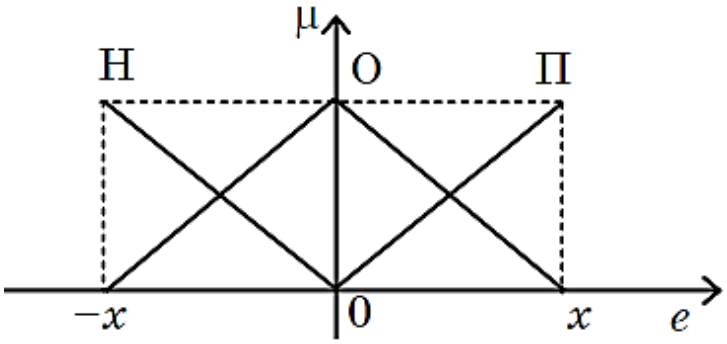


Рисунок 9.3 – Опис входу регулятора з трьома правилами

Тоді для вхідної змінної відстань між центрами термів:

$$e_{i+1} - e_i = x, \quad x \in [0,1]$$

Тоді

$$K = \frac{\Delta u}{\Delta e} = \frac{1}{x}. \qquad (9.5)$$

і що менше x, то більше вписувалося коефіцієнт посилення.
Закон управління можна описати з допомогою табл. 9.1.

Таблиця 9.1 - Закон управління НЛР_П із трьома правилами

	Н	0	П
e	-*x*	0	*x*
u	-1	0	1

Вибір параметра x визначає нахил кривої, що описує закон керування (див. рис. 9.4). Чим менше значення x, тим ближче виявляється закон керування до релейного (при x → 0 регулятор працює за знаком помилки).

Коефіцієнт посилення повинен бути великим наприкінці перехідного процесу – для зменшення статичної помилки. На початку перехідного процесу потрібно мати менший коефіцієнт посилення, щоб уникнути надмірного перерегулювання.

Формула (9.5) дозволяє легко налаштовувати значення змінного коефіцієнта посилення для різних ділянок базової шкали вхідної змінної.

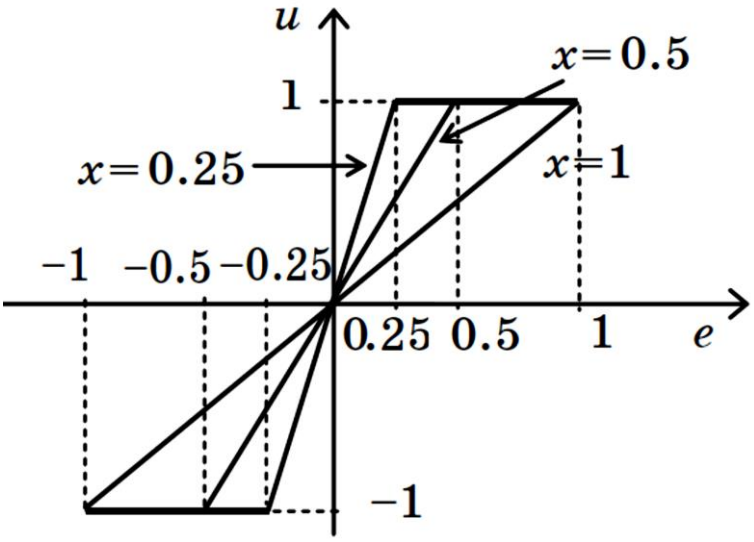


Рисунок 9.4 – Варіанти закону управління для НЛР_П з трьома правилами

Наприклад, розглянемо НЛР_П із п'ятьма термами, де дві пари термів розташовані симетрично щодо нуля (див. рис. 9.5).

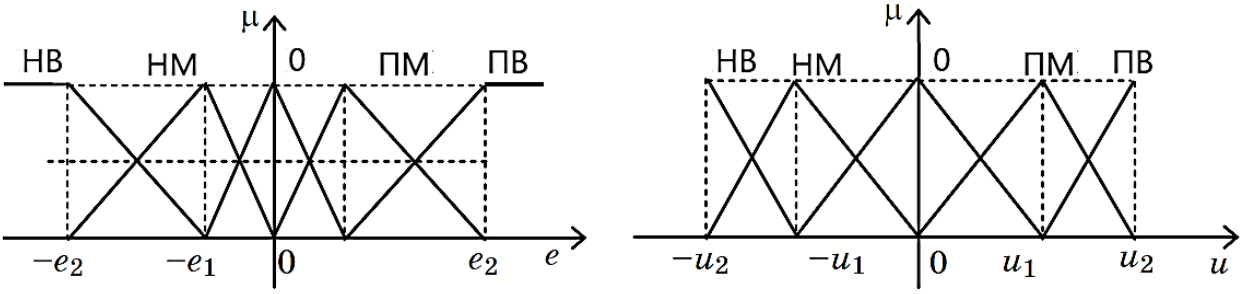


Рисунок 9.5 – Варіант опису термів НЛР_П з п’ятьма правилами

На підставі (9.5), закон управління визначає табл. 9.2.

Таблиця 9.2 – Типовий закон управління НЛР_П із п'ятьма правилами

	НВ	НМ	0	ПМ	ПВ
e	$-e_2$	$-e_1$	0	e_1	e_2
u	$-u_2$	$-u_1$	0	u_1	u_2

На ділянці між центрами термів 0 і НМ, а також 0 і ПМ коефіцієнт посилення

$$K_1 = \frac{u_1}{e_1} = -\frac{u_1}{e_1}.$$

На ділянках між центрами термів ПРО та ОМ, а також ПМ та ПБ

коефіцієнт посилення

$$K_2 = \frac{u_2 - u_1}{e_2 - e_1} = \frac{-u_2 + u_1}{-e_2 + e_1}.$$

Наприклад, нехай вибрано значення центрів термів, показані в табл. 9.3.

Тоді

$$K_1 = \frac{0{,}3}{0{,}5} = 0{,}6; \quad K_2 = \frac{1 - 0{,}3}{1 - 0{,}5} = 1{,}4.$$

Таблиця 9.3 - Варіант закону управління НЛР_П із п'ятьма правилами

	НВ	НМ	0	ПМ	ПВ
e	-1	-0.5	0	0.5	1
u	-1	-0.3	0	0.3	1

Графічне уявлення закону управління показано на рис. 9.6.

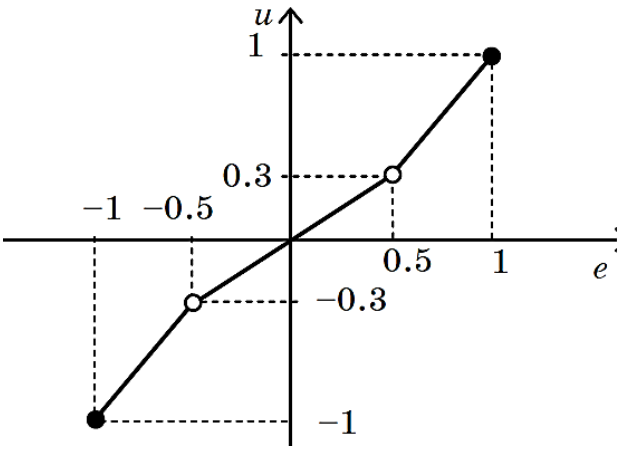


Рисунок 9.6 – Закон управління для регулятора з п’ятьома правилами

Як свідчить рис. 9.6, конфігурація кривої управління залежить від положення точок перегину (білі кружки), координати яких відповідають центрам термів НМ та ПМ вхідний та вихідний змінної НЛР_П (див. табл. 9.3). Оскільки ці центри симетричні, процес конструювання НЛР_П з п'ятьма правилами зводиться до вибору двох параметрів.

Якщо розглядати сім термів, то вибору підлягають 4 параметри, якщо дев'ять - то 6 і т.д. Таким чином, при *N* термах кількість параметрів, що настроюються *K* = *N* - 3.

У загальному випадку кількість термів (і, відповідно, правил) має бути такою, щоб задовольнити всі поставлені вимоги.

Розглянемо задачу конструювання нелінійного НЛР_П зі змінним коефіцієнтом посилення K_f як завдання корекції лінійного П-регулятора, що описується коефіцієнтом k_p. Тут можливі два варіанти корекції (рис. 9.7 та рис. 9.8).

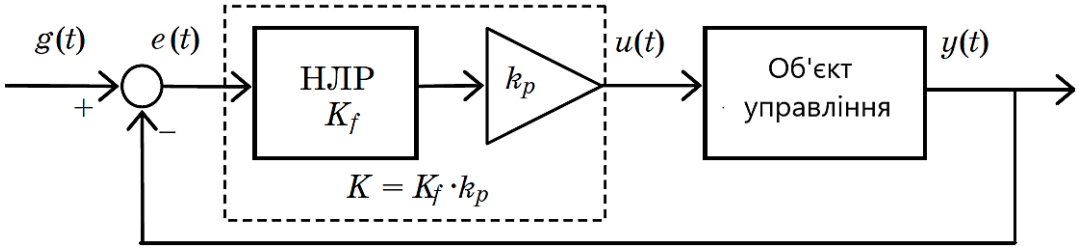


Рисунок 9.7 – Послідовна корекція П-регулятора

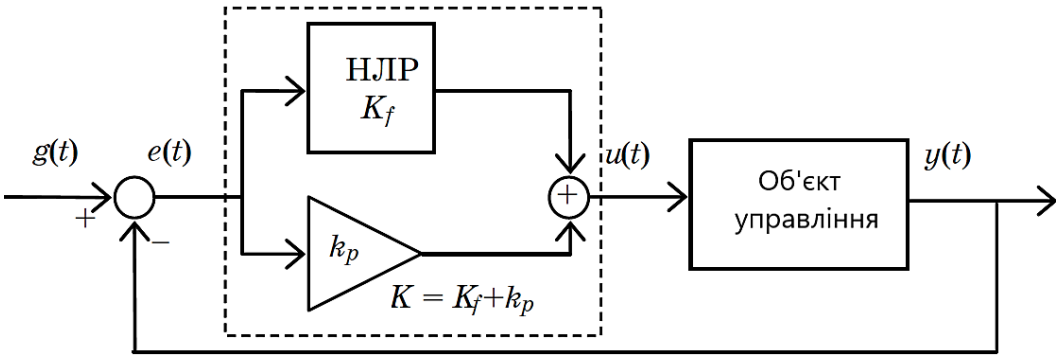


Рисунок 9.8 – Паралельна корекція П-регулятора

У цих структурах k_p визначає базовий коефіцієнт посилення. Постає питання – яким слід вибрати k_p? Оскільки НЛР_П має забезпечувати додаткове посилення, можна зажадати, щоб базовий П-регулятор забезпечував умову y_{max}=1. Тим самим гарантується, що помилка прийматиме всі значення в межах шкали [0, 1]. Інші параметри перехідного процесу можуть бути покращені за рахунок використання НЛР_П.

Таким чином, перший крок синтезу полягає у налаштуванні такого k_p, при якому забезпечується нульове перерегулювання (K_f = 1 (див. рис. 9.7) або K_f = 0 (див. рис. 9.8).

Базовий коефіцієнт посилення є дійсним числом, яке може набувати широкого діапазону значень залежно від об'єкта управління. Таким чином, можна або давати збільшення базовому коефіцієнту (див. рис. 9.8), або масштабувати його (див. рис. 9.7).

Далі розглядатимемо варіант послідовної корекції (див. рис.9.7) при використанні НЛР _П з сімома правилами.

Відповідно до (9.5) маємо

$$K_f = \frac{\Delta u}{\Delta e},$$

таким чином для отримання бажаного коефіцієнта посилення не обов'язково міняти обидва коефіцієнти – можна міняти тільки Δ*u* або Δ*e*, проте |Δ*u*| ≤ 1, тому далі оперуватимемо величиною Δ*e*.

Припустимо, що вихідні терми змінної НЛР_П рівномірно розподілені за базовою шкалою (див. рис. 9.9), тобто |Δ*u*|= 0,33.

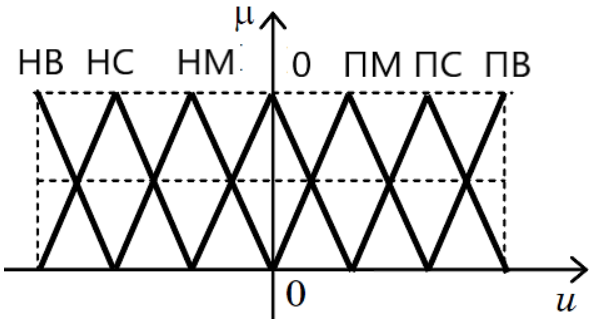


Рисунок 9.9 – Терми вихідної змінної НЛР_П із сімома правилами

Якщо терми вхідної змінної також рівномірно розташувати за базовою шкалою, то K_f = 1 будь-якого значення помилки (рис. 9.10).

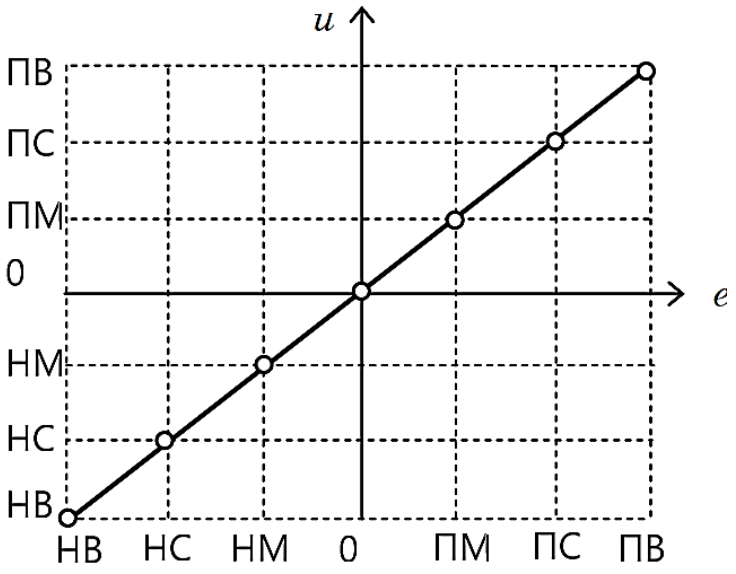


Рисунок 9.10 - Управляюча крива при рівномірному розподілі термів

На рис. 9.10 білими кружками позначені точки, у яких спрацьовує лише одне правило. Ці точки перебувають на перетині ліній, проведених із центрів однойменних термів. При переміщенні *e* між центрами термів керування лінійно змінюється. Таким чином, при семи керуючих правилах виходить п'ять лінійних ділянок закону управління.
Змінивши розташування центрів проміжних термів на базовій шкалі вхідної змінної можна отримати нелінійний закон управління (див. рис. 9.11).

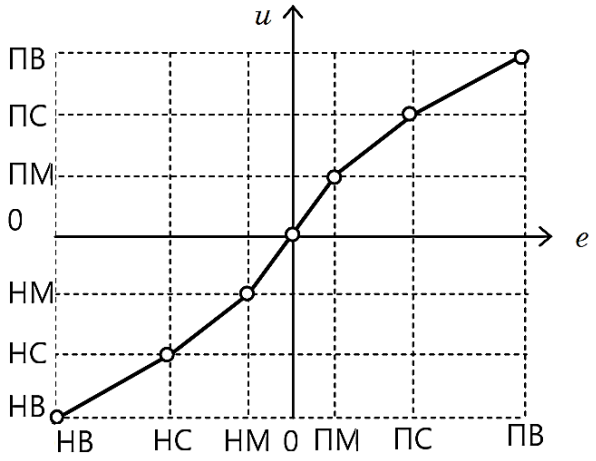


Рисунок 9.11 - Управляюча крива при нерівномірному розподілі термів

Центри термів НВ та ПВ для вхідної та вихідної змінної знаходяться у крайніх становища – у точках –1 та +1.

Розглянемо завдання вибору положення центру ПС (НС). За визначенням помилка e має в околиці цього терму середнє значення, тому вибір цього терму впливає на час наростання перехідного процесу: чим ближче ПС до ПВ, тим меншим буде час наростання, але при цьому можливе зростання перерегулювання.

При виборі положення центру ПМ (НМ) слід враховувати, що в околиці цього терма помилка має мале значення, отже, від вибору центру цього терму залежить значення помилки, що встановилася: чим менше Δe (тобто чим ближче ПМ і 0), тим більше K_f, і тим менше встановилася помилка.

Узагальнюючи всі вищенаведені міркування, можна остаточно сформулювати алгоритм синтезу нелінійного НЛР_П у межах структури, показаної на рис. 9.7.

1. Терми вхідних і вихідних змінних розподіляються рівномірно за базовими шкалами, отже K_f = 1. Вибирається значення k_p, у якому виконується умова y_{max}=1.

2. Розглядається регулятор із трьома правилами (див. рис. 9.2, 9.3). Вибирається таке значення x_1 (див. рис. 9.3), за якого забезпечується мінімальний час наростання при максимально допустимому перерегулюванні.

3. Знову розглядається регулятор із трьома правилами. Вибирається таке значення x_2, при якому забезпечується мінімальна помилка, що встановилася.

4. Розглядаються графіки трьох законів управління. Терми вихідної змінної регулятора можна рівномірно розташувати за відповідною базовою шкалою (див. рис. 9.9).

Для визначення положення центрів термів ПМ та ПС по осі e розглядаються точки перетину ліній, проведених із центрів термів ПМ та ПС по осі u та прямих, що описують закони управління x_1 та x_2 (див.

рис. 9.12). Координати точок перетину по осі *e* дають положення центрів термів ПМ та ПС для вхідної змінної регулятора.

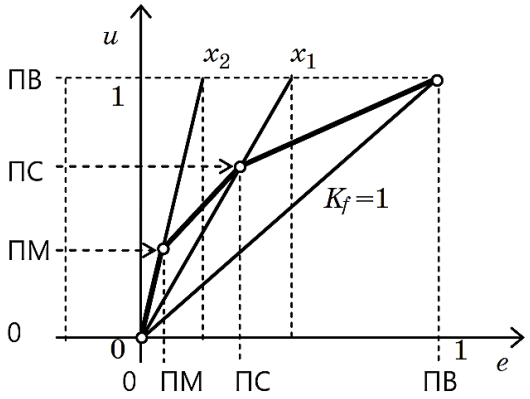


Рисунок 9.12 – Визначення положення термів НЛР_П

Очевидні геометричні розрахунки дозволяють описати закон управління як табл.9.4.

Таблиця 9.4 – Закон управління НЛР_П

	НВ (негативне велике)	НС (негативне середнє)	НМ (негативне мале)	Н (нульове)	ПМ (позитивне мале)	ПС (позитивне середнє)	ПВ (позитивне велике)
e	-1	$-0{,}66x_2$	$-0{,}33x_1$	0	$0{,}33x_1$	$0{,}66x_2$	1
u	-1	-0,66	0,33	0	0,33	0,66	1

Ширина всіх термів (включаючи терм 0) вибирається таким чином, щоб забезпечити нечітке розбиття базової шкали вхідної змінної (див. рис. 9.13).

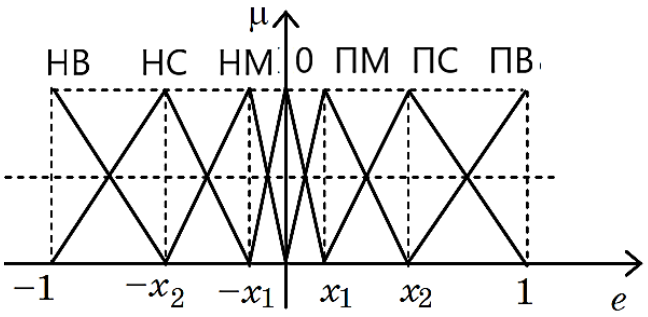


Рисунок 9.13 – Результати налаштування нечіткого регулятора П-типу

Нечіткий регулятор П-типу є основою розробки НЛР_ПД, НЛР_ПІ та НЛР_ПІД, оскільки використання у законі управління похідної помилки може зменшити перерегулювання, а використання інтеграла помилки – зменшити встановлену помилку.

Таким чином, розробка НЛР_П є першим кроком при проектуванні

складніших нечітких регуляторів.

9.2 Приклад синтезу нечіткого регулятора П-типу

У Simulink MatLab контейнером для системи нечіткого логічного висновку є блок Fuzzy Logic Controller (пакет Fuzzy Logic ToolBox).

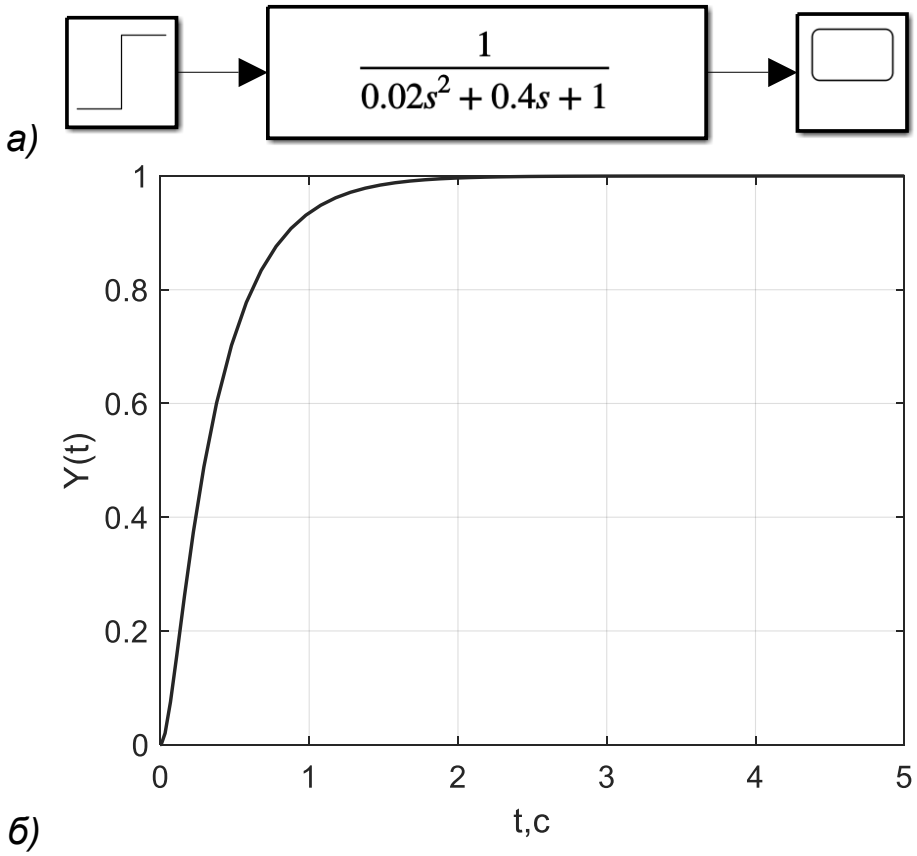
Синтезуємо нелінійний НЛР_П відповідно до методики, викладеної в п. 9.1, для об'єкта, що описується передаточною функцією:

$$W(p) = \frac{1}{0.02p^2 + 0.4p + 1}.$$

Цей об'єкт є стійким, але час перехідного процесу дуже великий (див. рис. 9.14).

Потрібно забезпечити перехідний процес з малим часом наростання, що встановилася помилкою Δ ≤ 3% та перерегулюванням d ≤ 10%.

Використовуватимемо описаний вище 3-кроковий алгоритм проектування.



а) математична модель; б) графік перехідного процесу

Рисунок 9.14 – Математичне моделювання об'єкта управління

1. Розглянемо НЛР_П з із сімома правилами, що має одиничний коефіцієнт посилення (див. рис. 9.9 та 9.13). Такий регулятор не впливає процес управління. Виберемо базовий коефіцієнт посилення k_p=6.5, при цьому забезпечується умова y_{max} = 1 (див. рис. 9.15 та 9.16).

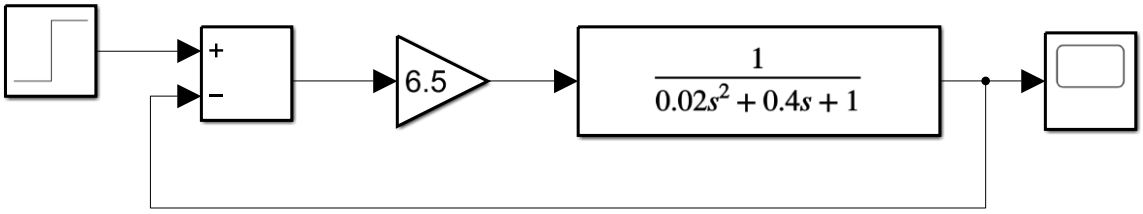


Рисунок 9.15 – Математична модель САУ з базовим П-регулятором

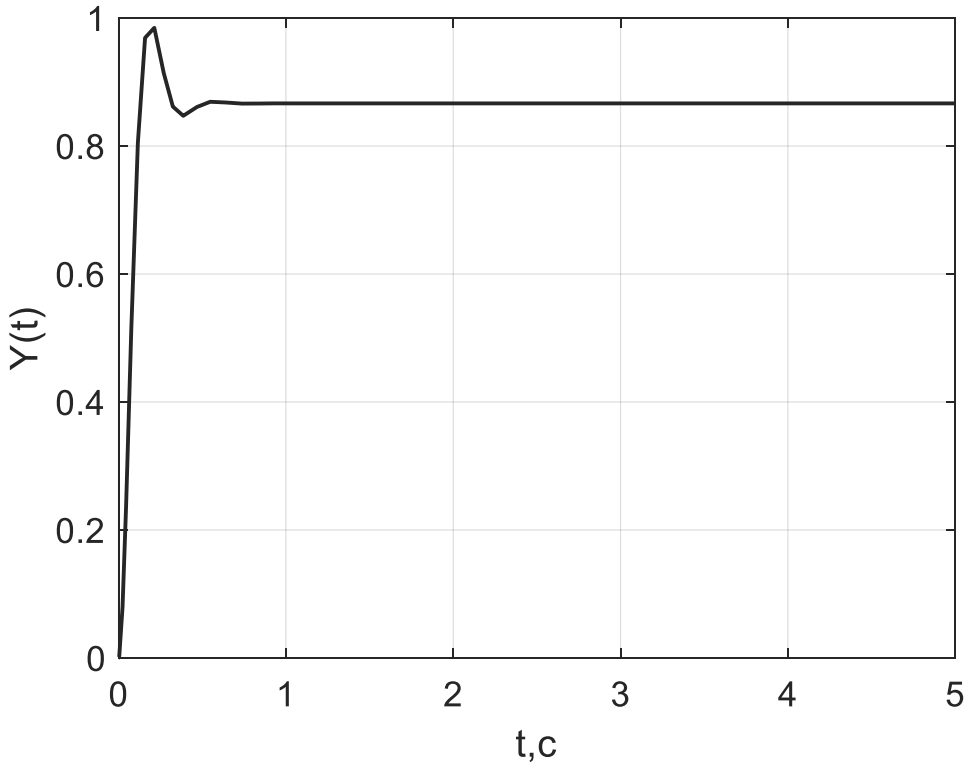


Рисунок 9.16 – Графік перехідного процесу при базовому коефіцієнте підсилення

Таким чином, центрами термів НВ та ПВ будуть точки –1 та 1.

2. Розглянемо НЛР_П із сімома правилами (рис. 9.17).

Блок Saturation використовується для приведення вхідної змінної до заданого діапазону [-1;1]. Терми вихідний змінної регулятора розташовуються за базовою шкалою відповідно до рис. 11.63, терми вхідної змінної – відповідно до рис. 9.13. Методом спроб та помилок вибирається значення x_1 = 0.5 (рис. 9.13), при цьому забезпечується мінімальний час наростання при заданому перерегулюванні.

Центрами термів ОС та ПС будуть точки –0.5 та 0.5.

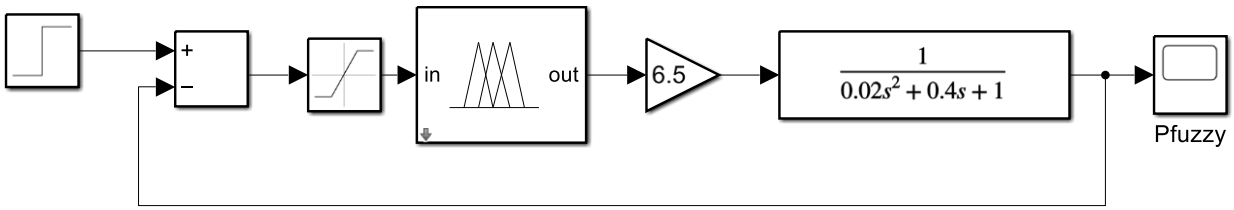


Рисунок 9.17 – Математична модель системи управління з нечітким регулятором

3. На третьому кроці знову розглядається НЛР_П із сім'ю правилами. Вибирається коефіцієнт посилення регулятора x_2 такий, щоб Δ<3%. Центрами термів НМ та ПМ будуть точки –0.1 та 0.1.

4. На останньому етапі необхідно отримати нелінійний закон управління НЛР_П. Центри термів вхідної (*e*) вихідний змінної (*u*) розраховуються відповідно до табл. 9.4. У таблиці 9.5 наведено закон управління проектованим НЛР_П.

Таблиця 9.5 – Закон управління проектованим НЛР_П

	НВ (негативне велике)	НС (негативне середнє)	НМ (негативне мале)	Н (нульове)	ПМ (позитивне мале)	ПС (позитивне середнє)	ПВ (позитивне велике)
e	-1	-0,33	-0,033	0	0,033	0,33	1
u	-1	-0,66	0,33	0	0,33	0,66	1

Вирішимо дане завдання згідно описаного алгоритму з використанням редактора системи нечіткого висновку.

Будуємо у MatLab Simulink математичну модель об’єкту керування з послідовним включення Fuzzy Logic Controller до класичного регулятора (див. рис. 9.17). Fuzzy Logic Controller надаємо Fis name: Pfis7 (ім’я може буди будь-яке).

Викликається редактор системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 9.18.).

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

У меню *Edit* послідовно додаємо вхідну змінну з розміром базової шкали (Range= [-1 1]) та вихідну змінну з розміром базової шкали (*Range*= [-1 1]).

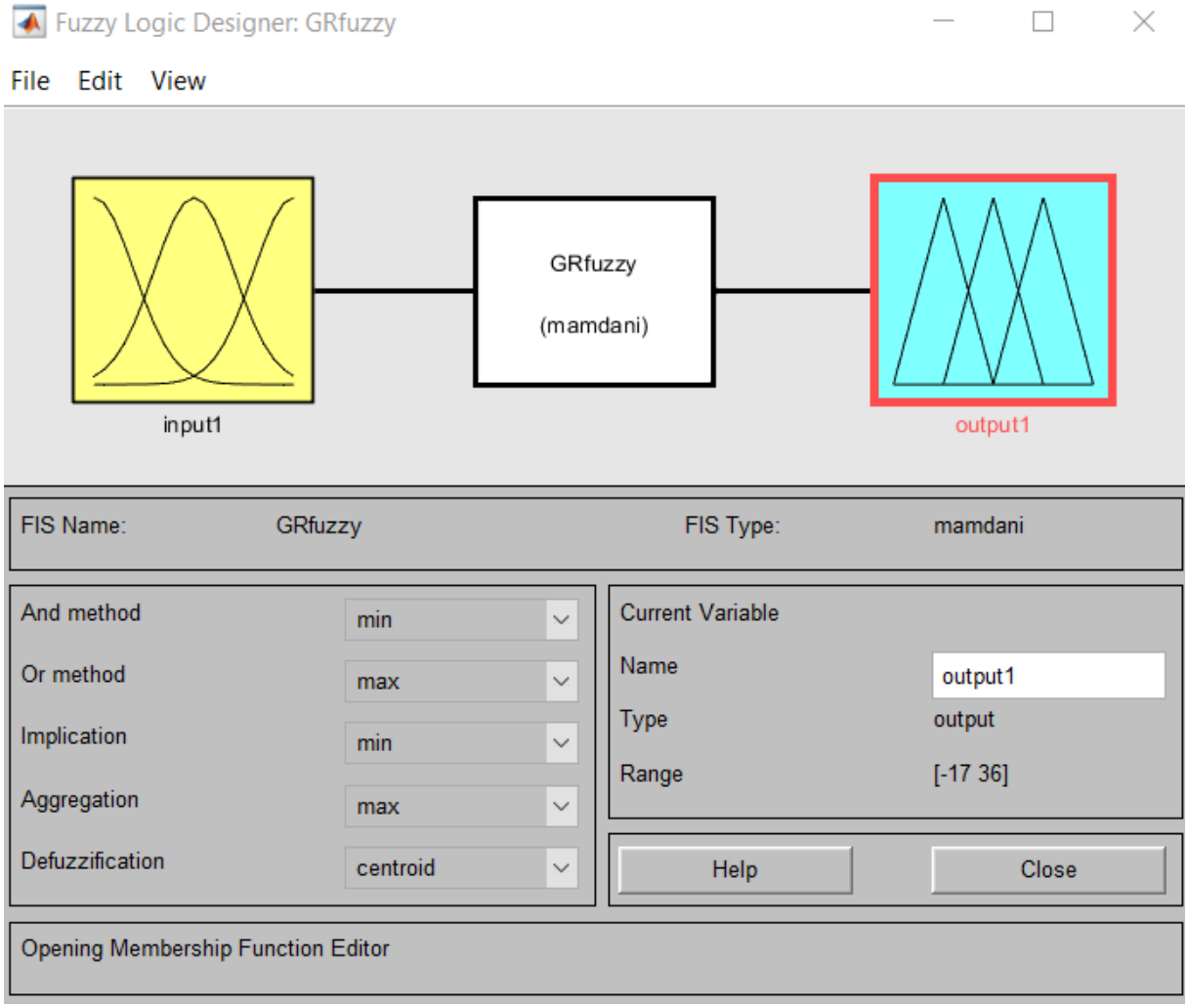


Рисунок 9.18 – Налаштування інтерфейсу FIS editor

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:
Name = "NB"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.33];
Name = "NM"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.33 -0.03];
Name = "NS"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 -0.033 0];
Name = "Z"; Type = " trimf"; Param = [-0.1 0 0.1];
Name = "PS"; Type = " trimf"; Param = [0 0.033 0.33];
Name = "PM"; Type = " trimf"; Param = [0.033 0.33 1];
Name = "PB"; Type = "trimf"; Param = [0.33 1 1.33].
Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 9.19.

Для опису вихідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

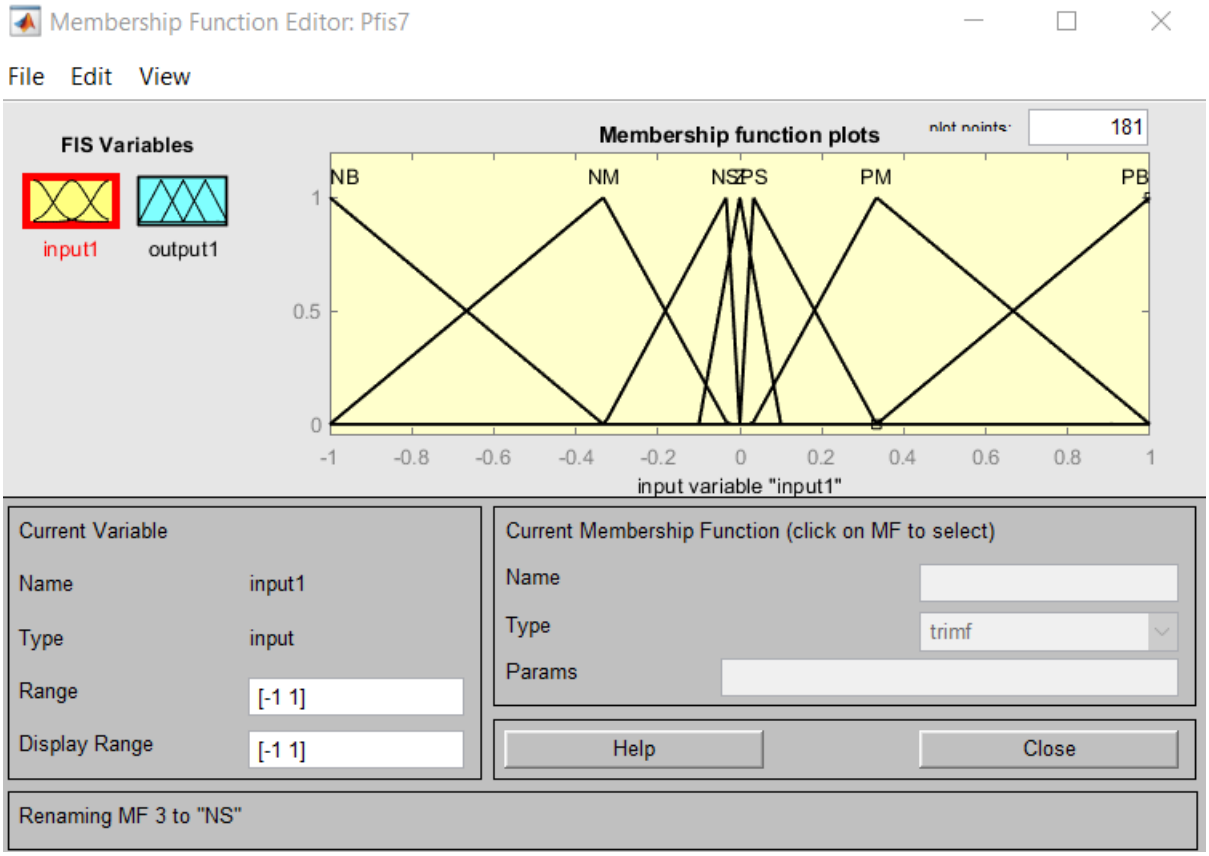


Рисунок 9.19 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних

Name = "NBu"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
Name = "NMu"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
Name = "NSu"; Type = " trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
Name = "Zu"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];
Name = "PSu"; Type = " trimf"; Param = [0 0.33 0.66];
Name = "PMu"; Type = " trimf"; Param = [0.33 0.66 1];
Name = "PBu"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вихідних змінних наведено на рис. 9.20.

Примітка. У якості центрів термів, що описуються функціями приналежності, обрані значення відповідно до табл. 9.5.

Після опису вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку дорівнює 7.

1. if (input1 is NB) then (output1 is NBu) (1)
2. if (input1 is NM) then (output1 is NMu) (1)
3. if (input1 is NS) then (output1 is NSu) (1)
4. if (input1 is Z) then (output1 is Zu) (1)
5. if (input1 is PS) then (output1 is PSu) (1)
6. if (input1 is PM) then (output1 is NMu) (1)
7. if (input1 is PB) then (output1 is PBu) (1)

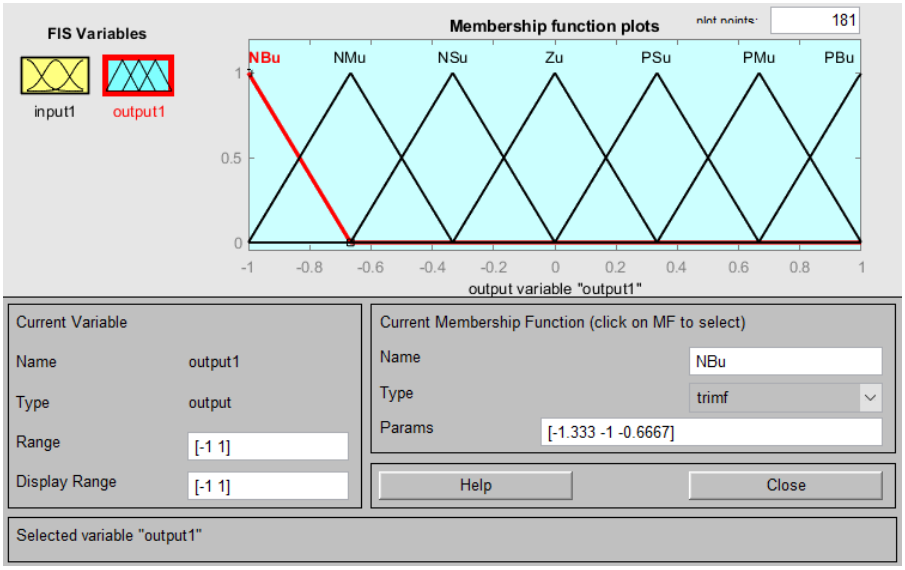


Рисунок 9.20 – Результат налаштування функцій приналежності вихідних змінних

Налаштовування правил для даного випадку наведено на рисунку (див. рис. 9.21).

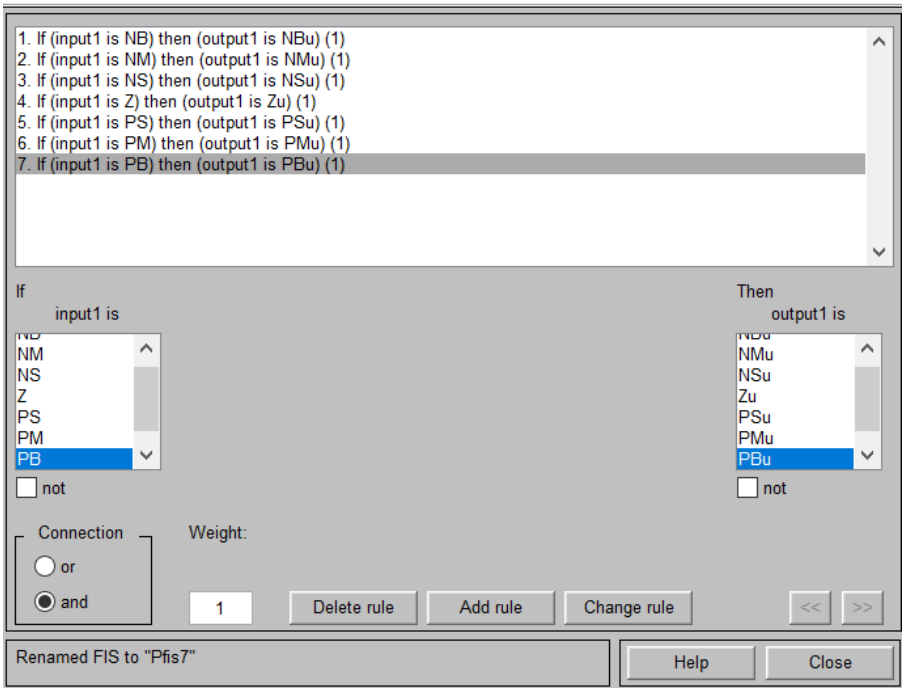


Рисунок 9.21 - Налаштовування опису правил функціонування НЛР_П

Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1). Після опису правил можливо за допомогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого висновку за різних вхідних даних (див. рис. 9.22);

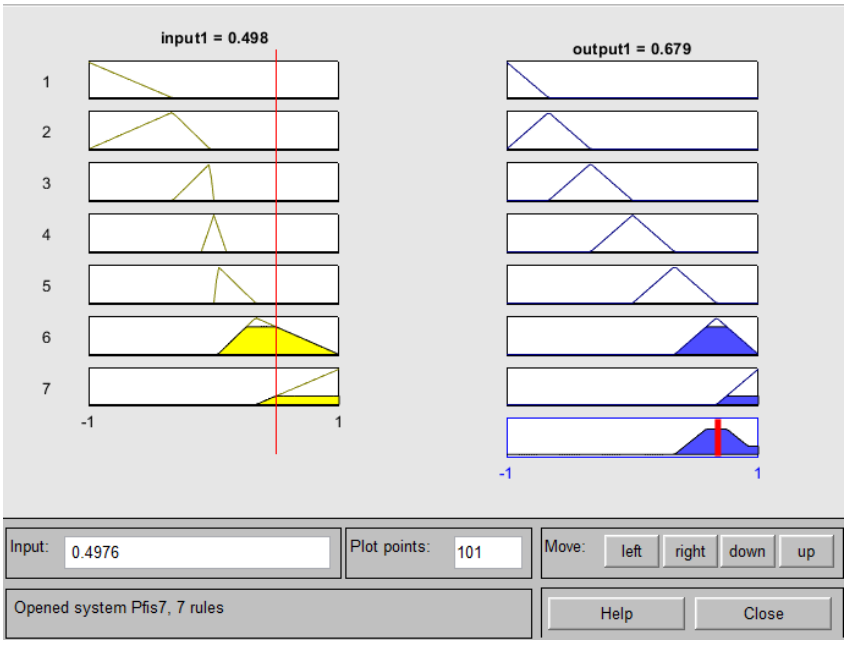


Рисунок 9.22 - Робота системи НЛР_П

– інтерфейсу Surface Viewer можливо переглянути графічне подання закону управління (рис. 9.23).

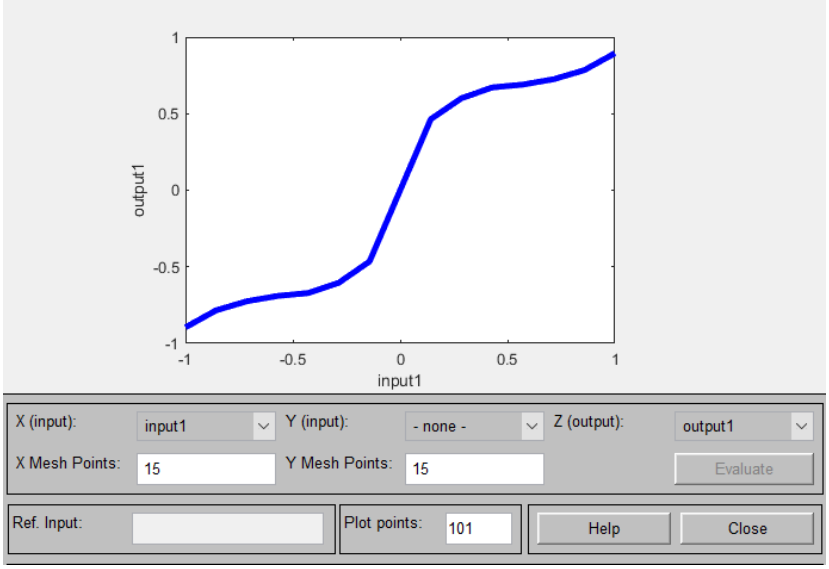


Рисунок 9.23 – Крива управління системою нечіткого висновку

Після процедур налаштування НЛР_П у редакторі системи нечіткого висновку здійснює запис результатів налаштування у Fuzzy Logic Controller. Для цього у вкладці File здійснюємо Export в математичну модуль нечіткого контролера From Workspase вказавши ім’я Fuzzy Logic Controller.

Після експорту закону функціонування НЛР_П на математичної моделі системи управління (див. рис. 9.17) получено перехідний процес для синтезованого НЛР_П, який задовольняє поставленому завданню

проектування

На рис. 9.24 показаний перехідний процес для синтезованого НЛР_П.

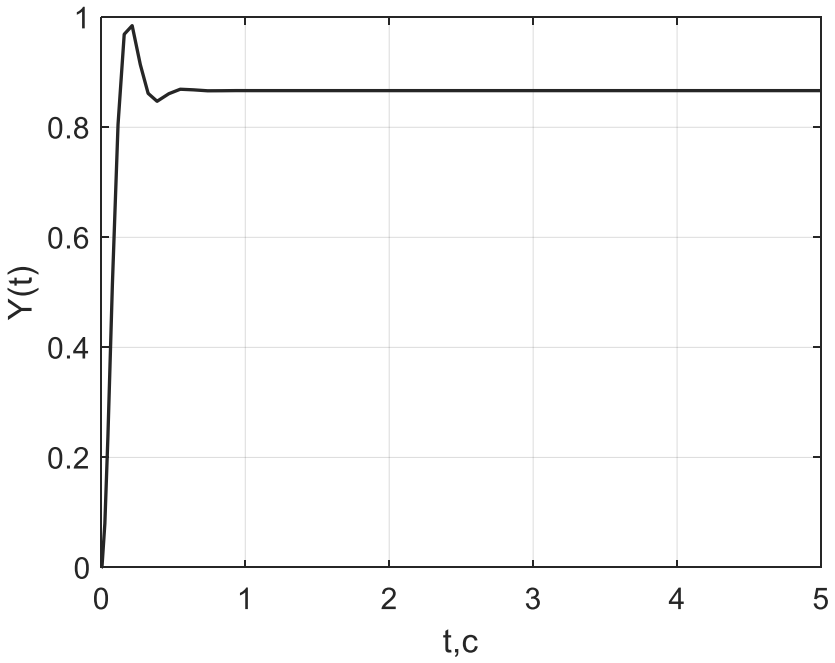


Рисунок 9.24 - Перехідний процес для НЛР_П із сімома правилами

9.3 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 9.6.

За вказаними у табл. 9.6 потрібно синтезувати нелінійний нечіткий регулятор П-типу з використанням системи нечіткого висновку:

Таблиця 9.6 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
1	$W(p) = \frac{2}{2p^2 + p + 1}$
2	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.1p + 1}$
3	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 0.5p + 1}$
4	$W(p) = \frac{1}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
5	$W(p) = \frac{6}{0.8p^2 + 0.4p + 1}$
6	$W(p) = \frac{3}{p^2 + 0.8p + 1}$

Продовження табл. 9.6

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
7	$W(p) = \frac{7}{5p^2 + 2.5p + 1}$
8	$W(p) = \frac{5}{2p^2 + 1.1p + 1}$
9	$W(p) = \frac{2.5}{6.2p^2 + 3p + 1}$
10	$W(p) = \frac{3.6}{2p^2 + p + 1}$
11	$W(p) = \frac{4.5}{3p^2 + 1.5p + 1}$
12	$W(p) = \frac{10}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
13	$W(p) = \frac{8.8}{8p^2 + 4p + 1}$
14	$W(p) = \frac{3}{1.5p^2 + 0.8p + 1}$
15	$W(p) = \frac{4.7}{5.6p^2 + 3p + 1}$
16	$W(p) = \frac{6.3}{5.2p^2 + 2.1p + 1}$
17	$W(p) = \frac{2.4}{2.7p^2 + 1.3p + 1}$
18	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.11p + 1}$
19	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 1.3p + 1}$
20	$W(p) = \frac{6}{7.2p^2 + 3.1p + 1}$

9.4 Контрольні питання

1. Опишіть принципи евристичного синтезу нечіткого регулятора П-типу.
2. За яких умов нечіткий регулятор П-типу виявляється лінійним?
3. Опишіть умови нелінійності закону керування нечіткого регулятора П-типу. У чому переваги нелінійного закону управління?
4. Скільки кроків включає синтез нелінійного НЛР _ П? Які це кроки?

10 СИНТЕЗ НЕЛІНІЙНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПД-ТИПУ

Мета роботи: засвоєння методики синтезу нелінійного нечіткого регулятору ПД-типу з використанням редактора системи нечіткого висновку

10.1 Аналітичний опис нечіткого логічного регулятора ПД-типу

Запишемо закон управління ПД-регулятора у вигляді:

$$u = k_p\left(e(t) + \frac{k_d}{k_p}\frac{de(t)}{dt}\right)$$

Тоді класичний ПД-регулятор можна зобразити у вигляді показаному на рис. 10.1.

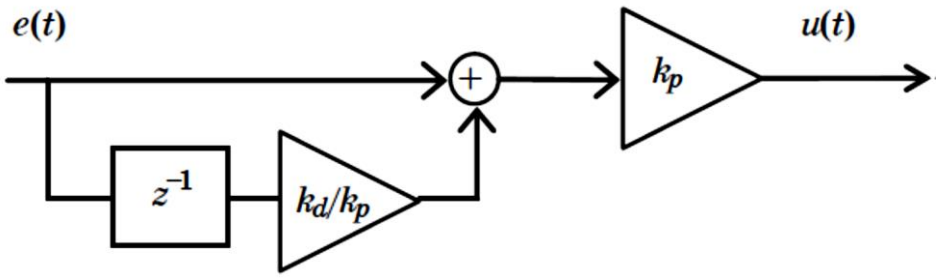


Рисунок 10.1 – Варіант опису ПД-регулятора

Використання похідної дозволяє зменшити перерегулювання, що може виникати при пропорційному управлінні. Однак при цьому можливе небажане збільшення часу перехідного процесу. Методика проектування має узгодити ці два суперечливі ефекти. Тому процес налаштування k_d та k_p передбачає такі кроки:

1) коефіцієнт k_d отримує по можливості невелике значення для досягнення найбільш швидкої реакції системи;

2) пропорційний коефіцієнт k_p повинен бути завжди більшим, ніж k_d.

10.2 Синтез нечіткого регулятора ПД-типу

НЛР_ПД відрізняється від класичного ПД-регулятора тим, що може реалізувати нелінійний закон управління, який описуватиметься деякою поверхнею в тривимірному просторі.

При цифровій реалізації НЛР_ПД замість похідної помилки управління часто розглядається її збільшення $\Delta e(t)$, так що поведінку НЛР_ПД можна описати виразом

$$u(t) = F_{Л}\big(e(t), \Delta e(t)\big),$$

де Fл - лінгвістичний закон управління, заданий набором правил.

За певних умов НЛР_ПД може бути еквівалентний звичайному ПД-регулятору. Для забезпечення вищої якості роботи НЛР_ПД по відношенню до класичного регулятора потрібно правильно описати керуючі правила та правильно вибрати розташування термів лінгвістичних змінних.

Управляючі правила можна вибрати на основі якісного аналізу перехідного процесу.

Помилка управління обчислюється за формулою

$$e(t) = g(t) - y(t).$$

Негативне значення помилки $e(t)$ означає, що вихідний сигнал $y(t)$ більше уставки $g(t)$, і його потрібно зменшувати, позитивне значення $e(t)$) означає, що вихідний сигнал менший за уставку, і його потрібно збільшувати. Нульове значення $e(t)$ відповідає, очевидно, рівності $g(t)$ та $y(t)$.

Розглянемо збільшення помилки управління:

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) = g(t) - y(t) - g(t) + y(t-1) = y(t-1) - y(t) = -\Delta y(t)$$

Позитивний знак $\Delta e(t)$ означає, що вихідний сигнал зменшується. Негативне значення $\Delta e(t)$ означає, що вихідний сигнал збільшується. Нульове значення $\Delta e(t)$ відповідає постійному вихідному сигналу.

На рис. 10.2 показано поведінку помилки та збільшення помилки при нормальному перебігу перехідного процесу. Як показує рисунок, наближення вихідного сигналу системи до заданого значення відбувається тоді, коли $e(t)$ та $\Delta e(t)$ мають різні знаки. У цьому випадку керування на вхід об'єкта можна не подавати. В інших ситуаціях потрібна корекція.

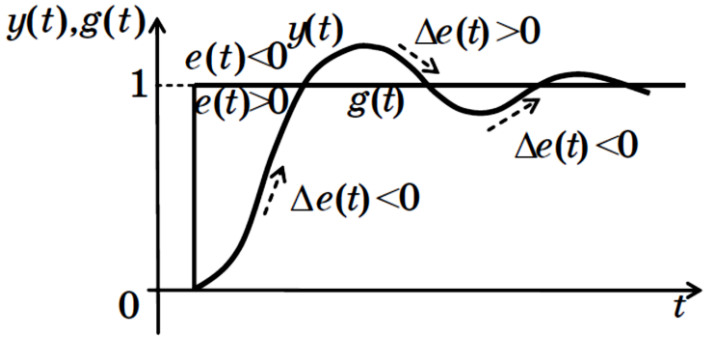


Рисунок 10.2 – Зміна помилки при нормальному перебігу перехідного процесу

Зроблені зауваження дозволяють класифікувати всі, що виникають при управлінні ситуації (див. табл. 10.1).

Таблиця 10.1 – Семантичний опис процесу управління

Ситуація		Опис ситуації	Характеристика ситуації	Управління
Знак $e(t)$	Знак $\Delta e(t)$			
-	+	$y(t) > g(t), \Delta y(t) < 0$	Норма	Нульове (0)
-	-	$y(t) > g(t), \Delta y(t) > 0$	Потрібна корекція	Негативне (-)
-	0	$y(t) > g(t), \Delta y(t) = 0$	Потрібна корекція	Негативне (-)
0	-	$y(t) = g(t), \Delta y(t) > 0$	Потрібна корекція	Негативне (-)
0	+	$y(t) = g(t), \Delta y(t) < 0$	Потрібна корекція	Позитивне (+)
0	0	$y(t) = g(t), \Delta y(t) = 0$	Норма	Нульове (0)
+	+	$y(t) < g(t), \Delta y(t) < 0$	Потрібна корекція	Позитивне (+)
+	-	$y(t) < g(t), \Delta y(t) > 0$	Норма	Нульове (0)
+	0	$y(t) < g(t), \Delta y(t) = 0$	Потрібна корекція	Позитивне (+)

У табл. 10.1 розглядаються лише знаки помилки управління та її збільшення, тому вважатимуться, що кількість термів для лінгвістичних змінних на входах і виході НЛР_ПД дорівнює 3, і закон управління можна сформулювати як таблиці лінгвістичних правил (ТЛП) (див. табл.10.2).

Таблиця 10.2 – Лінгвістичні правила НЛР_ПД

Таблиця правил		e*		
		Н	0	П
Δ e*	Н	Н	Н	0
	0	Н	0	П
	П	0	П	П

u*

Табл. 10.2 містить 9 правил управління (лінгвістичне значення управління знаходиться на перетині рядка та стовпця). Ці правила мають універсальний характер, і можуть бути використані для будь-якого об'єкта управління невисокого порядку.

Відповідно до (9.4), для П-регулятора знак управління збігається зі знаком помилки. Наприклад, при 5 термах справедлива табл. 10.3.

Таблиця. 10.3 – Лінгвістичний закон управління П-регулятора

*e**	НВ	НМ	0	ПМ	ПВ
*u**	НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ

Входи та виходи ПД-регулятора нормалізовані, тому виконується:

$$u^* = e^* + \Delta e^*.$$

Припустимо, що *u**, *e** та Δ*e** мають однакові множини термів, наприклад: НВ, НС, НМ, 0, ПМ, ПС, ПВ. Тоді, враховуючи обмежені розміри базової шкали, можна записати 49 варіантів обмеженої суми:

НВ+НВ=НВ; НВ+НС=НВ; НВ+НМ=НВ; НВ+0=НВ;
НВ+ПМ=НС; НВ+ПС=НМ; НВ+НВ=0;
НС+НВ=НВ; НС+НС=НВ;НС+НМ=НВ;НС+0=НС;
НС+ПМ=НМ;НС+ПС=0;НС+ПВ=ПМ;
…
ПВ+НВ=0; ПВ+НС=ПМ; ПВ+НМ=ПС; ПВ+0=ПВ;
ПВ+ПМ=ПВ; ПВ+ПС=ПВ; ПВ+ПВ=ПВ

Лінгвістичний закон управління набуває вигляду, показано у табл. 10.4. Табл. 10.4 можна модифікувати за допомогою додаткових евристичних міркувань. Наприклад, можна вимагати, щоб при великому значенні помилки сигнал керування також був великим незалежно від значення збільшення помилки (див. табл. 10.5).

Таблиця 10.4 – Табличні лінгвістичні правила

Таблиця правил		e*						
		НВ	НС	НМ	0	ПМ	ПС	ПВ
Δ e*	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НС	НМ	0
	НС	НВ	НВ	НВ	НС	НМ	0	ПМ
	НМ	НВ	НВ	НС	НМ	0	ПМ	ПС
	Н	НВ	НС	НМ	0	ПМ	ПС	ПВ
	ПМ	НС	НМ	0	ПМ	ПС	ПВ	ПВ
	ПС	НМ	0	ПМ	ПС	ПВ	ПВ	ПВ
	ПВ	0	ПМ	ПС	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ

u*

Таблиця 10.5 – Модифіковані табличні лінгвістичні правила

Таблиця правил		e*						
		НВ	НС	НМ	0	ПМ	ПС	ПВ
Δ e*	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НС	НМ	ПВ
	НС	НВ	НВ	НВ	НС	НМ	ПМ	ПВ
	НМ	НВ	НВ	НС	НМ	0	ПС	ПВ
	Н	НВ	НС	НМ	0	ПМ	ПС	ПВ
	ПМ	НВ	НС	0	ПМ	ПС	ПВ	ПВ
	ПС	НВ	НМ	ПМ	ПС	ПВ	ПВ	ПВ
	ПВ	НВ	Н	ПС	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ

u*

Використання модифікованої таблиці лінгвістичних правил має зменшити час перехідного процесу у системі.

Евристичний закон керування, заданий табл. 10.4 та 10.5, є універсальним для об'єктів з одним входом та одним виходом. Налаштування закону управління для конкретного об'єкта передбачає вибір коефіцієнтів нормалізації та денормалізації, а також центрів термів лінгвістичних змінних на відповідних базових шкалах.

10.3 Приклад синтезу нечіткого регулятора ПД-типу

Нехай як базова використовується структура, показана на рис. 9.15. При заміні регулятора на НЛР_ПД, вона набуває вигляду, показаного на рис. 10.3.

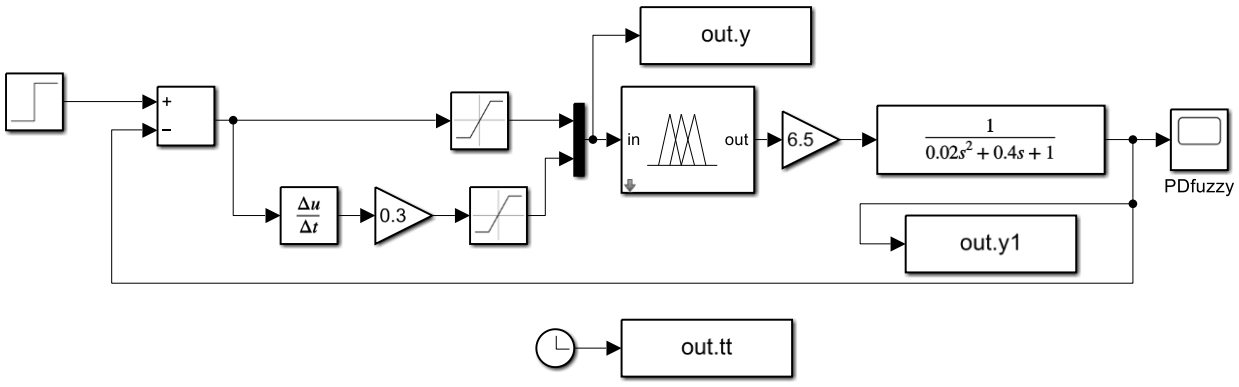


Рисунок 10.3 – Математична модель системи управління з НЛР_ПД

Вирішимо дане завдання згідно описаного алгоритму з використанням редактора системи нечіткого висновку.

Будуємо у MatLab Simulink математичну модель об'єкту керування з послідовним включення Fuzzy Logic Controller до класичного регулятора (див. рис. 11.71). Fuzzy Logic Controller надаємо Fis name: PDfis7 (ім'я може буди будь-яке).

Викликається редактор системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 10.4.).

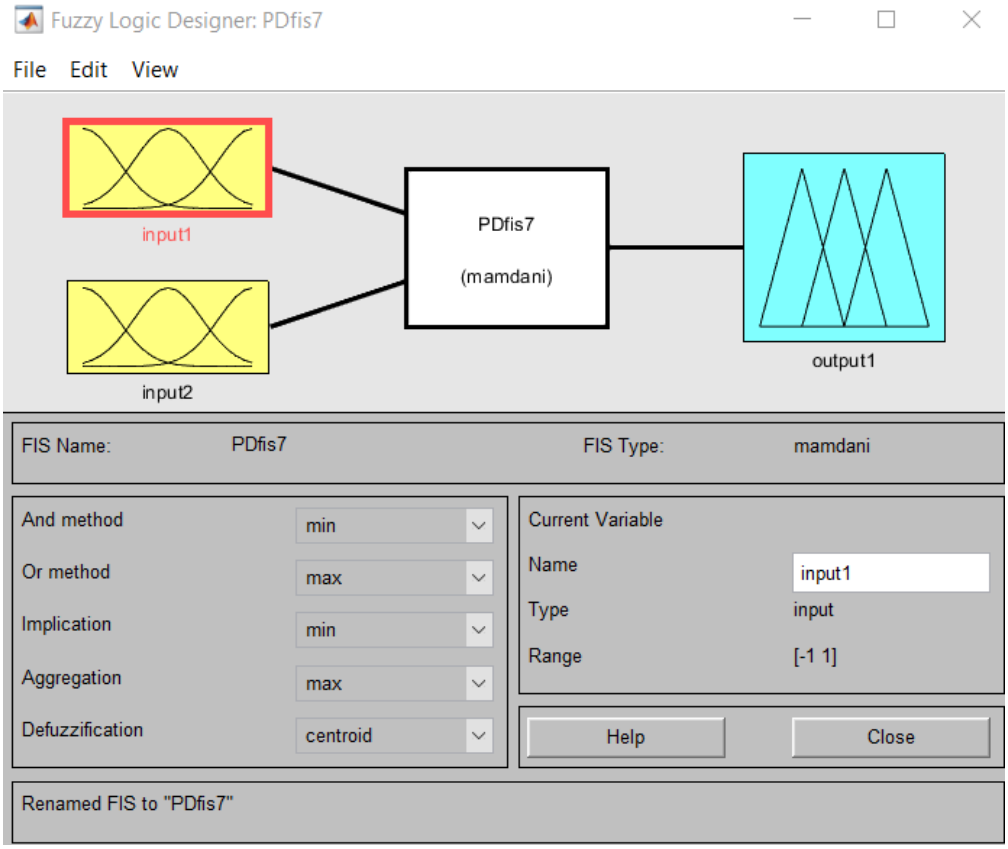


Рисунок 10.4 – Налаштування інтерфейсу FIS editor

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

У меню *Edit* послідовно додаємо дві вхідних змінних з розміром базової шкали (Range= [-1 1]) та вихідну змінну з розміром базової шкали (*Range*= [-1 1]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної

трикутну функцію приналежності.

Нехай терми лінгвістичної змінної «Помилка управління» розміщуються відповідно до рис. 9.19 згідно налаштуванням НЛР_П регулятора з параметрами:

Name = "NB"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.33];
Name = "NM"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.33 -0.03];
Name = "NS"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 -0.033 0];
Name = "Z"; Type = " trimf"; Param = [-0.1 0 0.1];
Name = "PS"; Type = " trimf"; Param = [0 0.033 0.33];
Name = "PM"; Type = " trimf"; Param = [0.033 0.33 1];
Name = "PB"; Type = "trimf"; Param = [0.33 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління» наведено на рис. 10.5.

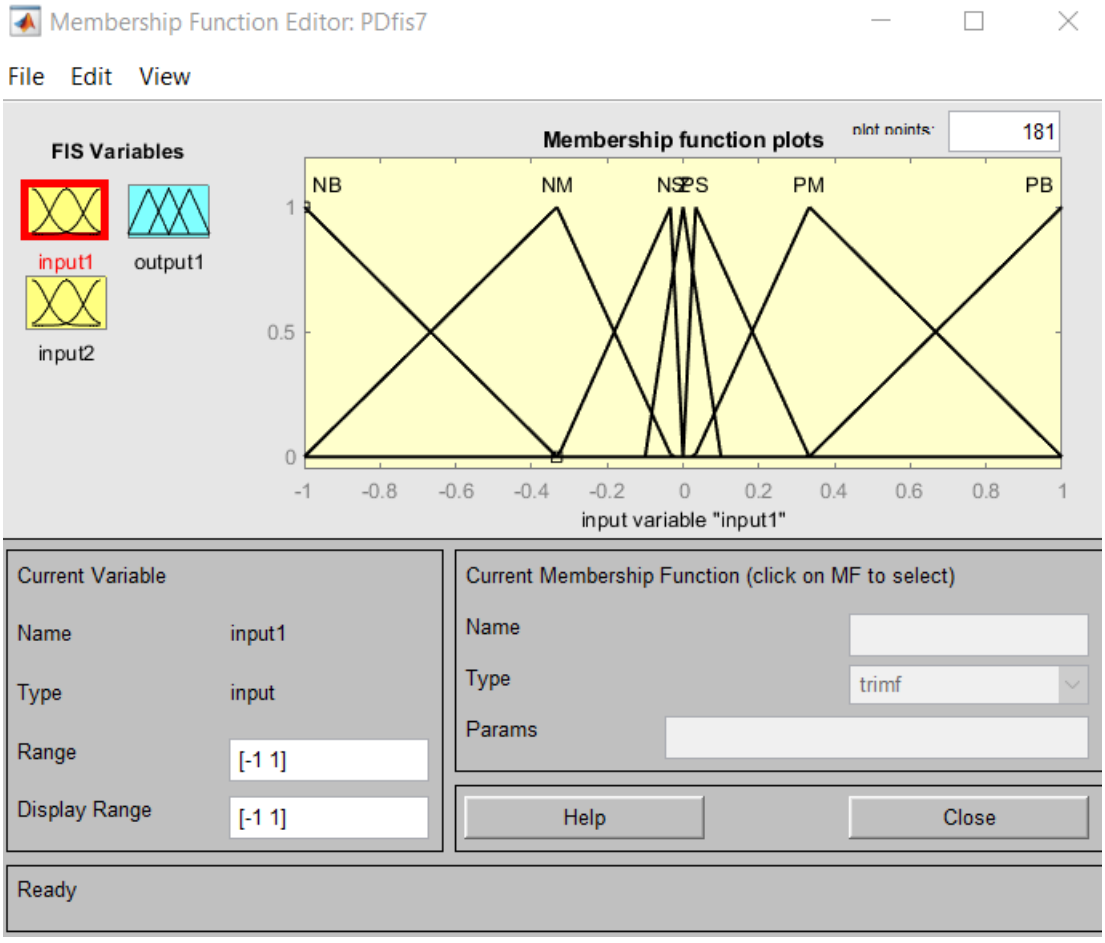


Рисунок 10.5 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління»

Терми вхідної лінгвістичної змінної «Похідна помилки управління» формуємо рівномірно. Для опису вхідних логічних змінних «Похідна помилки управління» у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію

приналежності. З параметрами:

Name = "NBe"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
Name = "NMe"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
Name = "NSe"; Type = " trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
Name = "Ze"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];
Name = "PSe"; Type = " trimf"; Param = [0 0.33 0.66];
Name = "PMe"; Type = " trimf"; Param = [0.33 0.66 1];
Name = "PBe"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління» на рис. 10.6.

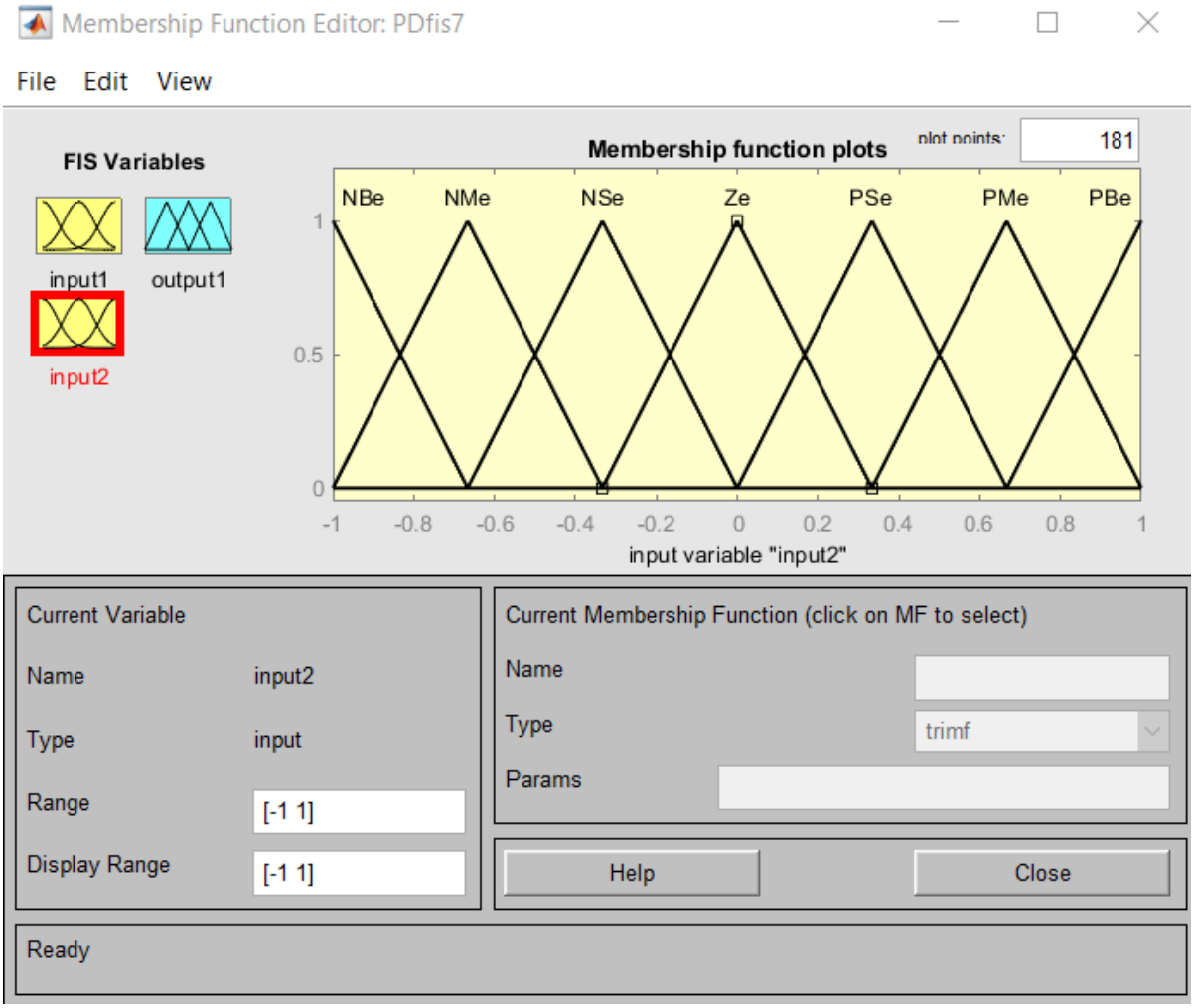


Рисунок 10.6 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління»

Для опису вихідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

Name = "NBu"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
Name = "NMu"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
Name = "NSu"; Type = " trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
Name = "Zu"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];
Name = "PSu"; Type = " trimf"; Param = [0 0.33 0.66];
Name = "PMu"; Type = " trimf"; Param = [0.33 0.66 1];
Name = "PBu"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 10.7.

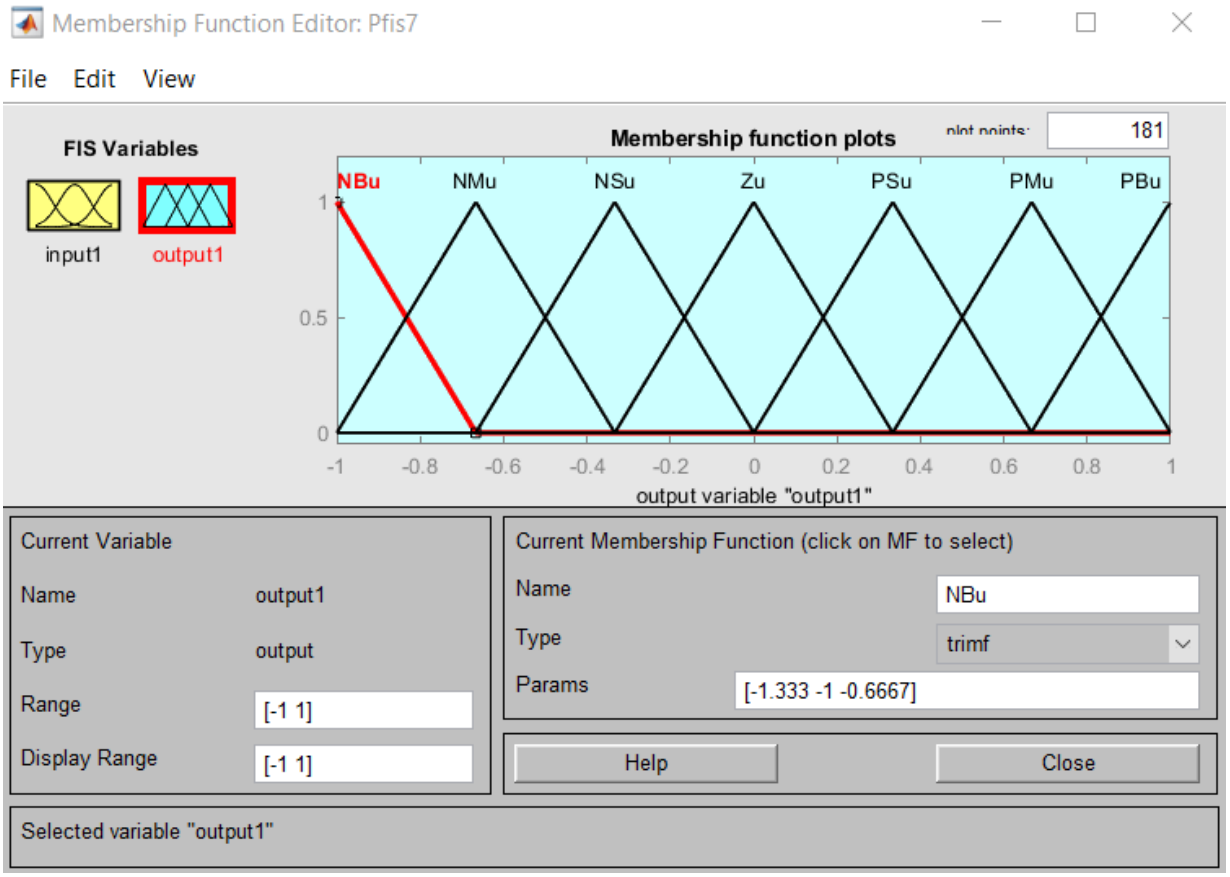


Рисунок 10.7 – Результат налаштування функцій приналежності вихідних змінних

Після опису вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку дорівнює 49. Управляючі правила сформуємо згідно з табл. 9.5:

1. if (input1 is NB) and (input2 is NBe) then (output1 is NBu) (1)
2. if (input1 is NB) and (input2 is NMe) then (output1 is NBu) (1)
3. if (input1 is NB) and (input2 is NSe) then (output1 is NBu) (1)
4. if (input1 is NB) and (input2 is Ze) then (output1 is NBu) (1)
5. if (input1 is NB) and (input2 is PSe) then (output1 is NBu) (1)

6. if (input1 is NB) and (input2 is PMe) then (output1 is NBu) (1)
7. if (input1 is NB) and (input2 is PBe) then (output1 is NBu) (1)
8. if (input1 is NM) and (input2 is NBe) then (output1 is NBu) (1)
9. if (input1 is NM) and (input2 is NMe) then (output1 is NBu) (1)
10. if (input1 is NM) and (input2 is NSe) then (output1 is NBu) (1)
11. if (input1 is NM) and (input2 is Ze) then (output1 is NMu) (1)
12. if (input1 is NM) and (input2 is PSe) then (output1 is NMu) (1)
13. if (input1 is NM) and (input2 is PMe) then (output1 is NSu) (1)
14. if (input1 is NM) and (input2 is PBe) then (output1 is Zu) (1)
15. if (input1 is NS) and (input2 is NBe) then (output1 is NBu) (1)
16. if (input1 is NS) and (input2 is NMe) then (output1 is NBu) (1)
17. if (input1 is NS) and (input2 is NSe) then (output1 is NMu) (1)
18. if (input1 is NS) and (input2 is Ze) then (output1 is NSu) (1)
19. if (input1 is NS) and (input2 is PSe) then (output1 is Zu) (1)
20. if (input1 is NS) and (input2 is PMe) then (output1 is PSu) (1)
21. if (input1 is NS) and (input2 is PBe) then (output1 is PMu) (1)
22. if (input1 is Z) and (input2 is NBe) then (output1 is NBu) (1)
23. if (input1 is Z) and (input2 is NMe) then (output1 is NMu) (1)
24. if (input1 is Z) and (input2 is NSe) then (output1 is NSu) (1)
25. if (input1 is Z) and (input2 is Ze) then (output1 is Zu) (1)
26. if (input1 is Z) and (input2 is PSe) then (output1 is PSu) (1)
27. if (input1 is Z) and (input2 is PMe) then (output1 is PMu) (1)
28. if (input1 is Z) and (input2 is PBe) then (output1 is PBu) (1)
29. if (input1 is PS) and (input2 is NBe) then (output1 is NMu) (1)
30. if (input1 is PS) and (input2 is NMe) then (output1 is NSu) (1)
31. if (input1 is PS) and (input2 is NSe) then (output1 is Zu) (1)
32. if (input1 is PS) and (input2 is Ze) then (output1 is PSu) (1)
33. if (input1 is PS) and (input2 is PSe) then (output1 is PMu) (1)
34. if (input1 is PS) and (input2 is PMe) then (output1 is PBu) (1)
35. if (input1 is PS) and (input2 is PBe) then (output1 is PBu) (1)
36. if (input1 is PM) and (input2 is NBe) then (output1 is NMu) (1)
37. if (input1 is PM) and (input2 is NMe) then (output1 is PSu) (1)
38. if (input1 is PM) and (input2 is NSe) then (output1 is PMu) (1)
39. if (input1 is PM) and (input2 is Ze) then (output1 is PMu) (1)
40. if (input1 is PM) and (input2 is PSe) then (output1 is PBu) (1)
41. if (input1 is PM) and (input2 is PMe) then (output1 is PBu) (1)
42. if (input1 is PM) and (input2 is PBe) then (output1 is PBu) (1)
43. if (input1 is PB) and (input2 is NBe) then (output1 is PBu) (1)
44. if (input1 is PB) and (input2 is NMe) then (output1 is PBu) (1)
45. if (input1 is PB) and (input2 is NSe) then (output1 is PBu) (1)
46. if (input1 is PB) and (input2 is Ze) then (output1 is PBu) (1)
47. if (input1 is PB) and (input2 is PSe) then (output1 is PBu) (1)
48. if (input1 is PB) and (input2 is PMe) then (output1 is PBu) (1)
49. if (input1 is PB) and (input2 is PBe) then (output1 is PBu) (1)

Налаштовування управляючих правил для даного випадку наведено на рисунку (див. рис. 10.8).

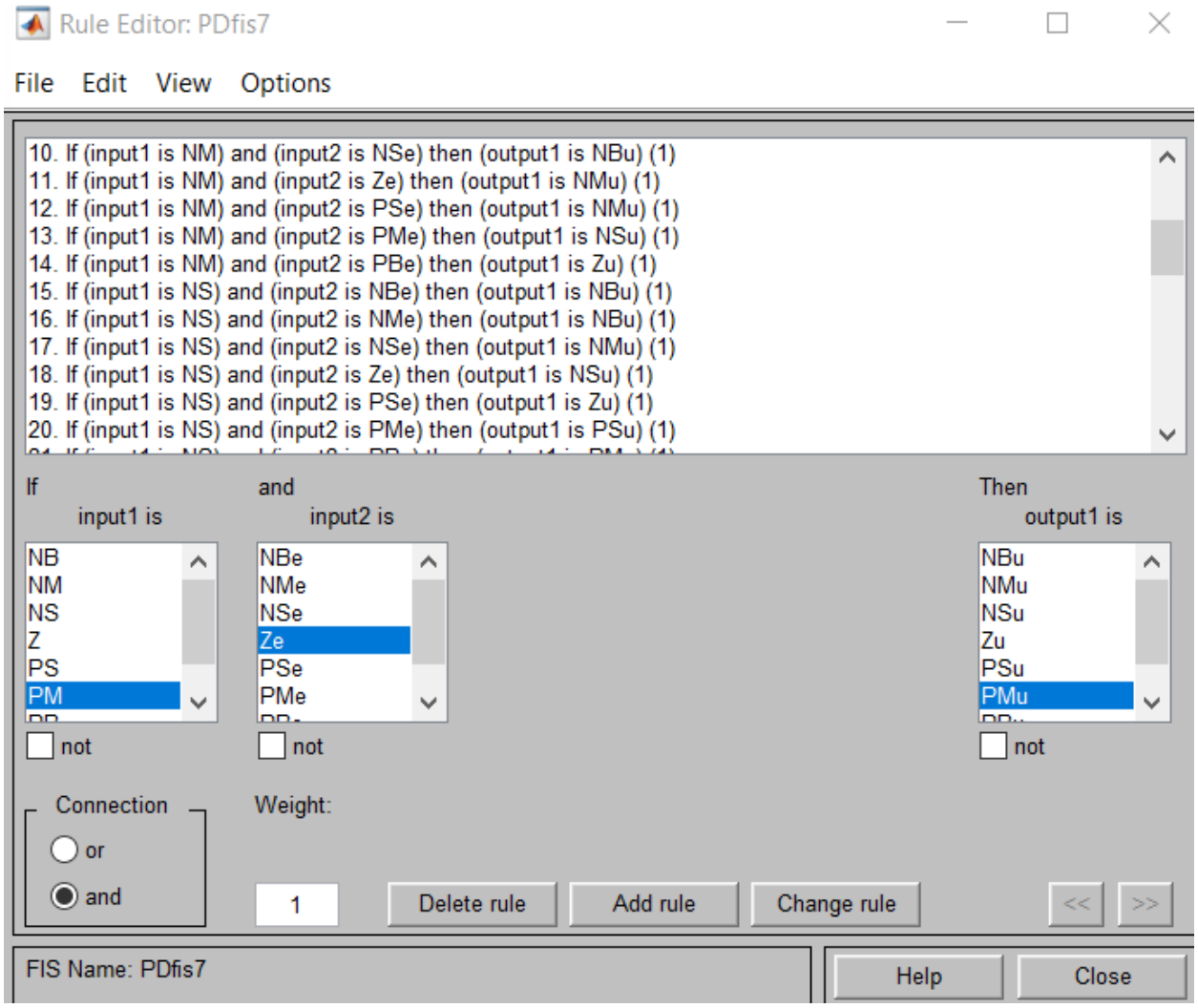


Рисунок 10.8 - Налаштовування опису правил функціонування НЛР_ПД

Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1).

Після опису правил можливо за допомогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого висновку за різних вхідних даних (див. рис. 10.9);

− інтерфейсу Surface Viewer можливо переглянути графічне подання закону управління (рис. 10.10).

Після процедур налаштування НЛР_ПД у редакторі системи нечіткого висновку здійснює запис результатів налаштування у Fuzzy Logic Controller. Для цього у вкладці File здійснюємо Export в математичну модуль нечіткого контролера From Workspase вказавши ім’я Fuzzy Logic Controller.

Після експорту закону функціонування НЛР_ПД на математичної

моделі системи управління (див. рис. 10.3) получено перехідний процес для синтезованого НЛР_ПД, який задовольняє поставленому завданню проектування

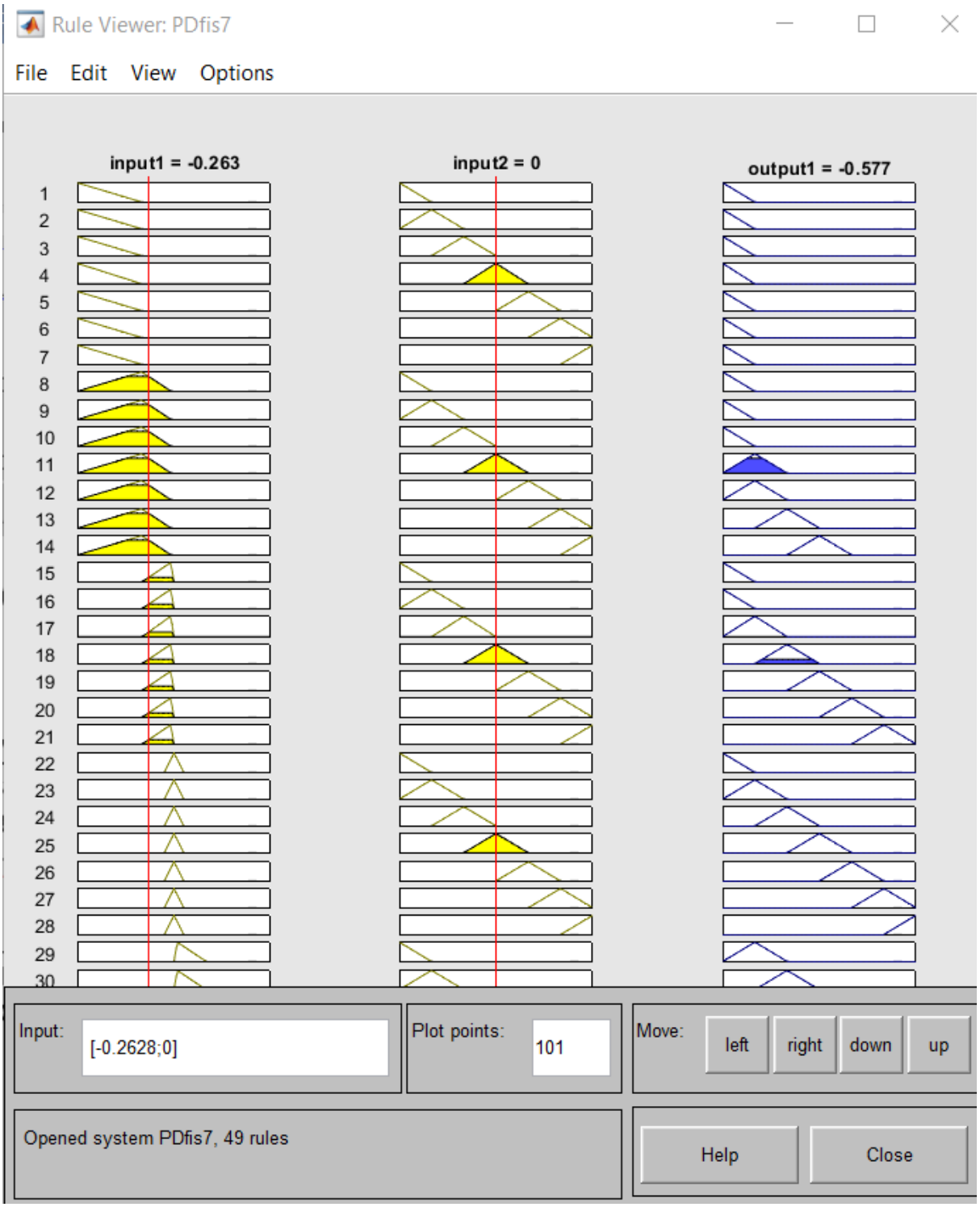


Рисунок 10.9 - Робота системи НЛР_ПД

На рис. 10.11 показаний перехідний процес для синтезованого НЛР_ПД. Як свідчить рис. 10.11, перерегулювання зведено до мінімуму.

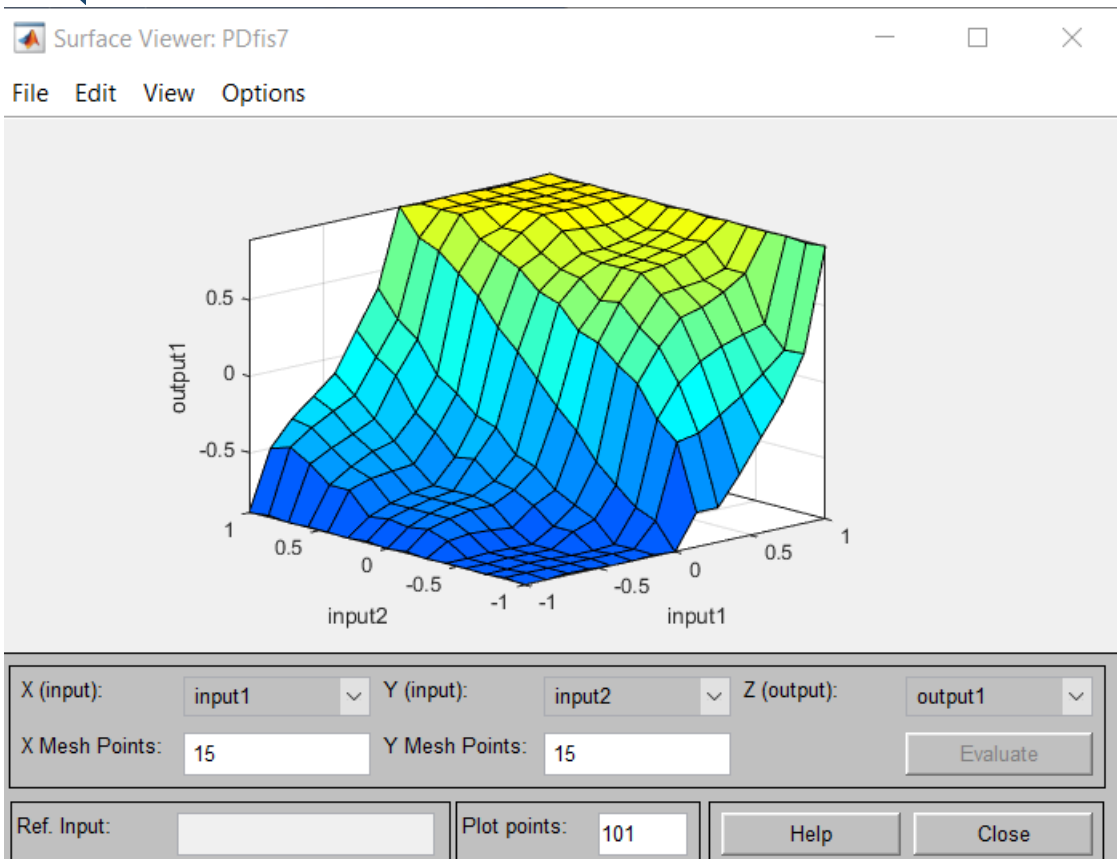


Рисунок 10.10 – Поверхня управління системою нечіткого висновку

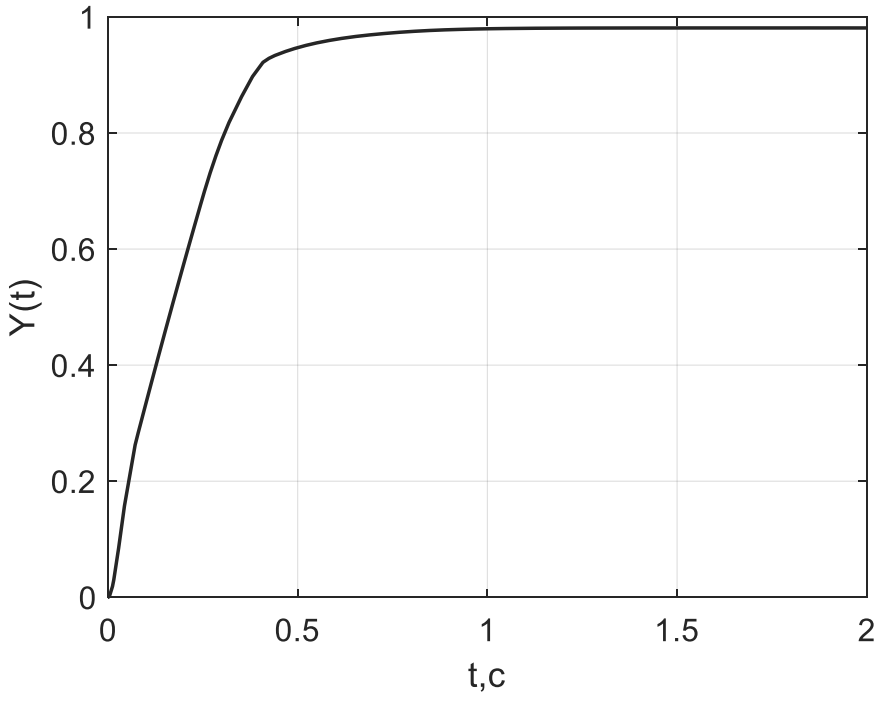


Рисунок 10.11 - Перехідний процес для НЛР_ПД із сімома правилами

Таким чином, вихідними даними для синтезу НЛР_ПД є опис об'єкта управління та вимоги до перехідного процесу: час наростання, перерегулювання, помилка, що встановилася.

10.4 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 10.6.

За вказаними у табл. 10.5 потрібно синтезувати нелінійний нечіткий регулятор ПД-типу з використанням системи нечіткого висновку:

Таблиця 10.6 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
1	$W(p) = \frac{2}{2p^2 + p + 1}$
2	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.1p + 1}$
3	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 0.5p + 1}$
4	$W(p) = \frac{1}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
5	$W(p) = \frac{6}{0.8p^2 + 0.4p + 1}$
6	$W(p) = \frac{3}{p^2 + 0.8p + 1}$
7	$W(p) = \frac{7}{5p^2 + 2.5p + 1}$
8	$W(p) = \frac{5}{2p^2 + 1.1p + 1}$
9	$W(p) = \frac{2.5}{6.2p^2 + 3p + 1}$
10	$W(p) = \frac{3.6}{2p^2 + p + 1}$
11	$W(p) = \frac{4.5}{3p^2 + 1.5p + 1}$
12	$W(p) = \frac{10}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
13	$W(p) = \frac{8.8}{8p^2 + 4p + 1}$
14	$W(p) = \frac{3}{1.5p^2 + 0.8p + 1}$
15	$W(p) = \frac{4.7}{5.6p^2 + 3p + 1}$
16	$W(p) = \frac{6.3}{5.2p^2 + 2.1p + 1}$

Продовження табл. 10.6

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
17	$W(p) = \frac{2.4}{2.7p^2 + 1.3p + 1}$
18	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.11p + 1}$
19	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 1.3p + 1}$
20	$W(p) = \frac{6}{7.2p^2 + 3.1p + 1}$

10.5 Контрольні питання

1. Як виходить аналітичний опис НЛР_ПД?
2. Викладіть евристичні міркування, що використовуються при синтезі НЛР ПД-типу.
3. Який вид має таблиця лінгвістичних правил НЛР_ПД?
4. Скільки кроків включає синтез нелінійного НЛР_ПД? Які це кроки?

11 СИНТЕЗ НЕЛІНІЙНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПІ-ТИПУ

Мета роботи: засвоєння методики синтезу нелінійного нечіткого регулятору ПІ-типу з використанням редактора системи нечіткого висновку

11.1 Особливості синтезу нечіткого регулятору ПІ-типу

Можна вважати, що нечіткий регулятор ПІ-типу має такі самі входи, як і НЛР_ПД. Тому йому справедливі закони управління, показані в табл. 10.1–10.5. Основна відмінність полягає в способі формування сигналу, що управляє, використання якого дозволяє звести до мінімуму статичну помилку в системі.

Найпростіший алгоритм нечіткого ПІ управління можна сформулювати, розглядаючи рис. 10.2. Управління потрібно змінювати лише тоді, коли помилка управління та її збільшення мають однаковий знак. Таким чином, потрібні лише два правила:

− якщо $e(k)$ позитивна та $\Delta e(k)$ позитивна, то $\Delta u(k)$ позитивна;

− якщо $e(k)$ негативне та $\Delta e(k)$ негативне, то $\Delta u(k)$ негативне.

Терми лінгвістичних змінних можуть бути описані способом, показаним на рис. 11.1.

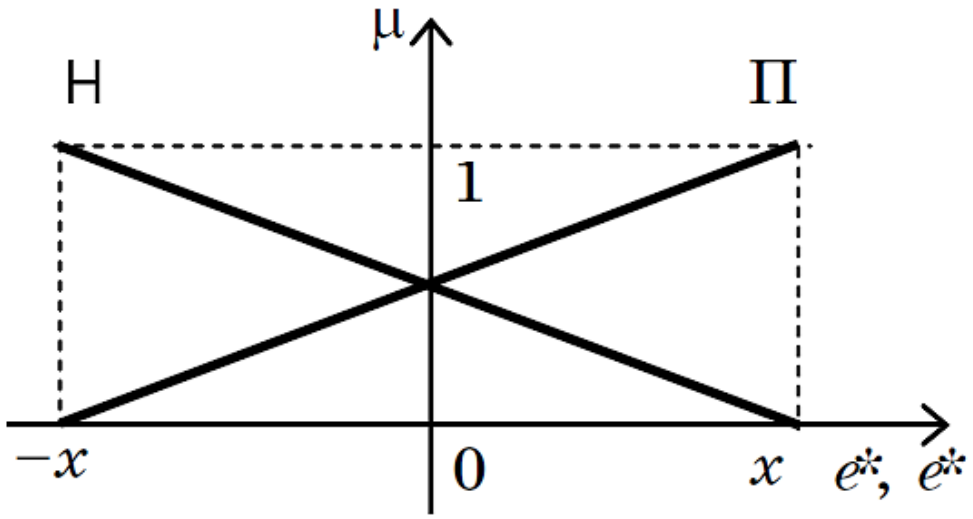


Рисунок 11.1 – Лінгвістичний опис входів та виходів НЛР_ПІ

Таблиця лінгвістичних правил НЛР_ПІ при двох термах для опису $e(k)$ та $\Delta e(k)$ і трьох термах для $u(k)$ (див. рис. 11.56) набуває наступного вигляду (табл. 11.1).

Отже, універсальний закон управління, заданий табл. 11.15 вимагає для конкретного об'єкта налаштування лише одного параметра x (див. рис. 11.89).

Таблиця 11.1 – Лінгвістичні правила НЛР_ПІ

Таблиця правил		e*(k)	
		Н	П
Δe*(k)	Н	Н	0
	П	П	П

Δu*(t)

10.3 Приклад синтезу нечіткого регулятора ПІ-типу

Будуємо в Simulink MatLab модель системи управління з НЛР ПІ при x = 6.5 (див. рис. 11.2).

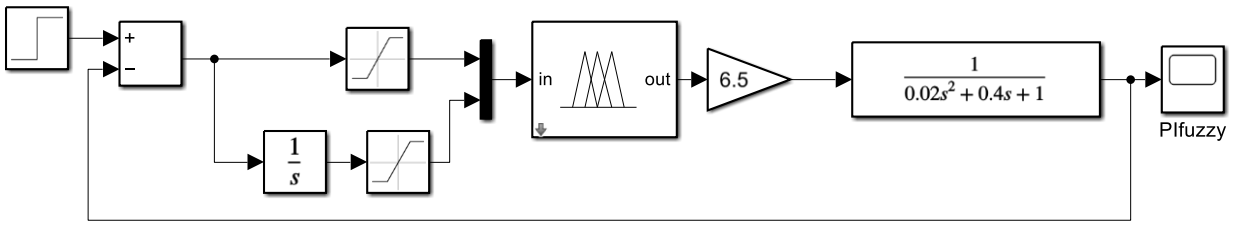


Рисунок 11.2 – Математична модель системи управління з НЛР_ПІ у в Simulink MatLab

Fuzzy Logic Controller надаємо Fis name: PIfis7 (ім'я може буди будь-яке).

Налаштування Fuzzy Logic Controller для НЛР_ПІ аналогічно налаштуванню НЛР_ПД.

Викликається редактор системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 11.3).

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

У меню *Edit* послідовно додаємо 2 вхідні змінні з розміром базової шкали (Range= [-1 1]) та вихідну змінну з розміром базової шкали (*Range*= [-1 1]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної трикутну функцію приналежності.

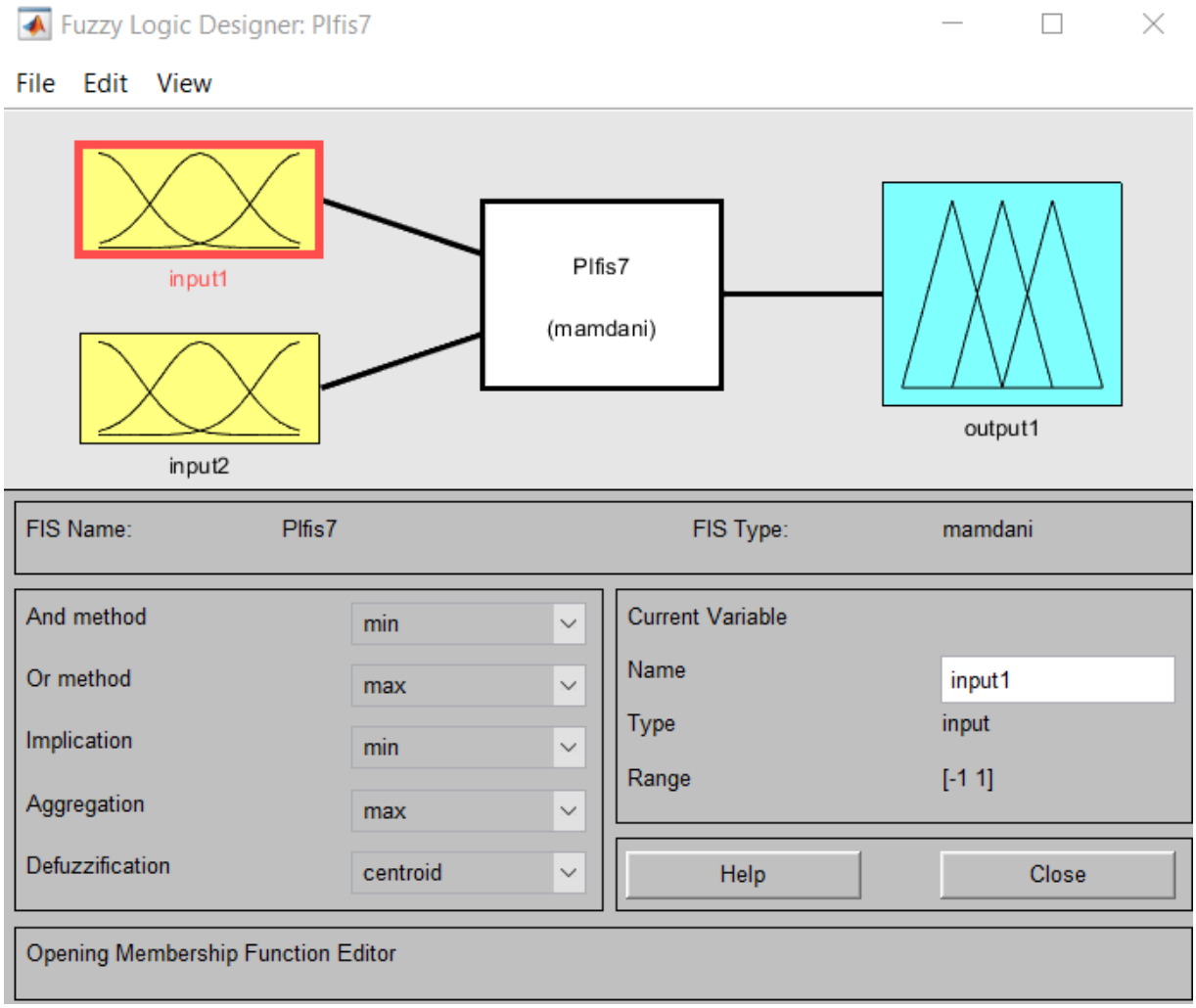


Рисунок 11.3 – Налаштування інтерфейсу FIS editor

Нехай терми лінгвістичної змінної «Помилка управління» розміщуються відповідно до рис. 9.19 згідно налаштуванням НЛР_П регулятора з параметрами:
Name = "NB"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.33];
Name = "NM"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.33 -0.03];
Name = "NS"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 -0.033 0];
Name = "Z"; Type = " trimf"; Param = [-0.1 0 0.1];
Name = "PS"; Type = " trimf"; Param = [0 0.033 0.33];
Name = "PM"; Type = " trimf"; Param = [0.033 0.33 1];
Name = "PB"; Type = "trimf"; Param = [0.33 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління» наведено на рис. 11.4.

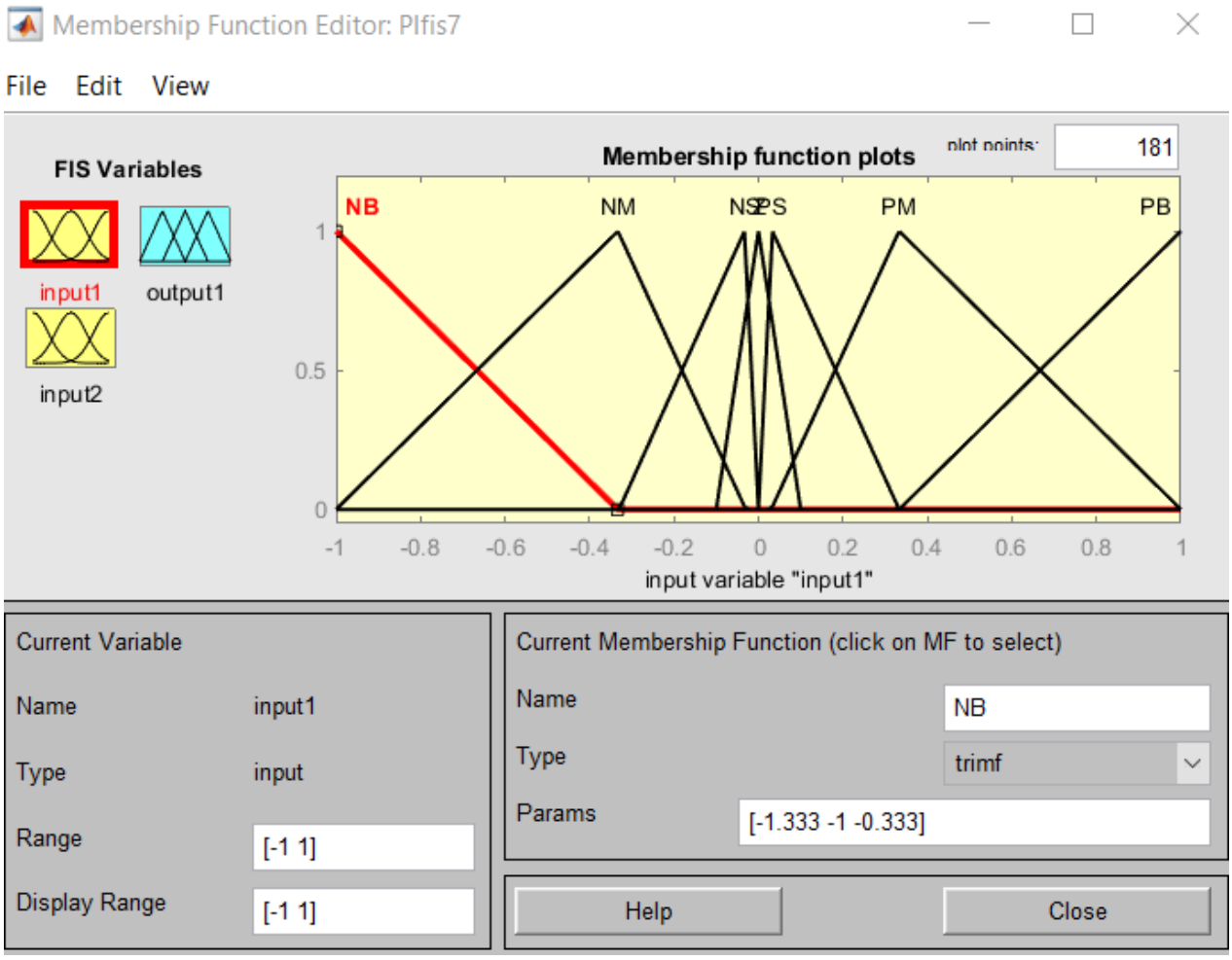


Рисунок 11.4 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління»

Терми вхідної лінгвістичної змінної «Інтеграл помилки управління» формуємо рівномірно. Для опису вхідних логічних змінних «Інтеграл помилки управління» у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

Name = "NBe"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
Name = "NMe"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
Name = "NSe"; Type = " trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
Name = "Ze"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];
Name = "PSe"; Type = " trimf"; Param = [0 0.33 0.66];
Name = "PMe"; Type = " trimf"; Param = [0.33 0.66 1];
Name = "PBe"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Інтеграл помилки управління» на рис. 11.5.

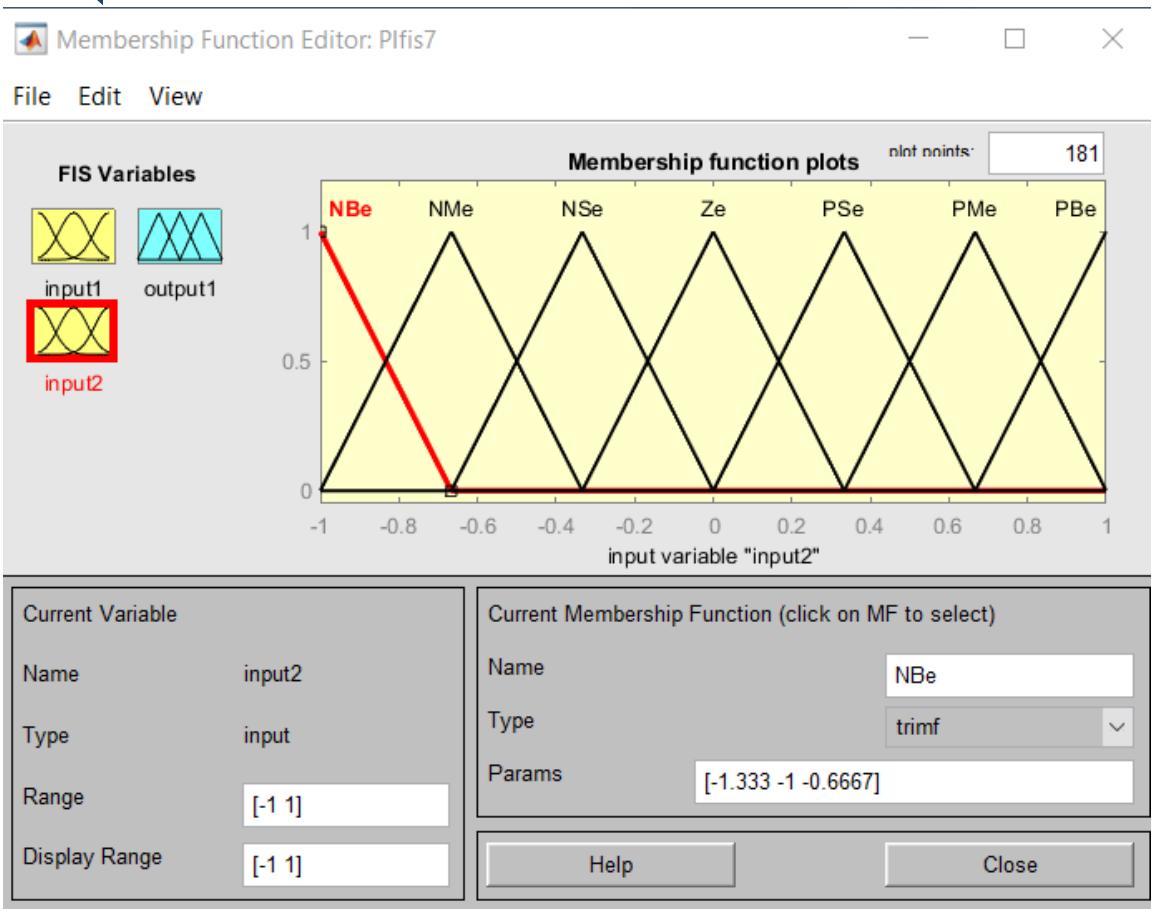


*Рисунок 11.5 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Інтеграл п*омилки управління»

Для опису вихідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

Name = "NBu"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
Name = "NMu"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
Name = "NSu"; Type = " trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
Name = "Zu"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];
Name = "PSu"; Type = " trimf"; Param = [0 0.33 0.66];
Name = "PMu"; Type = " trimf"; Param = [0.33 0.66 1];
Name = "PBu"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 11.6.

Примітка. У якості центрів термів, що описуються функціями приналежності, обрані значення відповідно до табл. 9.4.

Після опису вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку дорівнює 49. Управляючі правила сформуємо згідно з табл. 10.5:

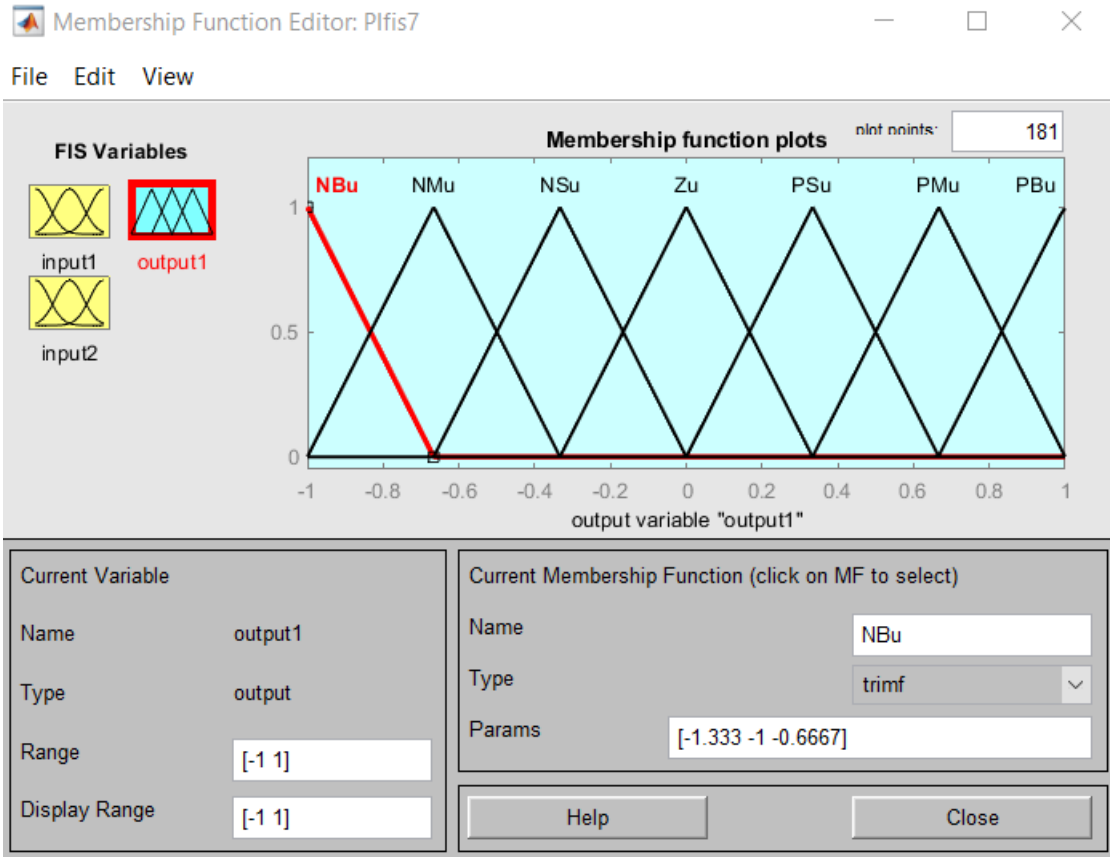


Рисунок 11.6 – Результат налаштування функцій приналежності вихідних змінних

1. if (input1 is NB) and (input2 is NBe) then (output1 is NBu) (1)
2. if (input1 is NB) and (input2 is NMe) then (output1 is NBu) (1)
3. if (input1 is NB) and (input2 is NSe) then (output1 is NBu) (1)
4. if (input1 is NB) and (input2 is Ze) then (output1 is NBu) (1)
5. if (input1 is NB) and (input2 is PSe) then (output1 is NBu) (1)
6. if (input1 is NB) and (input2 is PMe) then (output1 is NBu) (1)
7. if (input1 is NB) and (input2 is PBe) then (output1 is NBu) (1)
8. if (input1 is NM) and (input2 is NBe) then (output1 is NBu) (1)
9. if (input1 is NM) and (input2 is NMe) then (output1 is NBu) (1)
10. if (input1 is NM) and (input2 is NSe) then (output1 is NBu) (1)
11. if (input1 is NM) and (input2 is Ze) then (output1 is NMu) (1)
12. if (input1 is NM) and (input2 is PSe) then (output1 is NMu) (1)
13. if (input1 is NM) and (input2 is PMe) then (output1 is NSu) (1)
14. if (input1 is NM) and (input2 is PBe) then (output1 is Zu) (1)
15. if (input1 is NS) and (input2 is NBe) then (output1 is NBu) (1)
16. if (input1 is NS) and (input2 is NMe) then (output1 is NBu) (1)
17. if (input1 is NS) and (input2 is NSe) then (output1 is NMu) (1)
18. if (input1 is NS) and (input2 is Ze) then (output1 is NSu) (1)
19. if (input1 is NS) and (input2 is PSe) then (output1 is Zu) (1)
20. if (input1 is NS) and (input2 is PMe) then (output1 is PSu) (1)
21. if (input1 is NS) and (input2 is PBe) then (output1 is PMu) (1)

22. if (input1 is Z) and (input2 is NBe) then (output1 is NBu) (1)
23. if (input1 is Z) and (input2 is NMe) then (output1 is NMu) (1)
24. if (input1 is Z) and (input2 is NSe) then (output1 is NSu) (1)
25. if (input1 is Z) and (input2 is Ze) then (output1 is Zu) (1)
26. if (input1 is Z) and (input2 is PSe) then (output1 is PSu) (1)
27. if (input1 is Z) and (input2 is PMe) then (output1 is PMu) (1)
28. if (input1 is Z) and (input2 is PBe) then (output1 is PBu) (1)
29. if (input1 is PS) and (input2 is NBe) then (output1 is NMu) (1)
30. if (input1 is PS) and (input2 is NMe) then (output1 is NSu) (1)
31. if (input1 is PS) and (input2 is NSe) then (output1 is Zu) (1)
32. if (input1 is PS) and (input2 is Ze) then (output1 is PSu) (1)
33. if (input1 is PS) and (input2 is PSe) then (output1 is PMu) (1)
34. if (input1 is PS) and (input2 is PMe) then (output1 is PBu) (1)
35. if (input1 is PS) and (input2 is PBe) then (output1 is PBu) (1)
36. if (input1 is PM) and (input2 is NBe) then (output1 is NMu) (1)
37. if (input1 is PM) and (input2 is NMe) then (output1 is PSu) (1)
38. if (input1 is PM) and (input2 is NSe) then (output1 is PMu) (1)
39. if (input1 is PM) and (input2 is Ze) then (output1 is PMu) (1)
40. if (input1 is PM) and (input2 is PSe) then (output1 is PBu) (1)
41. if (input1 is PM) and (input2 is PMe) then (output1 is PBu) (1)
42. if (input1 is PM) and (input2 is PBe) then (output1 is PBu) (1)
43. if (input1 is PB) and (input2 is NBe) then (output1 is PBu) (1)
44. if (input1 is PB) and (input2 is NMe) then (output1 is PBu) (1)
45. if (input1 is PB) and (input2 is NSe) then (output1 is PBu) (1)
46. if (input1 is PB) and (input2 is Ze) then (output1 is PBu) (1)
47. if (input1 is PB) and (input2 is PSe) then (output1 is PBu) (1)
48. if (input1 is PB) and (input2 is PMe) then (output1 is PBu) (1)
49. if (input1 is PB) and (input2 is PBe) then (output1 is PBu) (1)

Налаштовування управляючих правил для даного випадку наведено на рисунку (див. рис. 11.7).

Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1).

Після опису правил можливо за допомогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого висновку за різних вхідних даних (див. рис. 11.8);

− інтерфейсу Surface Viewer можливо переглянути графічне подання закону управління (рис. 11.9).

Після процедур налаштування НЛР_ПІ у редакторі системи нечіткого висновку здійснює запис результатів налаштування у Fuzzy Logic Controller. Для цього у вкладці File здійснюємо Export в математичну модуль нечіткого контролера From Workspase вказавши ім’я Fuzzy Logic Controller.

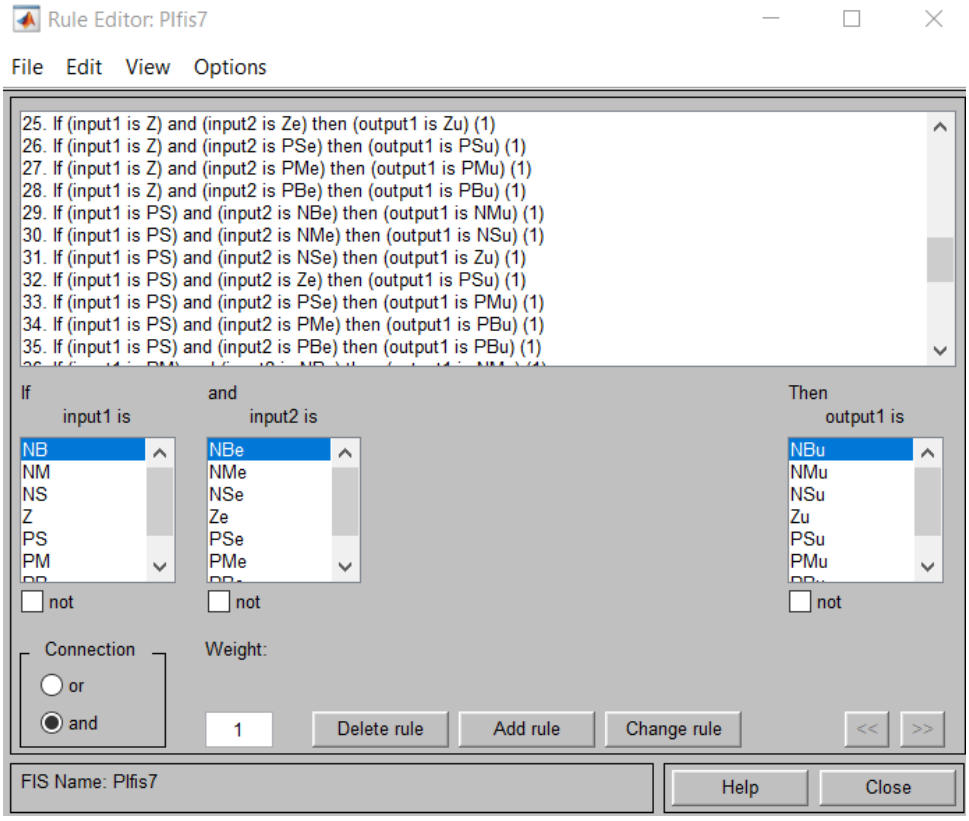


Рисунок 11.7 - Налаштовування опису правил функціонування НЛР_ПІ

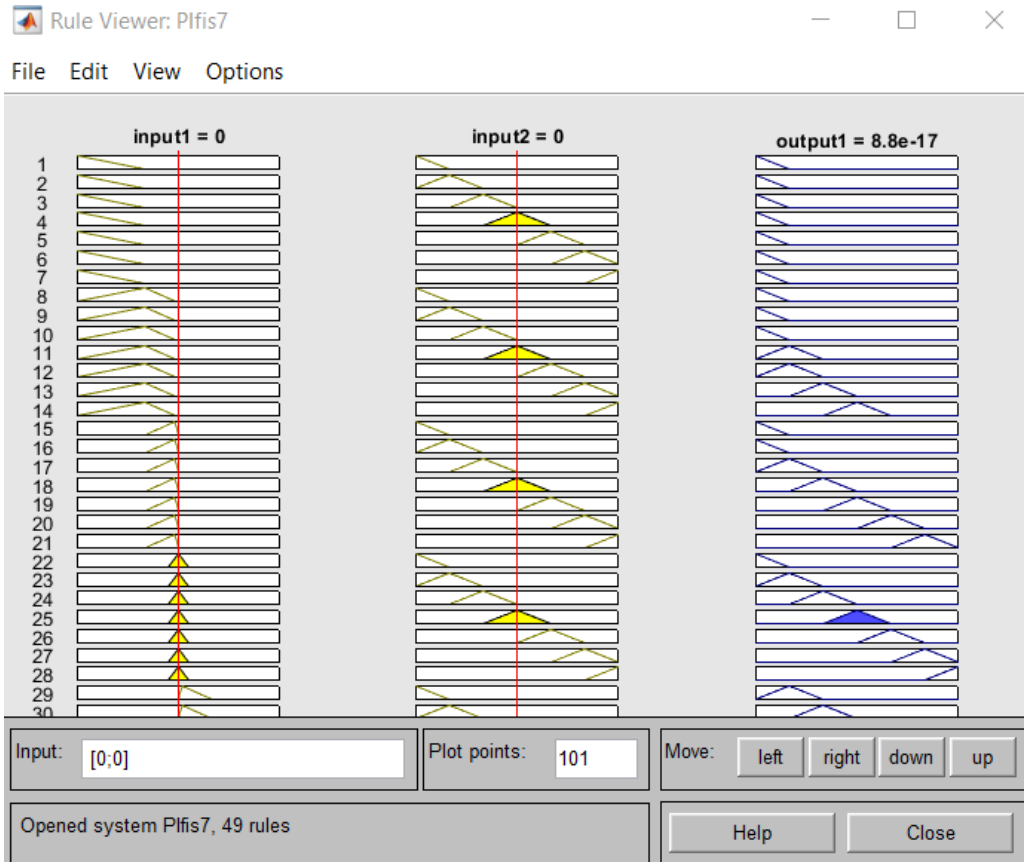


Рисунок 11.8 - Робота системи НЛР_ПІ

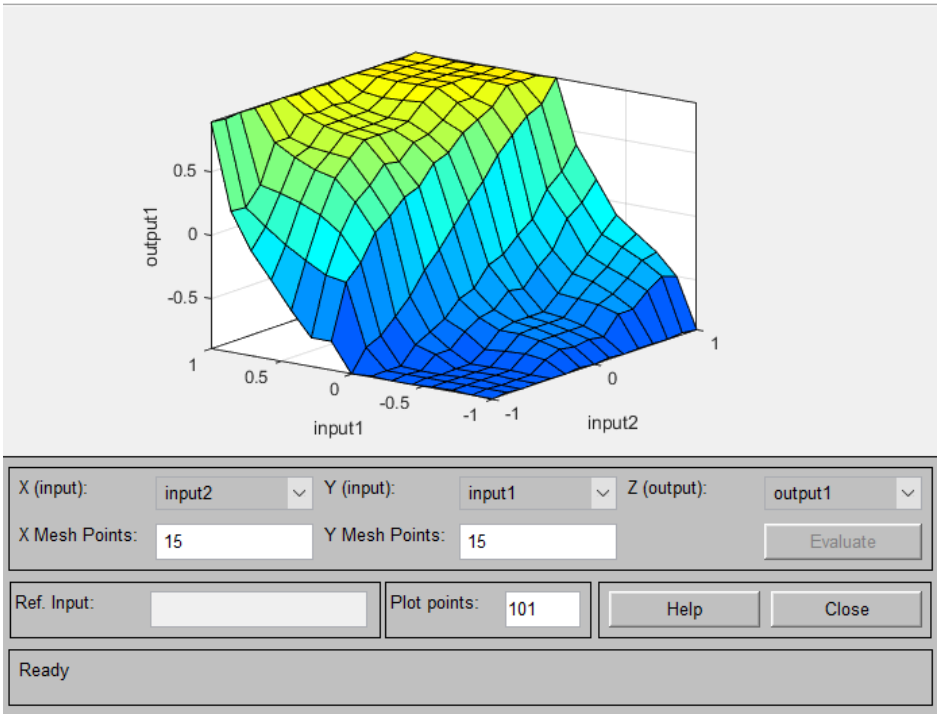


Рисунок 11.9 – Поверхня управління системою нечіткого висновку

Після експорту закону функціонування НЛР_ПІ на математичної моделі системи управління (див. рис. 11.2) получено перехідний процес для синтезованого НЛР_ПІ, який задовольняє поставленому завданню проектування

На рис. 11.10 показаний перехідний процес для синтезованого НЛР_ПІ.

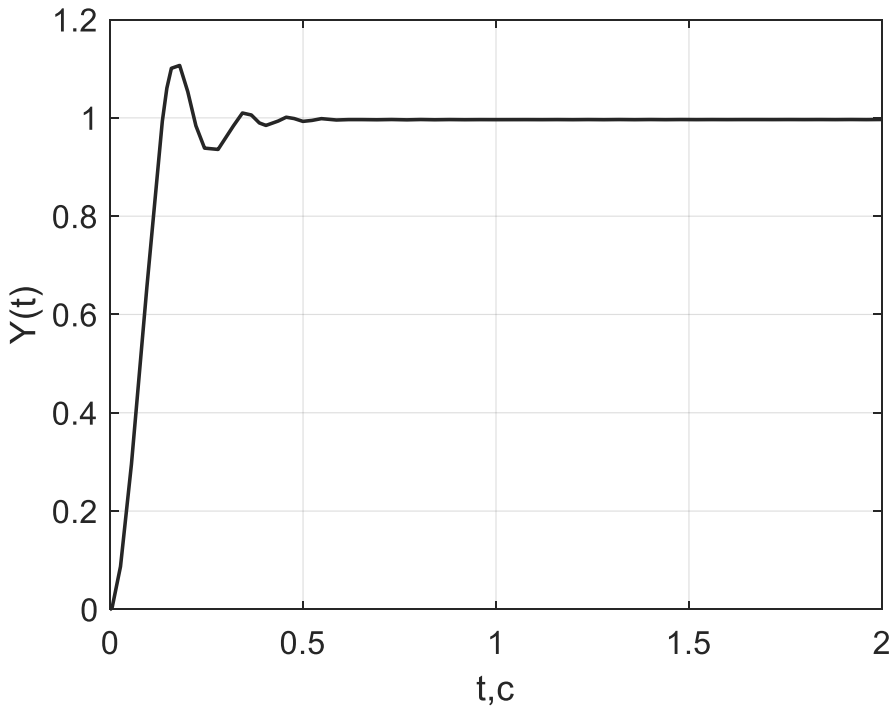


Рисунок 11.10 - Перехідний процес для НЛР_ПІ із сімома правилами

11.3 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 11.2.

За вказаними у табл. 11.2 потрібно синтезувати нелінійний нечіткий регулятор ПІ-типу з використанням системи нечіткого висновку:

Таблиця 11.2 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
1	$W(p) = \frac{2}{2p^2 + p + 1}$
2	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.1p + 1}$
3	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 0.5p + 1}$
4	$W(p) = \frac{1}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
5	$W(p) = \frac{6}{0.8p^2 + 0.4p + 1}$
6	$W(p) = \frac{3}{p^2 + 0.8p + 1}$
7	$W(p) = \frac{7}{5p^2 + 2.5p + 1}$
8	$W(p) = \frac{5}{2p^2 + 1.1p + 1}$
9	$W(p) = \frac{2.5}{6.2p^2 + 3p + 1}$
10	$W(p) = \frac{3.6}{2p^2 + p + 1}$
11	$W(p) = \frac{4.5}{3p^2 + 1.5p + 1}$
12	$W(p) = \frac{10}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
13	$W(p) = \frac{8.8}{8p^2 + 4p + 1}$
14	$W(p) = \frac{3}{1.5p^2 + 0.8p + 1}$
15	$W(p) = \frac{4.7}{5.6p^2 + 3p + 1}$
16	$W(p) = \frac{6.3}{5.2p^2 + 2.1p + 1}$

Продовження табл. 11.2

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
17	$W(p) = \frac{2.4}{2.7p^2 + 1.3p + 1}$
18	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.11p + 1}$
19	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 1.3p + 1}$
20	$W(p) = \frac{6}{7.2p^2 + 3.1p + 1}$

11.4 Контрольні питання

1. Викладіть евристичні міркування, що використовуються при синтезі НЛР_ПІ.
2. Який вид має таблиця лінгвістичних правил НЛР_ПІ?
3. Скільки кроків включає синтез нелінійного НЛР_ПІ-типа? Які це кроки?

12 СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПІ-ТИПУ У КОВЗАЮЧОМУ РЕЖИМІ

Мета роботи: засвоєння методики синтезу нелінійного нечіткого регулятору ПІ-типу у ковзаючому режимі роботи з використанням редактора системи нечіткого висновку

12.1. Ковзаючий режим нечіткого регулятора

Розглянемо відображення таблиці лінгвістичних змінних на фазову площину при 5 термах, що описують кожну змінну (рис. 12.1).

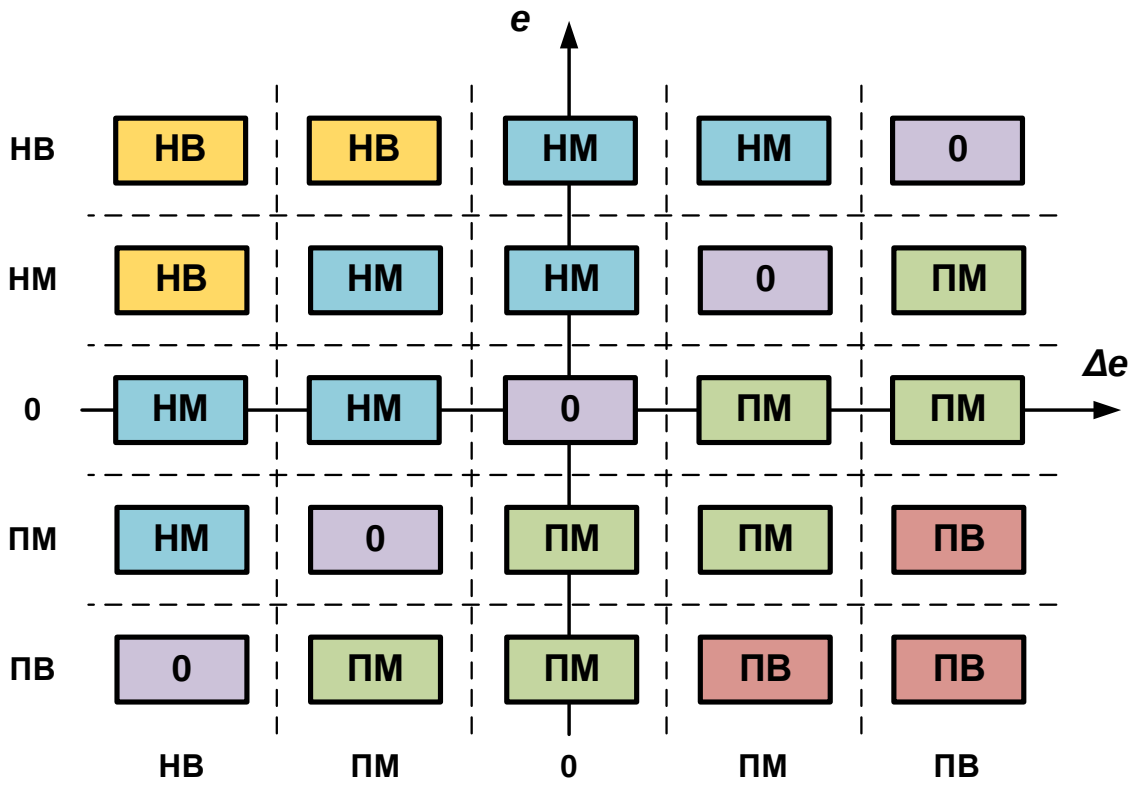


Рисунок 12.1 – Відображення закону управління фазову площину

Виділимо на фазовій площині області, де управління однаково (див. рис. 12.2).

Як свідчить рис. 12.2 величина модуля сигналу управління пропорційна відстані від прямої $e = \Delta e$. На використанні цієї особливості заснований так званий ковзний режим нечіткого регулятора.

Ковзаючий режим управління – робастний метод управління нелінійними системами в умовах невизначеності, який застосовується для об'єктів без істотного запізнення.

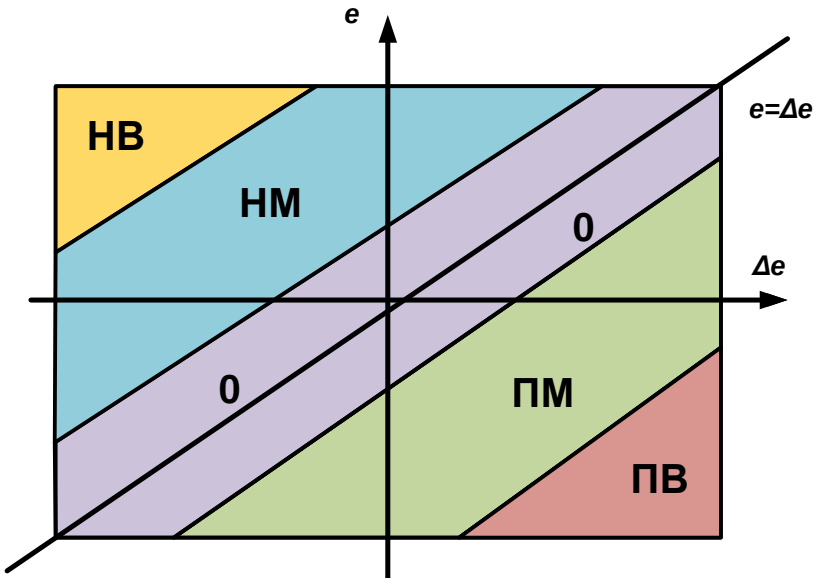


Рисунок 12.2 - Різні області сигналу керування на фазовій площині

Розглянемо нелінійний об'єкт з одним входом та одним виходом (SISO):

$$x^{(n)} = f(X) + u;$$

$$X = \left(x, \dot{x}, \dots, x^{(n)}\right)^T,$$

де $u \in R$ - керуючий вхід; $x \in R$ – вихід, $X \in R^n$ – вектор стану.
Невизначеність моделі описується функцією

$$f(X) = \hat{f}(X) + \Delta f(X);$$

$$\Delta f(X) \le F(X)$$

де оцінка $\hat{f}(X)$ та $F(X)$ - відомі; $\Delta f(X)$) – невідома величина.
Мета управління полягає у виробленні такого сигналу зворотного зв'язку $u = u(X)$, щоб стан системи X наближався до бажаного стану X_d, тобто.

$$e = X - X_d \to 0.$$

Визначимо скалярну функцію

$$S(X,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e = e^{(n-1)} + C_{n-1}^1 \lambda e^{(n-2)} + C_{n-1}^2 \lambda^2 e^{(n-3)} + \dots + \lambda^{(n-1)} e$$

де λ – позитивна константа. Рівняння

$$s(X,t) = 0 \qquad (12.1)$$

визначає залежну від часу перемикальну поверхню в просторі станів R^n.

Для системи другого порядку (n = 2) поверхня ковзання $S(t)$ визначається виразом

$$S(X,t) = \dot{e} + \lambda e = \dot{x} + \lambda x - \dot{x_d} - \lambda x_d = 0$$

Рівняння має єдине рішення $e(t) = 0$ за нульових початкових умов $e(0) = 0$.

Проблема керування траєкторією зводиться до завдання забезпечення (12.1).

Це може бути забезпечено при виконанні умови ковзання:

$$\frac{1}{2}(s)^2 \leq -\eta|s|$$

де η - позитивна константа.

Інакше кажучи, для того щоб у системі існував ковзний режим, необхідно сформувати управління таким чином, щоб точка, що зображає, один раз потрапивши на поверхню ковзання, вже не могла зійти з неї і далі рухалася тільки вздовж цієї поверхні. Нехай у деякий момент часу $S > 0$. Тоді похідна за часом dS/dt (швидкість зміни S) має бути негативною. У цьому випадку S (відхилення від поверхні ковзання) буде зменшуватися до нуля, тобто зображувальна точка буде рухатися у напрямку до S. Нехай, далі точка перетину поверхню $S = 0$ і тепер $S<0$. Відповідно, повинно змінитися і значення похідної, а саме виконати умову $dS/dt > 0$. У цьому випадку зображувальна точка буде рухатися назад у напрямку до поверхні ковзання.

Відзначимо лише, що режим ковзання вимагає опису фазової траєкторії бажаної системи (лінії ковзання). Якщо реальна фазова траєкторія перетинає бажану фазову траєкторію, сигнал управління перемикається. Перемикання можуть відбуватися з дуже великою (теоретично нескінченною) частотою, утримуючи при цьому перехідний процес на лінії ковзання. При зміні властивостей об'єкта змінюється лише частота перемикання сигналу управління, а траєкторія, вздовж якої проходить рух, залишається незмінною.

Таким чином, можна вважати, що задана лінія перемикання, де значення сигналу управління дорівнює нулю. Вище та нижче цієї лінії сигнал керування має різні знаки, а його модуль пропорційний відстані від цієї лінії (рис. 12.3):

$$S\colon\ \Delta e + \lambda e = 0.$$

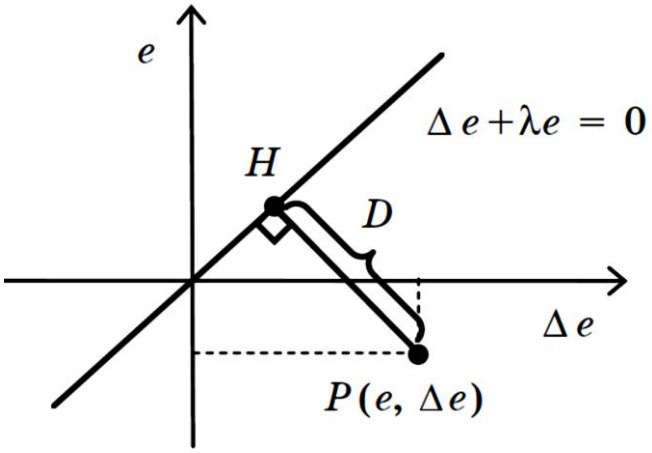


Рисунок 12.3 - Відстань до лінії перемикання

Розглянемо розрахунок дистанції від точки у фазовому просторі до лінії перемикання (рис. 12.3 де *H* – точка перетину лінії перемикання і перпендикуляра, проведеного до цієї лінії з точки *P*).

Відстань розраховується за відомими формулами (замість похідної тут використано збільшення):

$$d = \sqrt{(e - e_1)^2 + (\Delta e - \Delta e_1)^2} = \frac{|\Delta e_1 + \lambda \Delta e_1|}{\sqrt{1 + \lambda^2}}.$$

З урахуванням знаку відстань можна описати формулою

$$D = sgn(S)\frac{|\Delta e_1 + \lambda \Delta e_1|}{\sqrt{1 + \lambda^2}} = \frac{\Delta e_1 + \lambda \Delta e_1}{\sqrt{1 + \lambda^2}},$$

де

$$sgn(S) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S > 0; \\ -1, & \text{якщо } S < 0\,. \end{cases}$$

Таким чином, за рахунок використання відстані до лінії перемикання зі знаком можна описати нечіткий закон управління одномірною таблицею (табл. 12.1).

Таблиця 12.1 – Одномірний нечіткий закон управління

D	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
*D**	НВ	НМ	0	ПМ	ПВ
*U**	НВ	НМ	0	ПМ	ПВ

У табл. 12.1 величина *D** визначає лінгвістичне значення відстані,

а *U** – лінгвістичне значення сигналу управління. Число правил, що описують нечіткий закон управління, скорочується таким чином у п'ять разів (порівняно з табл. 10.5). У цьому полягає основна перевага використання ковзного режиму НЛР. Справді, величини x_i, зазначені у табл. 12.1 є центрами відповідних термів, і нечіткий закон управління вимагає завдання всього 5 параметрів, а не 25.

Лінію перемикання можна описати і у випадку, коли на вході регулятора подається більше двох вхідних змінних. В загальному випадку перемикальна поверхня задається рівнянням

$$S = e^{(n-1)} + \lambda_{n-1}\lambda e^{(n-1)} + \cdots + \lambda_2 \dot{e} + \lambda_1 e = 0$$

Відповідно, відстань до лінії перемикання визначається за формулою

$$D = \frac{e^{(n-1)} + \lambda_{n-1}\lambda e^{(n-1)} + \cdots + \lambda_2 \dot{e} + \lambda_1 e}{\sqrt{1 + \lambda_{n-1}^2 + \cdots + \lambda_2^2 + \lambda_1^2}}.$$

Отже, змінюється лише формула обчислення відстані, а алгоритм нечіткого управління залишається тим самим, і завдання проектування НЛР завжди значно спрощується.

12.2 Приклад моделювання роботи НЛР у режимі спостереження

Нехай об'єкт управління заданий передавальною функцією

$$W = \frac{6{,}5}{0{,}02p^2 + 0{,}4p + 1}$$

На рис. 12.4 представлена схема моделювання в MatLab Simulink.

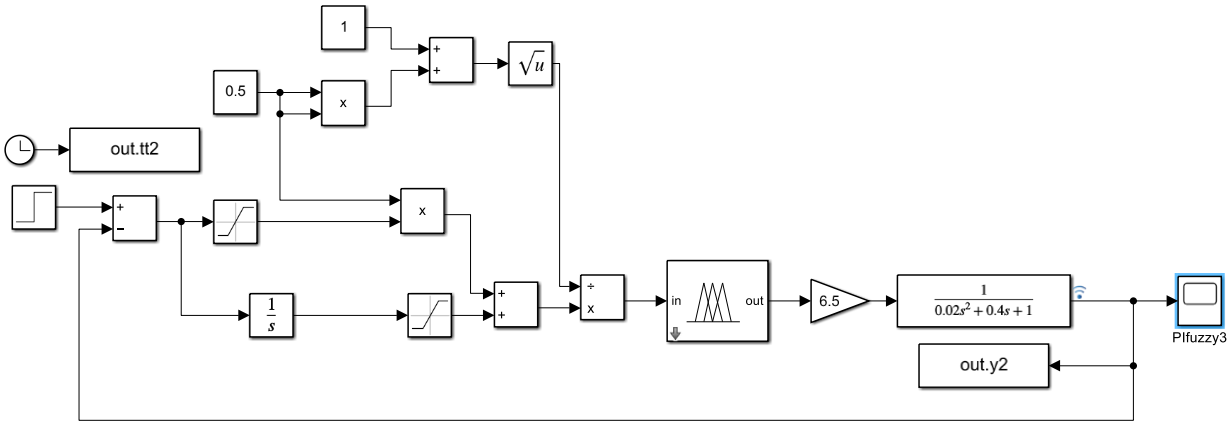


Рисунок 12.4 – Математична модель НЛР в режимі спостереження

Вхідний сигнал НЛР формується відповідно до (10.4). Нечіткий

закон управління відповідає табл. 10.5. При рівномірному розташуванні термів вхідно-вихідних лінгвістичних змінних завдання конструювання НЛР зводиться до правильного вибору коефіцієнта λ.

Синтезуємо Fuzzy Logic Controller *НЛР в режимі спостереження* надаємо Fis name: PISfis7 (ім'я може буди будь-яке).

Викликається редактор системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 12.5.).

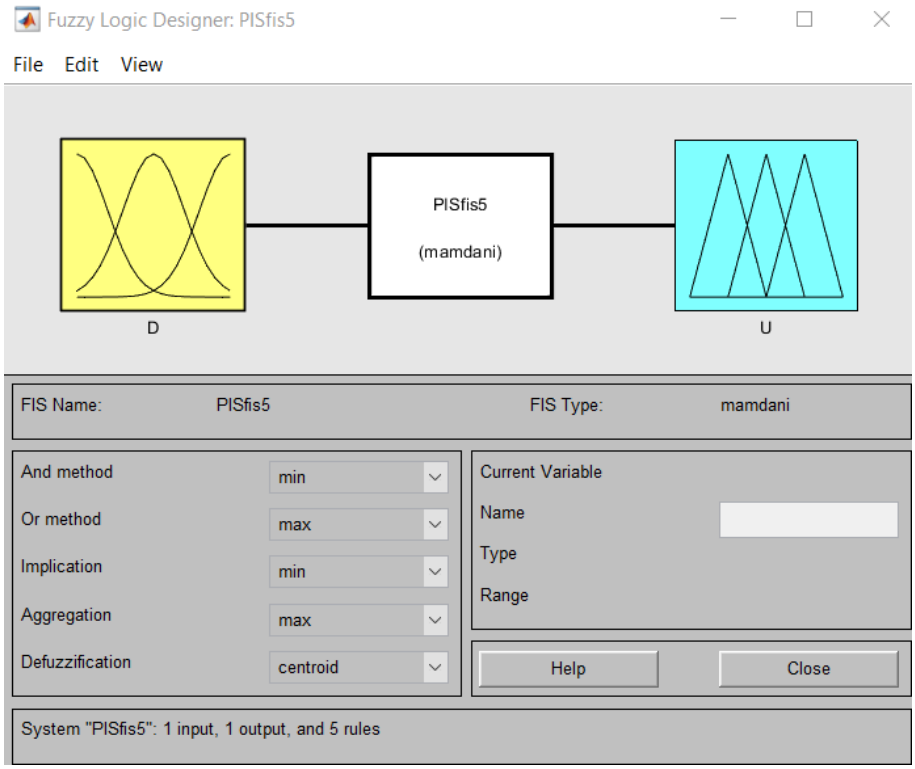


Рисунок 12.5 – Налаштування інтерфейсу FIS editor

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

У меню *Edit* послідовно додаємо вхідну змінну з розміром базової шкали (Range= [-1 1]) та вихідну змінну з розміром базової шкали (*Range*= [-1 1]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної трикутну функцію приналежності.

Терми лінгвістичної змінної «Помилка управління» розміщуються відповідно:

Name = "NB"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.33];
Name = "NM"; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.33 -0.03];
Name = "NS"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 -0.033 0];
Name = "Z"; Type = " trimf"; Param = [-0.1 0 0.1];
Name = "PS"; Type = " trimf"; Param = [0 0.033 0.33];
Name = "PM"; Type = " trimf"; Param = [0.033 0.33 1];
Name = "PB"; Type = "trimf"; Param = [0.33 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління» наведено на рис. 12.6.

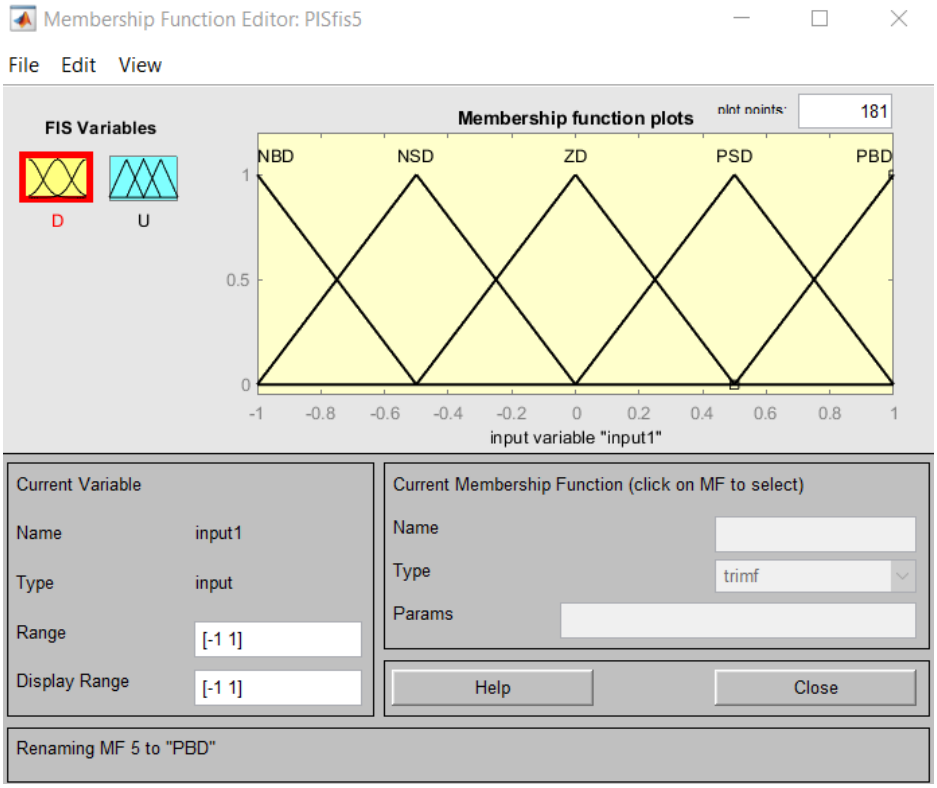


Рисунок 12.6 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління»

Для опису вихідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. 3 параметрами:

Name = "NBD"; Type = "trimf"; Param = [-1.5 -1 -0.5];
Name = " NSD "; Type = " trimf"; Param = [-1 -0.5 0];
Name = "ZD"; Type = " trimf"; Param = [-0.5 0 0.5];
Name = "PSD"; Type = " trimf"; Param = [0 0.5 1];
Name = "PBD"; Type = "trimf"; Param = [0.5 1 1.5].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 12.7.

Рисунок 12.7 – Результат налаштування функцій приналежності вихідних змінних

Після опису вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку дорівнює 5. Управляючі правила сформуємо згідно з табл. 10.5:

1. if (input1 is NBD) then (output1 is NBu) (1)
2. if (input1 is NSD) then (output1 is NSu) (1)
3. if (input1 is ZD) then (output1 is Zu) (1)
4. if (input1 is PSD) then (output1 is PSD) (1)
5. if (input1 is PBD) then (output1 is PBU) (1)

Налаштовування управляючих правил для даного випадку наведено на рисунку (див. рис. 12.8).

Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1).

Після опису правил можливо за допомогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого висновку за різних вхідних даних (див. рис. 12.9);

− інтерфейсу Surface Viewer можливо переглянути графічне подання закону управління (рис. 12.10).

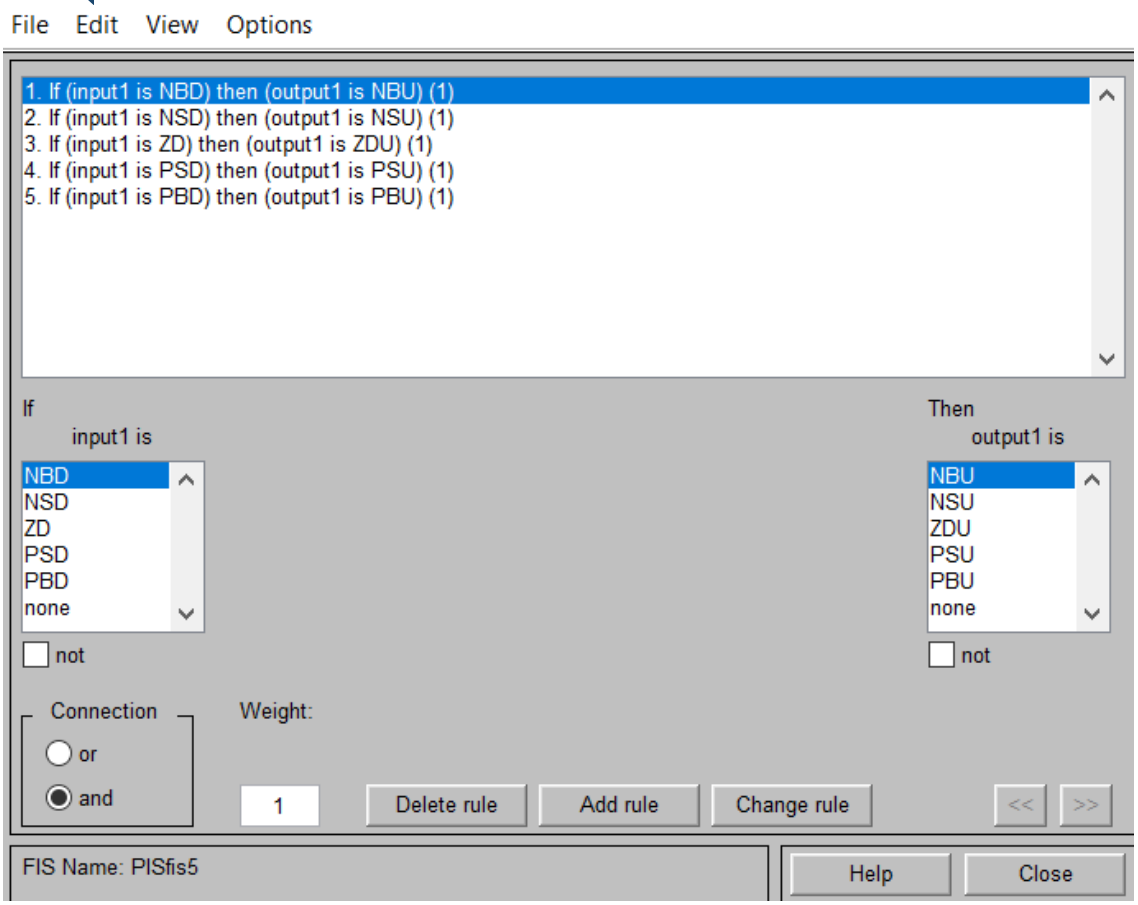


Рисунок 12.8 - Налаштовування опису правил функціонування НЛР

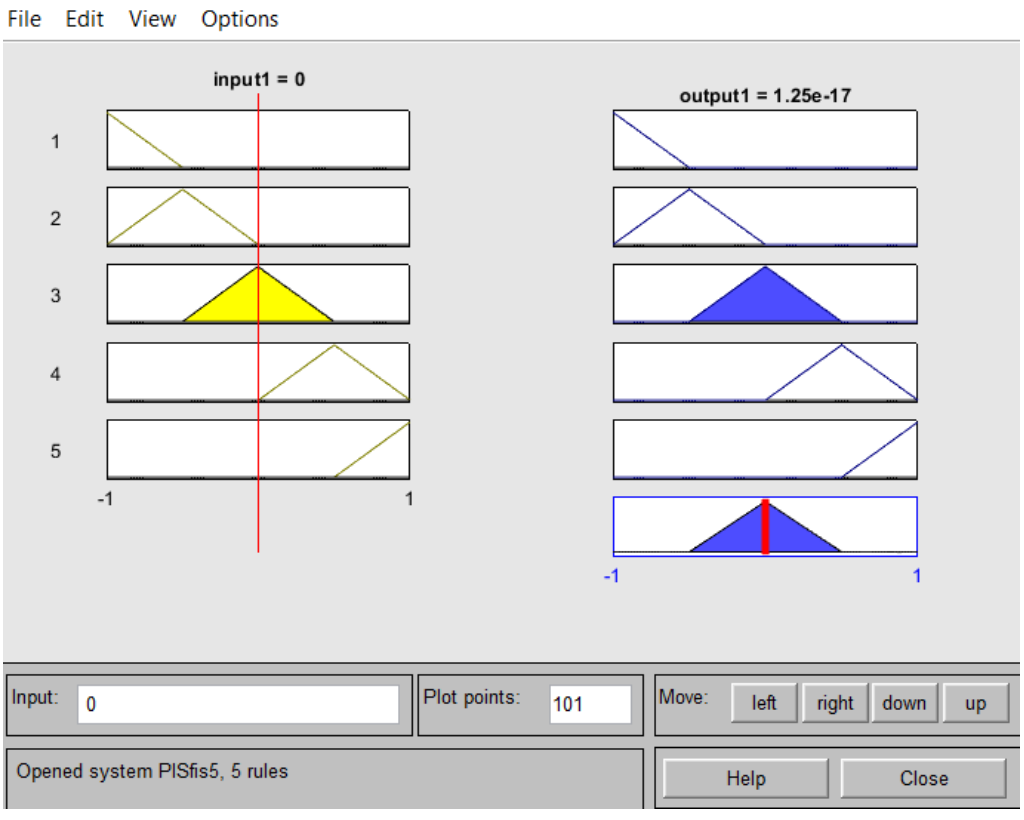


Рисунок 12.9 - Робота системи НЛР

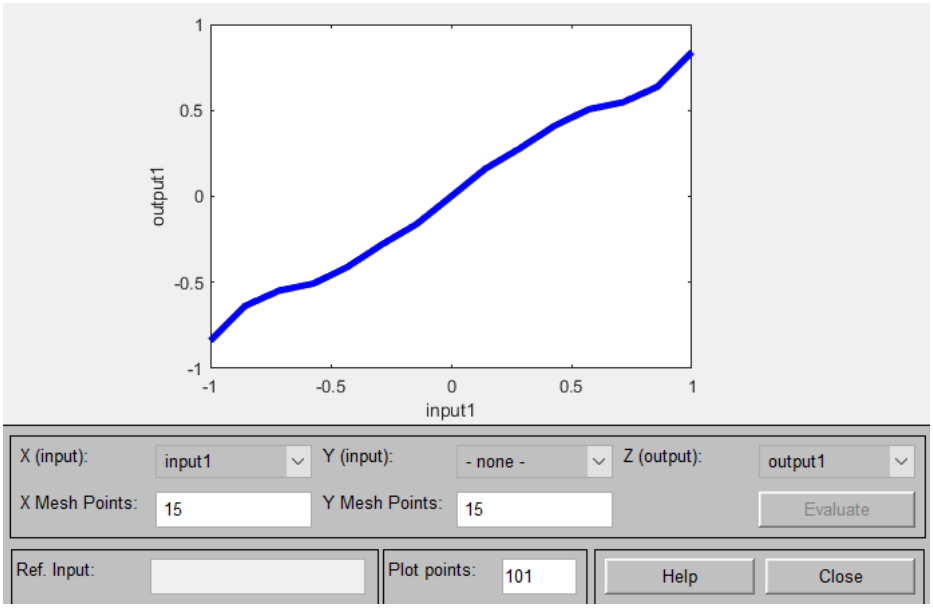


Рисунок 12.10 – Графік управління системою нечіткого висновку

Після процедур налаштування НЛР у редакторі системи нечіткого висновку здійснює запис результатів налаштування у Fuzzy Logic Controller. Для цього у вкладці File здійснюємо Export в математичну модуль нечіткого контролера From Workspase вказавши ім'я Fuzzy Logic Controller.

Після експорту закону функціонування НЛР на математичної моделі системи управління (див. рис. 12.4) получено перехідний процес для синтезованого НЛР при різних коефіцієнтах λ (див. рис. 12.11).

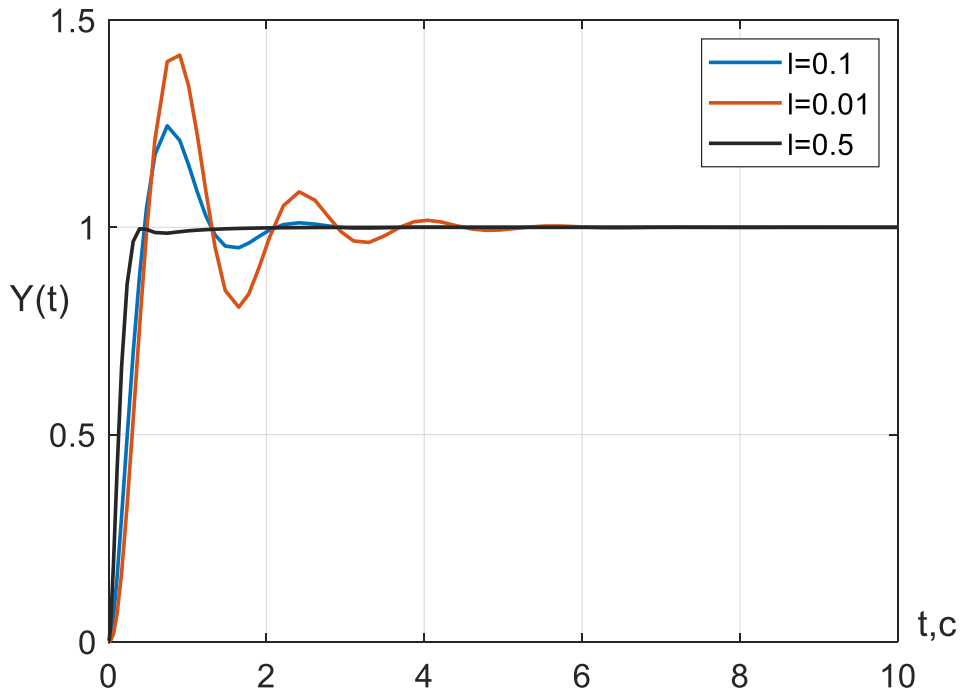


Рисунок 12.11 – Графік перехідного процесу для синтезованого НЛР при різних коефіцієнтах λ

12.3 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 12.2.

За вказаними у табл. 12.2 потрібно синтезувати нелінійний нечіткий регулятор ПІ-типу у режимі спостереження з використанням системи нечіткого висновку:

Таблиця 12.2 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
1	$W(p) = \frac{2}{2p^2 + p + 1}$
2	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.1p + 1}$
3	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 0.5p + 1}$
4	$W(p) = \frac{1}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
5	$W(p) = \frac{6}{0.8p^2 + 0.4p + 1}$
6	$W(p) = \frac{3}{p^2 + 0.8p + 1}$
7	$W(p) = \frac{7}{5p^2 + 2.5p + 1}$
8	$W(p) = \frac{5}{2p^2 + 1.1p + 1}$
9	$W(p) = \frac{2.5}{6.2p^2 + 3p + 1}$
10	$W(p) = \frac{3.6}{2p^2 + p + 1}$
11	$W(p) = \frac{4.5}{3p^2 + 1.5p + 1}$
12	$W(p) = \frac{10}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
13	$W(p) = \frac{8.8}{8p^2 + 4p + 1}$
14	$W(p) = \frac{3}{1.5p^2 + 0.8p + 1}$
15	$W(p) = \frac{4.7}{5.6p^2 + 3p + 1}$
16	$W(p) = \frac{6.3}{5.2p^2 + 2.1p + 1}$

Продовження табл. 12.2

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
17	$W(p) = \frac{2.4}{2.7p^2 + 1.3p + 1}$
18	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.11p + 1}$
19	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 1.3p + 1}$
20	$W(p) = \frac{6}{7.2p^2 + 3.1p + 1}$

12.4 Контрольні питання

1. Що таке ковзний режим нечіткого регулятора?
2. Як використовується фазова площина при описі ковзного режиму?
3. У чому основна перевага використання ковзного режиму НЛР?

13 СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПІД-ТИПУ

Мета роботи: засвоєння методики синтезу нелінійного нечіткого регулятору ПІД-типу з використанням редактора системи нечіткого висновку

13.1 Синтез нечіткого регулятора ПІД-типу на базі НЛР ПД та ПІ типу

Розглянемо реалізацію структури НЛР_ПІД з використанням синтезованих вище НЛР_ПД та НЛР_ПІ (див. рис. 13.1).

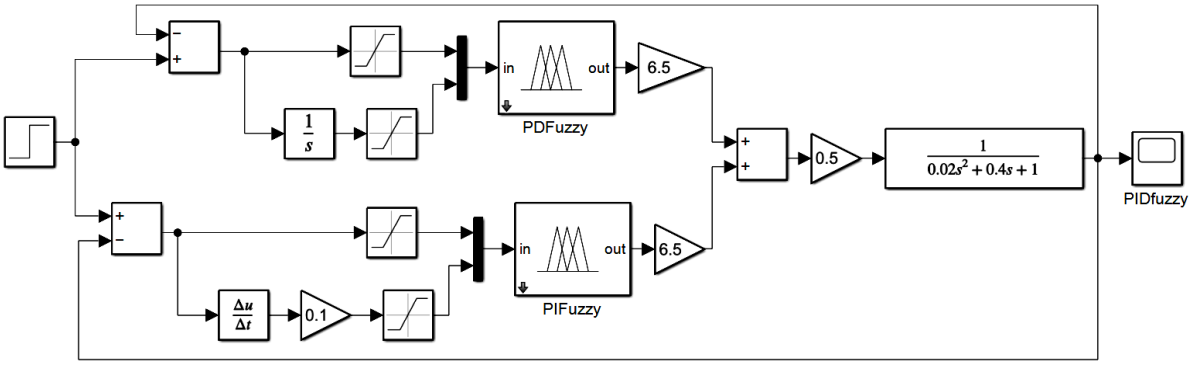


Рисунок 13.1 – Математична модель системи управління з НЛР_ПІД в Simulink MatLab

Налаштування НЛР_ПД та НЛР_ПІ здійснюється згідно методики викладеної вище

На рис. 13.2 показаний перехідний процес у системі.

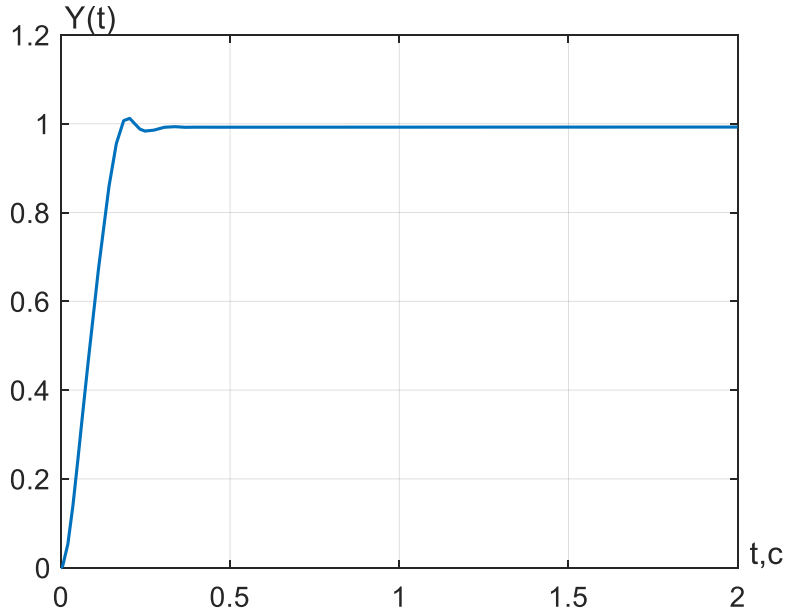


Рисунок 13.2 - Перехідний процес під керуванням НЛР_ПІД

13.2 Альтернативні варіанти синтезу НЛР_ПІД

Розглянемо далі реалізацію структури, яка наведена на рис. 13.3, тобто безпосередньо НЛР_ПІД, що отримує на вхід помилку, її похідну та інтеграл.

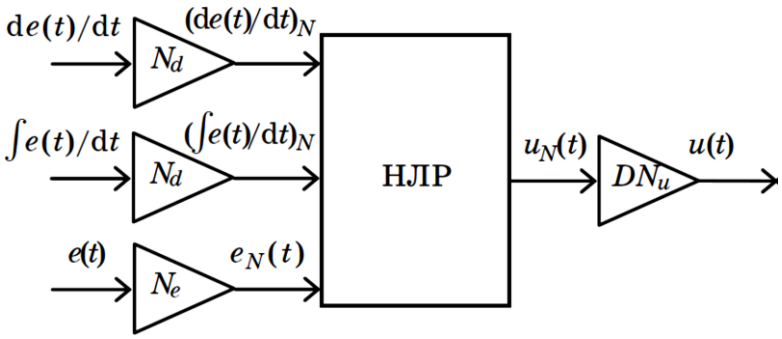


Рисунок 13.3 – НЛР ПІД-типу (НЛР_ПІД)

З метою мінімізації кількості правил будемо для вхідних змінних будемо використовувати по 3 терми (що дає 27 керуючих правил). При цьому кожної змінної відповідає власний масштаб базової шкали *x* (рис. 13.4).

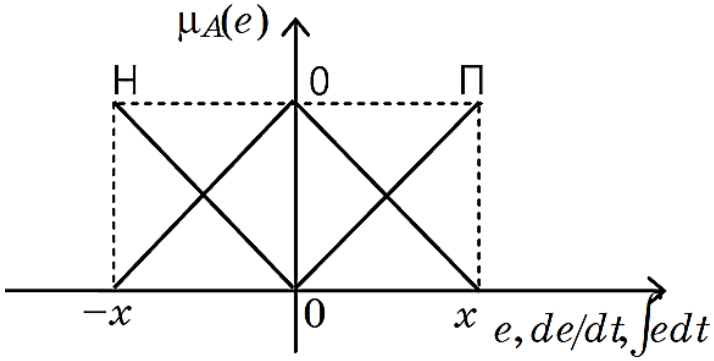


Рисунок 13.4 - Лінгвістичний опис вхідних змінний НЛР_ПІД

Для опису сигналу управління використовуватимемо 5 термів (рис. 13.5).

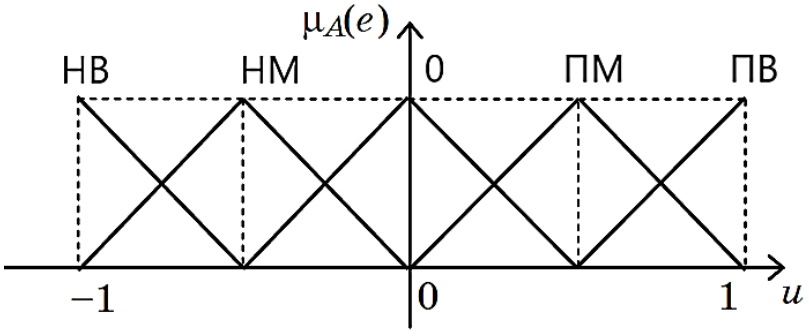


Рисунок 13.5 - Лінгвістичний опис вихідний змінної НЛР_ПІД

Розглянемо проекції поверхні управління НЛР _ПІД на площину $e \times de/dt$ за різних лінгвістичних значеннях $\int edt$.

Варіант 1: "інтеграл помилки" = "0". У цій ситуації коливання відбуваються в області нульової помилки і може бути використана симетрична таблиця лінгвістичних змінних (табл. 13.1).

Таблиця 13.1 – Правила НЛР_ПІД при нульовому інтегралі помилки

Таблиця правил		e*			
		Н	0	П	
Δ e*	Н	НВ	НМ	0	u*
	0	НМ	0	ПМ	
	П	0	ПМ	ПВ	

Варіант 2: "інтеграл помилки" = "П". У цій ситуації керована змінна може бути в області позитивної помилки, тоді потрібен сигнал корекції, величина якого пропорційна зростанню помилки. Якщо ж інтеграл помилки позитивний, а помилка негативна і зменшується, то корекція нульова (табл. 13.2).

Таблиця 13.2 - Правила НЛР_ПІД при позитивному інтегралі помилки

Таблиця правил		e*			
		Н	0	П	
Δ e*	Н	0	ПМ	ПВ	u*
	0	ПМ	ПВ	ПВ	
	П	ПВ	ПВ	ПВ	

Варіант 3: "інтеграл помилки" = "Н". Цей варіант виявляється симетричним до попереднього варіанту (табл. 13.3).

Таблиця 13.3 - Правила НЛР_ПІД при негативному інтегралі помилки

Таблиця правил		e*			
		Н	0	П	
Δ e*	Н	НВ	НВ	НВ	u*
	0	НВ	НВ	НМ	
	П	НВ	НВ	0	

Загальна таблиця правил набуває наступного вигляду (табл. 13.4, вона містить 27 правил, і кожне правило має три посилання.

Таблиця 13.4 – Правила управління НЛР_ПІД

№	∫*edt*	e	*de/dt*	*u*	№	∫*edt*	e	*de/dt*	*u*
1	0	Н	Н	НВ	15	П	0	П	ПВ
2	0	Н	0	НМ	16	П	П	0	ПВ
3	0	Н	П	0	17	П	П	Н	ПВ
4	0	0	Н	НМ	18	П	П	П	ПВ
5	0	0	0	0	19	Н	Н	0	НВ
6	0	0	П	ПМ	20	Н	Н	Н	НВ
7	0	П	Н	0	21	Н	Н	П	НВ
8	0	П	0	ПМ	22	Н	0	0	НВ
9	0	П	П	ПВ	23	Н	0	Н	НВ
10	П	Н	Н	0	24	Н	0	П	НИ
11	П	Н	0	ПМ	25	Н	П	0	НВ
12	П	Н	П	ПВ	26	Н	П	Н	НМ
13	П	0	Н	ПМ	27	Н	П	П	0
14	П	0	0	ПВ					

На рис. 13.6 показана структурна схема НЛР_ПІД Simulink MatLab, У схемі використаний інтегратор з насиченням, інакше НЛР_ПІД вироджується в НЛР_ПД.

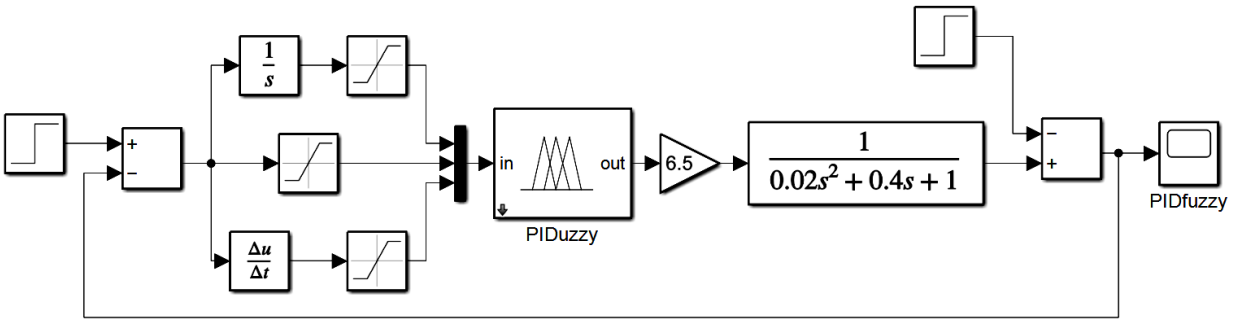


Рисунок 13.6 – Структурна схема математичної моделі об'єкта управління з НЛР_ПІД в Simulink MatLab

Відповідно до рис. 13.6 сформуємо в Simulink MatLab модель системи управління з НЛР ПІД при $x = 6.5$.

Fuzzy Logic Controller надаємо Fis name: PID2fis (ім'я може буди будь-яке).

Викликається редактор системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 13.7.).

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

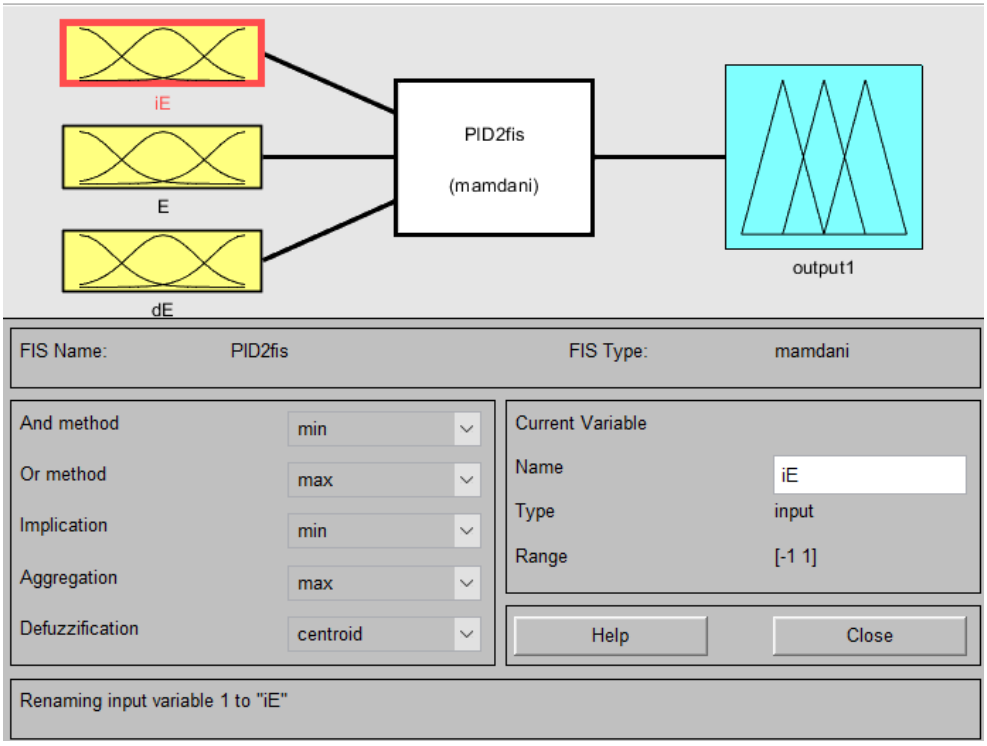


Рисунок 13.7 – Налаштування інтерфейсу FIS editor

У меню *Edit* послідовно додаємо 3 вхідних змінних з розміром базової шкали (Range= [-1 1]) та вихідну змінну з розміром базової шкали (*Range*= [-1 1]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної трикутну функцію приналежності.

Терми лінгвістичної змінної «Інтеграл помилки управління» розміщуються відповідно до рис. 13.8 з параметрами:

Name = "NiE"; Type = "trimf"; Param = [-2 -1 0];
Name = "ZiE"; Type = " trimf"; Param = [-1 0 1];
Name = "PiE"; Type = "trimf"; Param = [0 1 2].

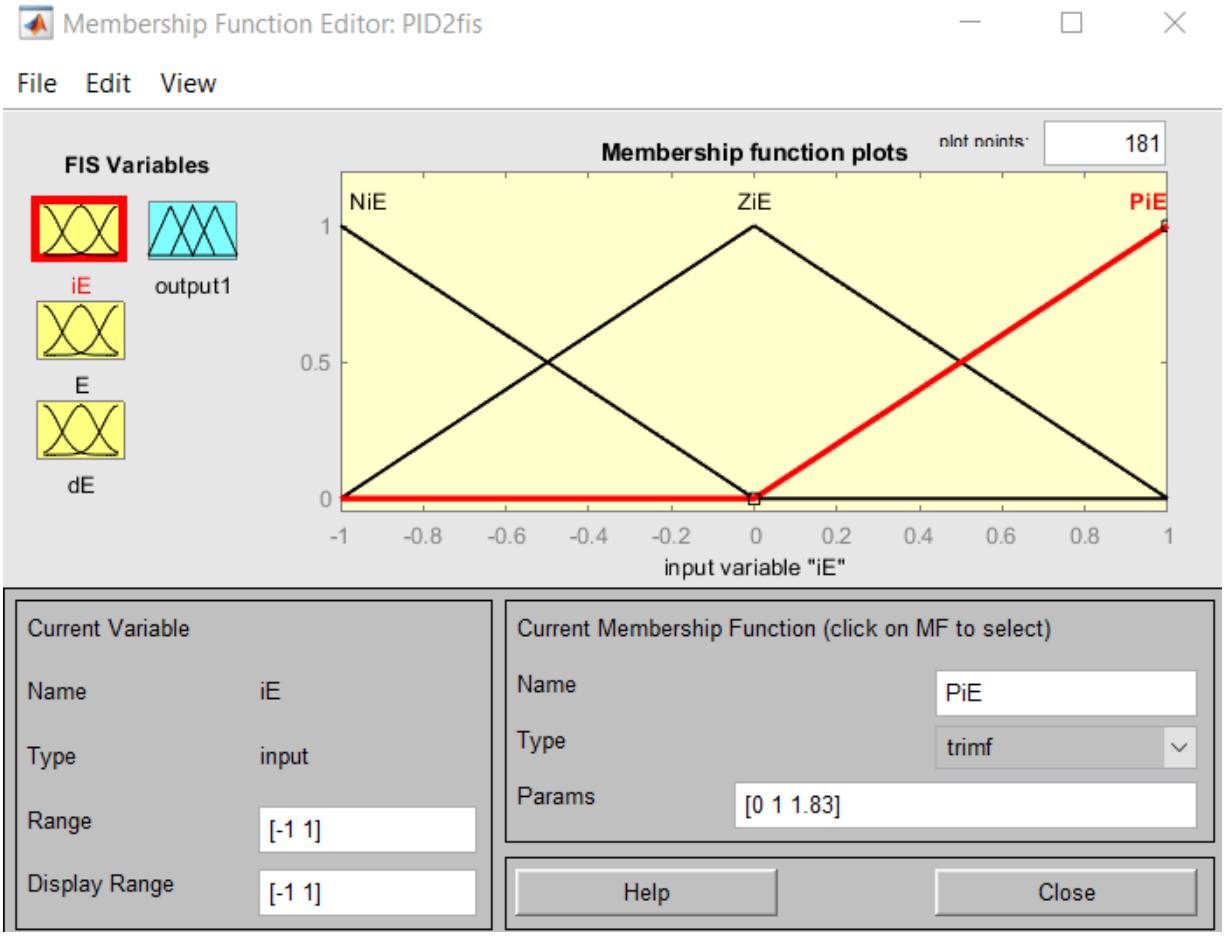


Рисунок 13.8 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Інтеграл помилки управління»

Терми вхідної лінгвістичної змінної «Помилка управління» формуємо рівномірно. Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

Name = "NE"; Type = "trimf"; Param = [-2 -1 0];
Name = "ZE"; Type = " trimf"; Param = [-1 0 1];
Name = "PE"; Type = "trimf"; Param = [0 1 2].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління» на рис. 13.9.

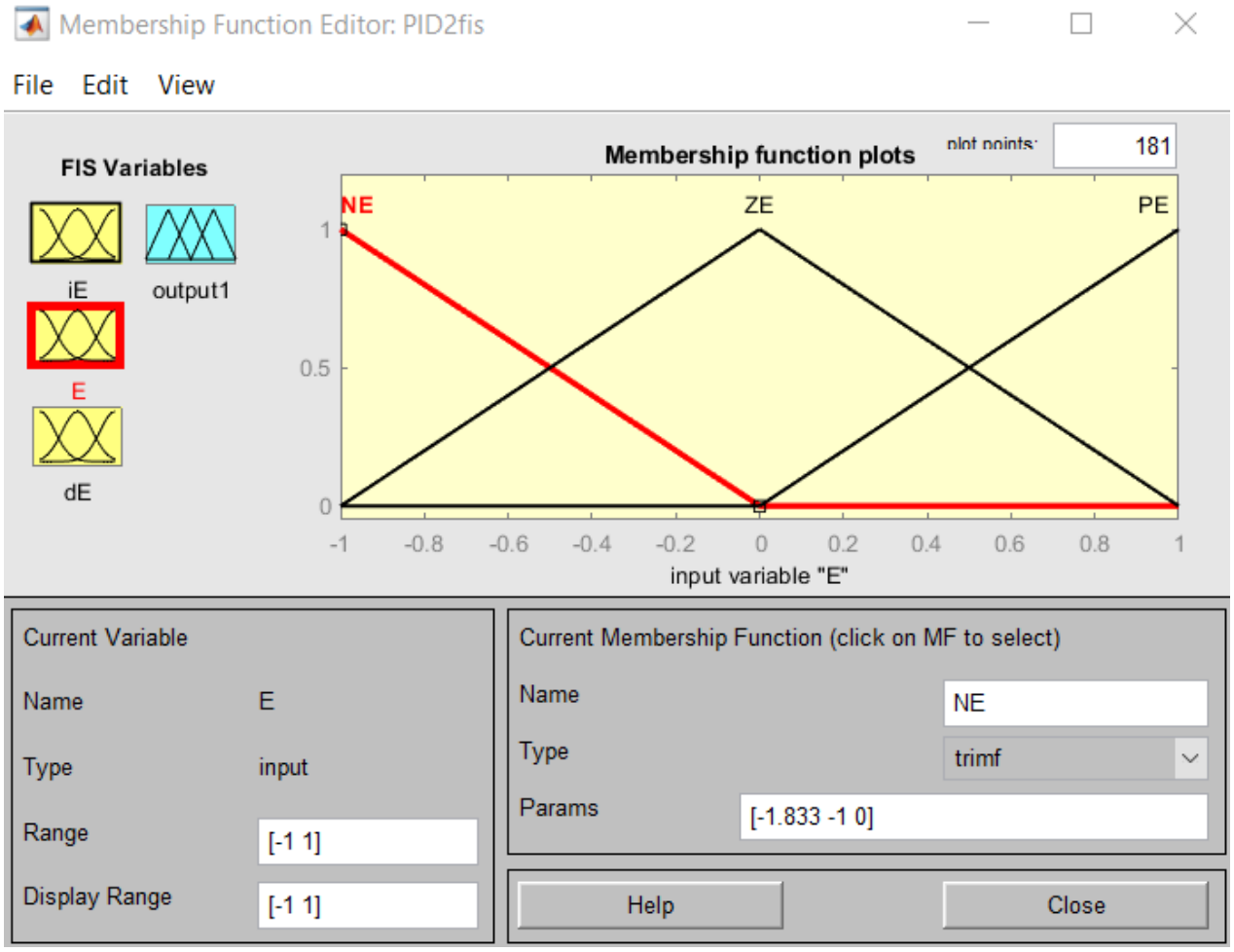


Рисунок 13.9 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління»

Терми вхідної лінгвістичної змінної «Похідна помилки управління» формуємо рівномірно. Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

Name = "NdE"; Type = "trimf"; Param = [-2 -1 0];
Name = "ZdE"; Type = " trimf"; Param = [-1 0 1];
Name = "PdE"; Type = "trimf"; Param = [0 1 2].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління» на рис. 13.10.

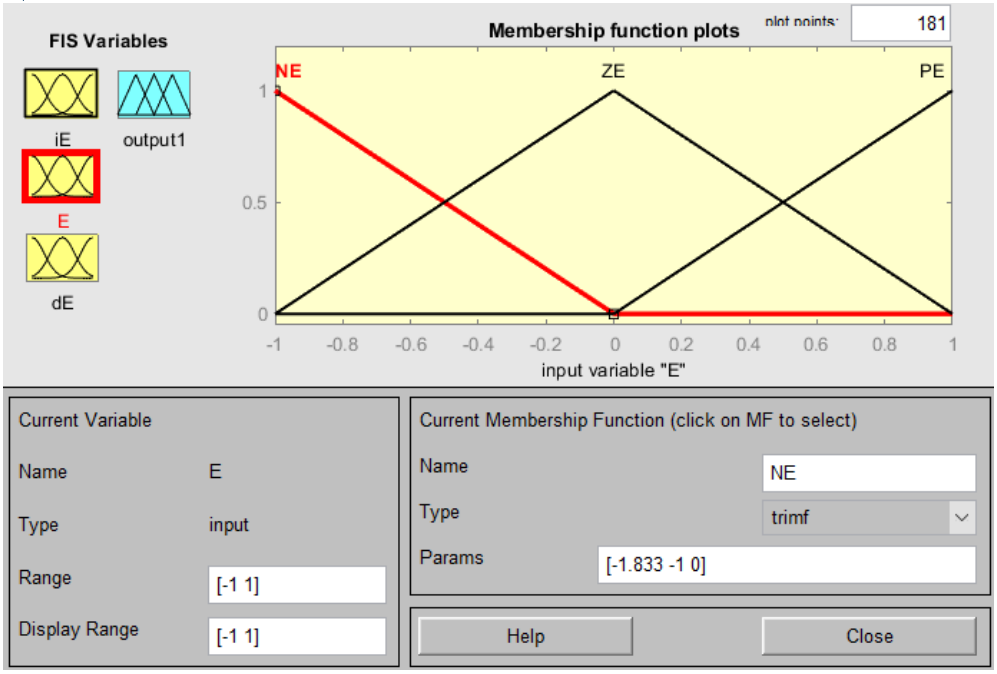


Рисунок 13.10 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління»

Для опису вихідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

Name = "NBu"; Type = "trimf"; Param = [-1.5 -1 -0.5];
Name = "NSu"; Type = " trimf"; Param = [0 -0.5 0];
Name = "Zu"; Type = " trimf"; Param = [-0.5 0 0.5];
Name = "PSu"; Type = " trimf"; Param = [0 0.5 0.1];
Name = "PBu"; Type = "trimf"; Param = [0.5 1.5 1.5].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 13.11.

Після опису вхідних та вихідних лінгвістичних змінних, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку дорівнює 27. Управляючі правила сформуємо згідно з табл. 13.4.

1. if (iE is ZiE) and (E is NE) and (dE is NdE) then (output1 is NBu) (1)
2. if (iE is ZiE) and (E is NE) and (dE is ZdE) then (output1 is NSu) (1)
3. if (iE is ZiE) and (E is NE) and (dE is PdE) then (output1 is Zu) (1)
4. if (iE is ZiE) and (E is ZE) and (dE is NdE) then (output1 is NSu) (1)
5. if (iE is ZiE) and (E is ZE) and (dE is ZdE) then (output1 is Zu) (1)
6. if (iE is ZiE) and (E is ZE) and (dE is PdE) then (output1 is PSu) (1)
7. if (iE is ZiE) and (E is PE) and (dE is NdE) then (output1 is Zu) (1)
8. if (iE is ZiE) and (E is PE) and (dE is ZdE) then (output1 is PSu) (1)

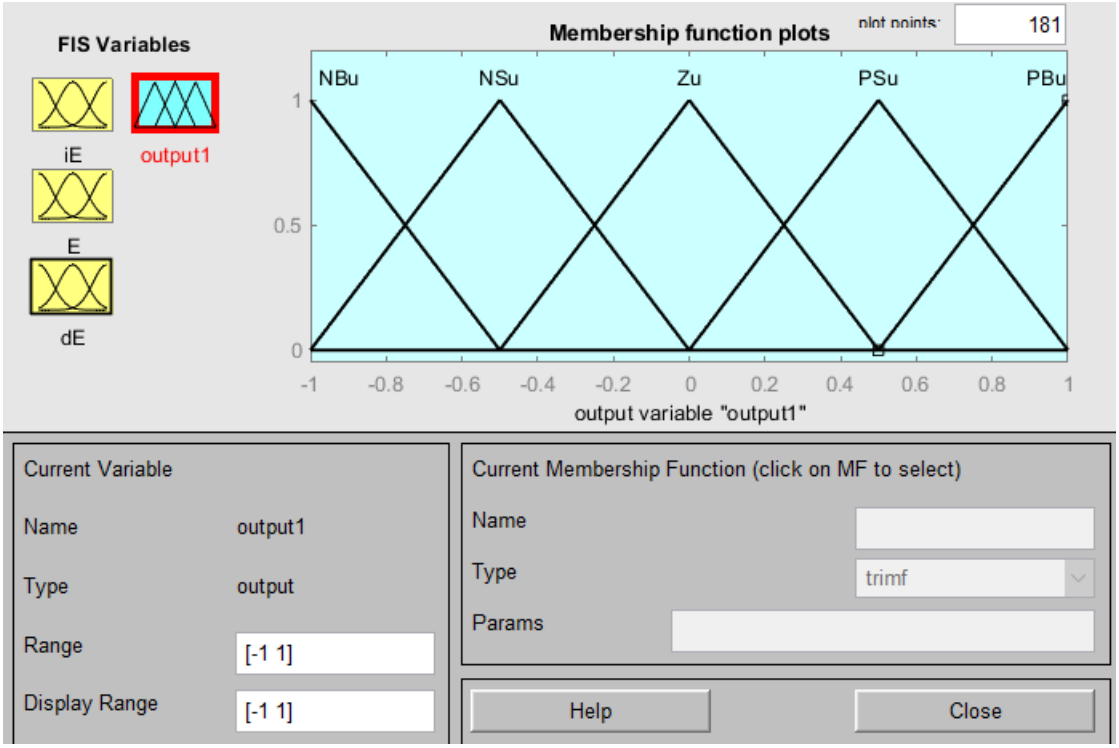


Рисунок 13.11 – Результат налаштування функцій приналежності вихідних змінних

9. if (iE is ZiE) and (E is PE) and (dE is PdE) then (output1 is PBu) (1)
10. if (iE is PiE) and (E is NE) and (dE is NdE) then (output1 is Zu) (1)
11. if (iE is PiE) and (E is NE) and (dE is ZdE) then (output1 is PSu) (1)
12. if (iE is PiE) and (E is NE) and (dE is PdE) then (output1 is PBu) (1)
13. if (iE is PiE) and (E is ZE) and (dE is NdE) then (output1 is PSu) (1)
14. if (iE is PiE) and (E is ZE) and (dE is ZdE) then (output1 is PBu) (1)
15. if (iE is PiE) and (E is ZE) and (dE is PdE) then (output1 is PBu) (1)
16. if (iE is PiE) and (E is PE) and (dE is NdE) then (output1 is PBu) (1)
17. if (iE is PiE) and (E is PE) and (dE is ZdE) then (output1 is PBu) (1)
18. if (iE is PiE) and (E is PE) and (dE is PdE) then (output1 is PBu) (1)
19. if (iE is NiE) and (E is NE) and (dE is NdE) then (output1 is NBu) (1)
20. if (iE is NiE) and (E is NE) and (dE is ZdE) then (output1 is NBu) (1)
21. if (iE is NiE) and (E is NE) and (dE is PdE) then (output1 is NBu) (1)
22. if (iE is NiE) and (E is ZE) and (dE is NdE) then (output1 is NBu) (1)
23. if (iE is NiE) and (E is ZE) and (dE is ZdE) then (output1 is NBu) (1)
24. if (iE is NiE) and (E is ZE) and (dE is PdE) then (output1 is NSu) (1)
25. if (iE is NiE) and (E is PE) and (dE is NdE) then (output1 is NBu) (1)
26. if (iE is NiE) and (E is PE) and (dE is ZdE) then (output1 is NSu) (1)
27. if (iE is NiE) and (E is PE) and (dE is PdE) then (output1 is Zu) (1)

Налаштовування управляючих правил для даного випадку наведено на рисунку (див. рис. 13.12).

Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції

and. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1).

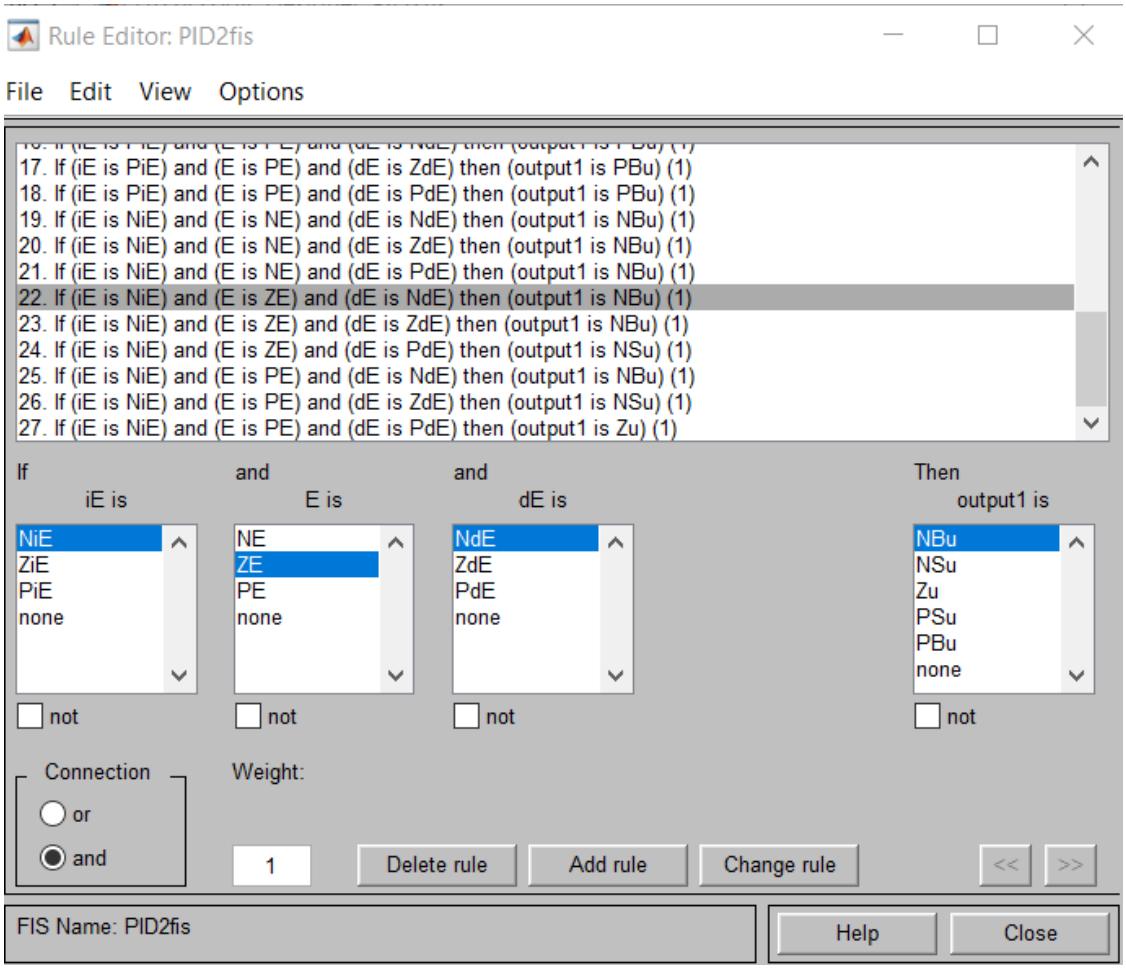


Рисунок 13.12 - Налаштовування опису правил функціонування НЛР_ПІД

Після опису правил можливо за допомогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого висновку за різних вхідних даних (див. рис. 13.13).

Після процедур налаштування НЛР_ПІД у редакторі системи нечіткого висновку здійснює запис результатів налаштування у Fuzzy Logic Controller. Для цього у вкладці File здійснюємо Export в математичну модуль нечіткого контролера From Workspase вказавши ім’я Fuzzy Logic Controller.

Після експорту закону функціонування НЛР_ПІД на математичної моделі системи управління (див. рис. 13.6) получено перехідний процес для системи управління з НЛР_ПІД, який задовольняє поставленому завданню проектування

На рис. 13.14 показаний перехідний процес для синтезованого НЛР_ПІД з додавання збурення на 10с. Згідно графіку перехідного процесу можливо зробити висновок, що спроектована система управління повністю компенсує збурюючи впливи.

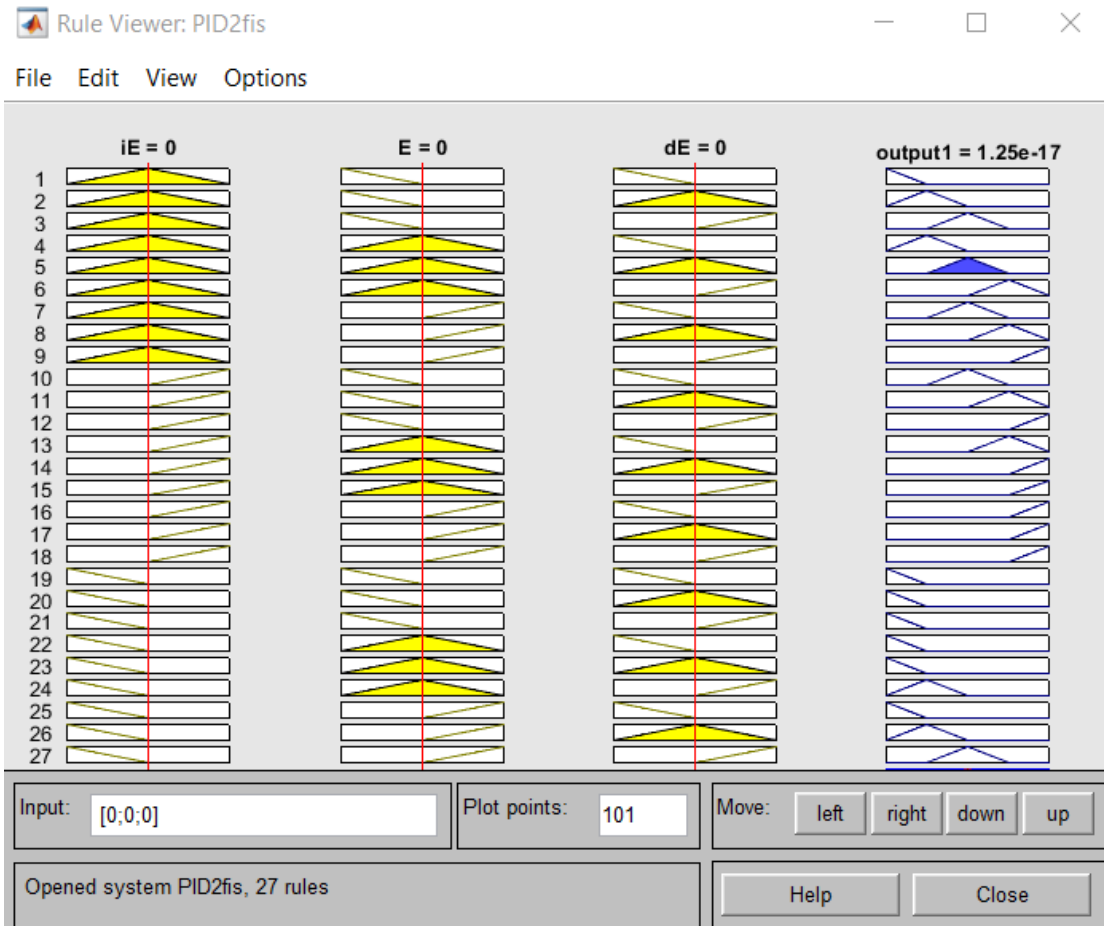


Рисунок 13.13 - Робота системи НЛР_ПІД

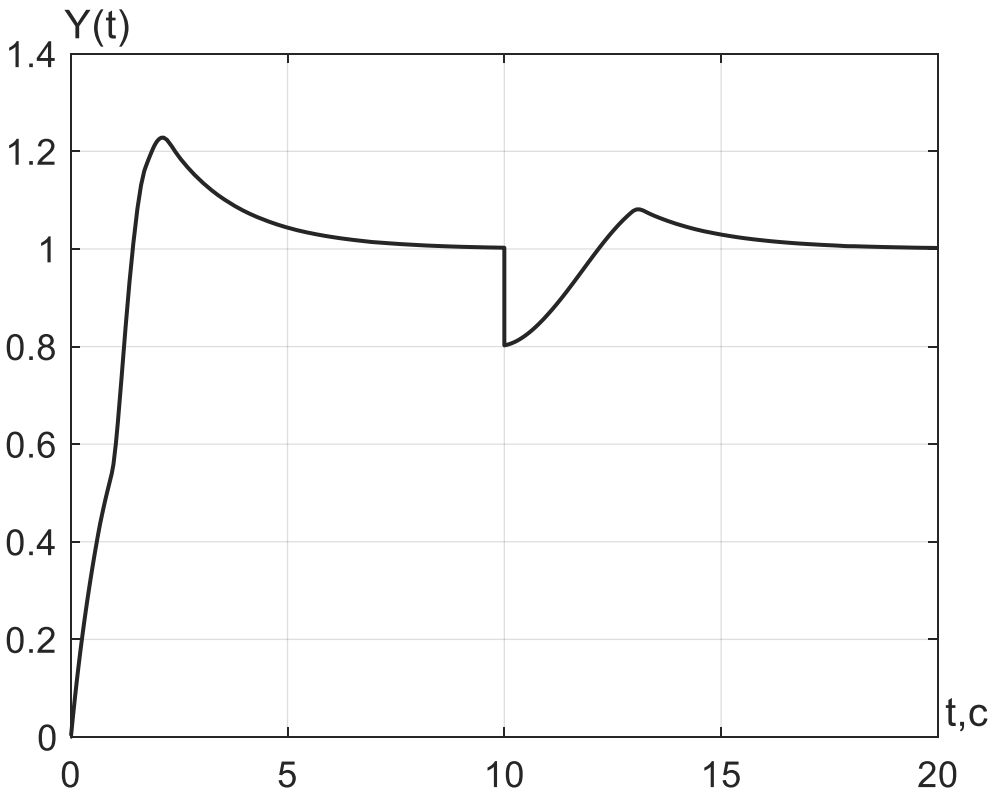


Рисунок 13.14 - Перехідний процес системи управління з НЛР_ПІД

13.3 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 13.5.

За вказаними у табл. 13.5 потрібно синтезувати нелінійний нечіткий регулятор ПІД-типу з використання методики:

1) Синтез нечіткого регулятора ПІД-типу на базі НЛР ПД та ПІ типу;

2) Синтез безпосереднього НЛР_ПІД, що отримує на вхід помилку, її похідну та інтеграл.

у режимі спостереження з використанням системи нечіткого висновку:

Таблиця 13.5 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
1	$W(p) = \frac{2}{2p^2 + p + 1}$
2	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.1p + 1}$
3	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 0.5p + 1}$
4	$W(p) = \frac{1}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
5	$W(p) = \frac{6}{0.8p^2 + 0.4p + 1}$
6	$W(p) = \frac{3}{p^2 + 0.8p + 1}$
7	$W(p) = \frac{7}{5p^2 + 2.5p + 1}$
8	$W(p) = \frac{5}{2p^2 + 1.1p + 1}$
9	$W(p) = \frac{2.5}{6.2p^2 + 3p + 1}$
10	$W(p) = \frac{3.6}{2p^2 + p + 1}$
11	$W(p) = \frac{4.5}{3p^2 + 1.5p + 1}$
12	$W(p) = \frac{10}{0.5p^2 + 0.25p + 1}$
13	$W(p) = \frac{8.8}{8p^2 + 4p + 1}$
14	$W(p) = \frac{3}{1.5p^2 + 0.8p + 1}$

Продовження табл. 13.5

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
15	$W(p) = \frac{4.7}{5.6p^2 + 3p + 1}$
16	$W(p) = \frac{6.3}{5.2p^2 + 2.1p + 1}$
17	$W(p) = \frac{2.4}{2.7p^2 + 1.3p + 1}$
18	$W(p) = \frac{3}{0.2p^2 + 0.11p + 1}$
19	$W(p) = \frac{4}{2p^2 + 1.3p + 1}$
20	$W(p) = \frac{6}{7.2p^2 + 3.1p + 1}$

13.4 Контрольні питання

1. Опишіть структуру ПІД-регулятора.
2. Який вплив на перехідний процес мають різні коефіцієнти ПІД-регулятора?
3. Опишіть метод Зіглера-Ніколса для налаштування ПІД-регулятора.
4. Опишіть варіанти спрощення структури НЛР ПІД-типу

14 СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО СУПЕРВІЗОРА

Мета роботи: засвоєння методики синтезу нечіткого супервізору регулятора ПІД-типу з використанням редактора системи нечіткого висновку

14.1 Теоретичні основи синтезу нечіткого супервізору

Ідея нечіткого супервізора полягає в організації дворівневої системи, в якій на нижньому рівні знаходиться звичайний ПІД-регулятор, а на верхньому рівні – НЛР (рис. 14.1).

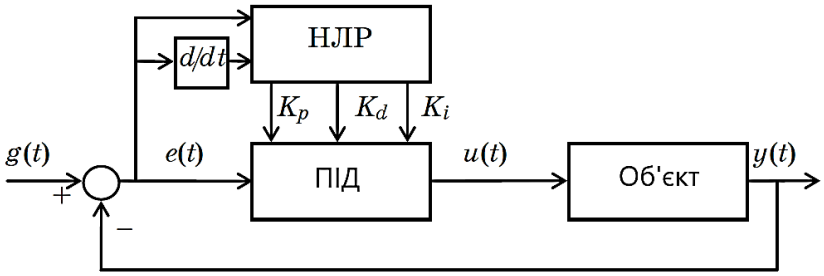


Рисунок 14.1 – Структурна схема нечіткого супервізора

Призначення НЛР полягає в тому, щоб автоматично змінювати коефіцієнти ПІД-регулятора на різних стадіях перехідного процесу. Можливі різні реалізації нечітких супервізорів, нижче розглядаються три схеми.

Перша схема безпосередньо реалізує структуру рис. 14.1. Як було показано вище, НЛР має змінний коефіцієнт посилення. У НЛР_ПИД є три вхідні змінні, тому вважатимуться, що його коефіцієнт посилення складається з трьох складових

$$K_{PID} = K_P + K_I + K_D.$$

Нехай помилка управління та її похідна описуються відповідно до рис. 14.2.

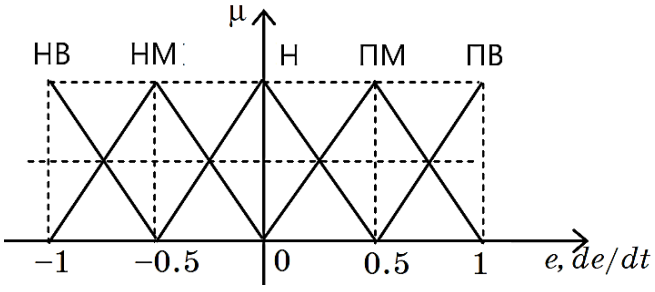


Рисунок 14.2 – Лінгвістичний опис вхідних змінних НЛР_ПІД

Лінгвістичні значення нормалізованих коефіцієнтів НЛР_ПІД можна описати за допомогою семи термів з найменуваннями «нульовий (Н)», «малий 1 (М1)», «малий 2 (М2)», «середній 1 (С1)», «середній 2 (С2)» », «Великий 1 (В1)», «Великий 2 (В2)» (рис. 14.3).

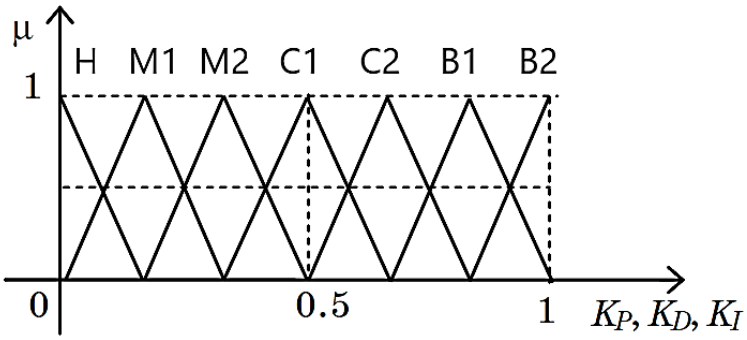


Рисунок 14.3 – Лінгвістичний опис коефіцієнтів підсилення

Для опису вимог до коефіцієнтів ПІД-регулятора розглянемо типовий графік перехідного процесу (рис. 14.4).

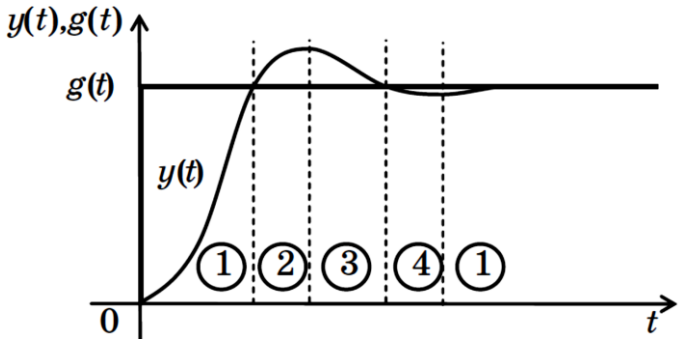


Рисунок 14.4 – Типовий перехідний процес

Розглядаючи знак помилки та її похідної, на графіку можна виділити 4 різні області:

$$1: e(t) > 0, de/dt < 0;$$
$$2: e(t) < 0, de/dt < 0;$$
$$3: e(t) < 0, de/dt > 0;$$
$$4: e(t) > 0, de/dt > 0.$$

Найбільше просто описати вимоги до коефіцієнта K_I. Він відповідає за помилку, що встановилася, і його зміну можна описати правилом: «*Якщо встановилася помилка велика, то K_I великий*». Оскільки розглядається встановлена помилка, значення похідної тут, не має значення. Однак, щоб гасити коливання в області нульової помилки, необхідно надавати K_I малі значення, коли похідна ненульова. У результаті виходить наступний опис змінного K_I (табл. 14.1).

Таблиця 14.1 – Лінгвістичні правила опису K_I

Таблиця правил		(*de*/*dt*)*				
		НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ
Δ e*	НВ	С1	С1	С1	С1	С1
	НМ	М1	М1	М1	М1	М1
	Н	М2	М2	Н	М2	М2
	НМ	М1	М1	М1	М1	М1
	Н	С1	С1	С1	С1	С1

K_I

Коефіцієнт K_P відповідає за помилку відстеження вхідного сигналу *e*, і вимогу до його значення можна описати правилом: "*Якщо e велика, то K_P великий*". При нульовій помилці з позитивною похідної слід дещо збільшувати K_P для зменшення часу перехідного процесу. Табл. 14.2 описує ці правила.

Таблиця 14.2 – Лінгвістичні правила опису K_P

Таблиця правил		(*de*/*dt*)*				
		НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ
Δ e*	НВ	В2	В2	В2	В2	С1
	НМ	В1	В1	В1	С2	В2
	Н	Н	Н	М2	М1	М1
	НМ	В1	В!	В1	С2	В2
	Н	В2	В2	В2	В2	В2

K_P

Коефіцієнт K_D відповідає за перерегулювання, вимогу для його значення можна описати правилом: «*Якщо перерегулювання велике, то K_D великий*». Перерегулювання виникає при наближенні *y*(*t*) до *g*(*t*),

коли помилка та її похідна мають різні знаки (області 1 та 3 на рис. 11.126). У цих ситуаціях K_D повинен мати велике значення, інакше пропорційно зменшується до нуля (див. табл. 14.3).

Таблиця 14.3 – Лінгвістичні правила опису K_D

Таблиця правил		(*de*/*dt*)*				
		НВ	НМ	Н	ПМ	ПВ
Δ e*	НВ	Н	М1	С1	С2	В2
	НМ	М1	В1	С2	В2	В2
	Н	С1	С2	С2	В2	В2
	НМ	В1	В2	В2	М1	М1
	Н	В2	В2	В2	В2	В2

K_D

Табл.14.1-14.3 можуть бути зведені в одну табл. 14.4.

Таблиця 14.4 – Правила корекції коефіцієнтів НЛР_ПІД

№	*e*	*de*/*dt*	K_p	K_D	K_I	№	*e*	*de*/*dt*	K_p	K_D	K_I
1	НВ	НВ	В2	Н	С1	14	Н	ПМ	М1	В2	М2
2	НВ	НМ	В2	М1	С1	15	Н	ПВ	М1	В2	М2
3	НВ	Н	В2	С1	С1	16	ПМ	НВ	В1	В2	М1
4	НВ	ПМ	В2	С2	С1	17	ПМ	НМ	В1	В2	М1
5	НВ	ПВ	В2	В2	С1	18	ПМ	Н	В1	В2	М1
6	НМ	НВ	В1	М1	М1	19	ПМ	ПМ	С2	В2	М1
7	НМ	НМ	В1	В1	М1	20	ПМ	ПВ	В2	В2	М1
8	НМ	Н	В1	С2	М1	21	ПВ	НВ	В2	В2	С1
9	НМ	ПМ	С2	В2	М1	22	ПВ	НМ	В2	В2	С1
10	НМ	ПВ	В2	В2	М1	23	ПВ	Н	В2	В2	С1
11	Н	НВ	Н	В1	М2	24	ПВ	ПМ	В2	В2	С1
12	Н	НМ	Н	В2	М2	25	ПВ	ПВ	В2	В2	С1
13	Н	Н	М2	В2	Н						

14.2 Приклад синтезу нечіткого супервізору ПІД-регулятора

На рис. 14.5 показана схема моделювання НЛР_ПІД.

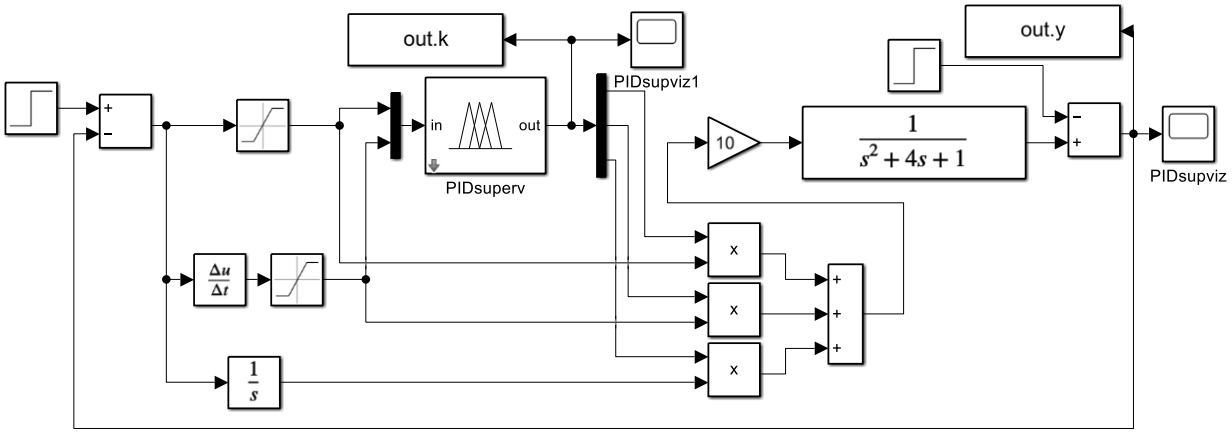


Рисунок 14.5 – Варіант математичного моделювання системи управління з нечітким супервізором ПІД регулятора

Відповідно до рис. 14.5 сформуємо в Simulink MatLab модель системи управління *з нечітким супервізором ПІД регулятора* при *x* = 10.

Fuzzy Logic Controller надаємо Fis name: PIDsupv1 (ім'я може буди будь-яке).

Викликається редактор системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 14.6.).

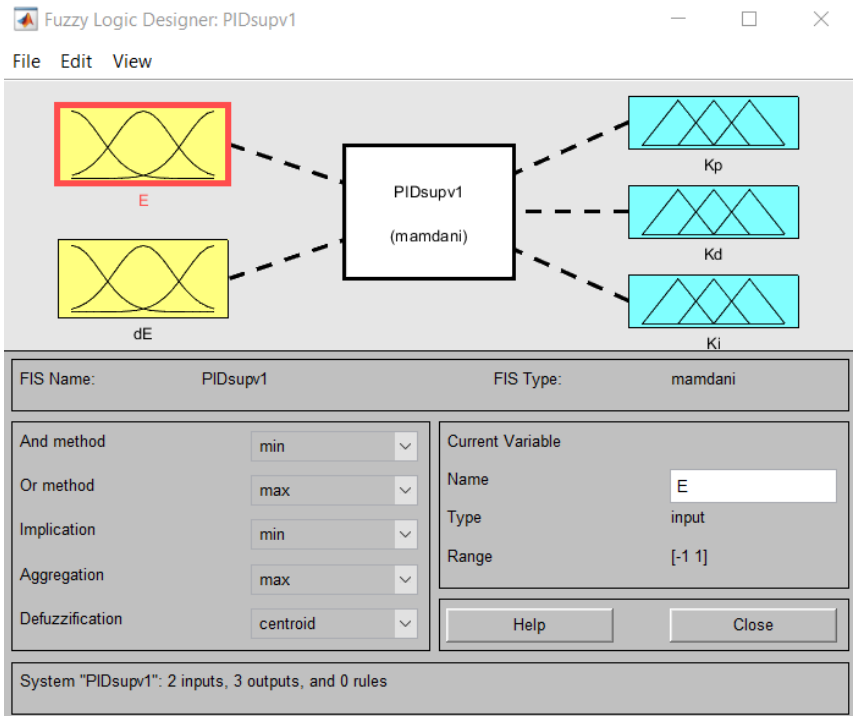


Рисунок 14.6 – Налаштування інтерфейсу FIS editor

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

У меню *Edit* послідовно додаємо 2 вхідні змінні з розміром базової шкали (Range= [-1 1]) та 3 вихідні змінні з розміром базової шкали (*Range*= [0 1]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної трикутну функцію приналежності.

Нехай терми лінгвістичної змінної «Помилка управління» розміщуються відповідно до рис. 11.129 з 5 параметрами:
Name = "NBe"; Type = "trimf"; Param = [-1.5 -1 -0.5];
Name = "NSe"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.5 0];
Name = "Ze"; Type = " trimf"; Param = [-0.5 0 0.5];
Name = "PSe"; Type = "trimf"; Param = [0 0.5 1].
Name = "PBe"; Type = "trimf"; Param = [0.5 1 1.5].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління» наведено на рис. 14.7.

Терми вхідної лінгвістичної змінної «Похідна помилки управління» формуємо рівномірно. Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

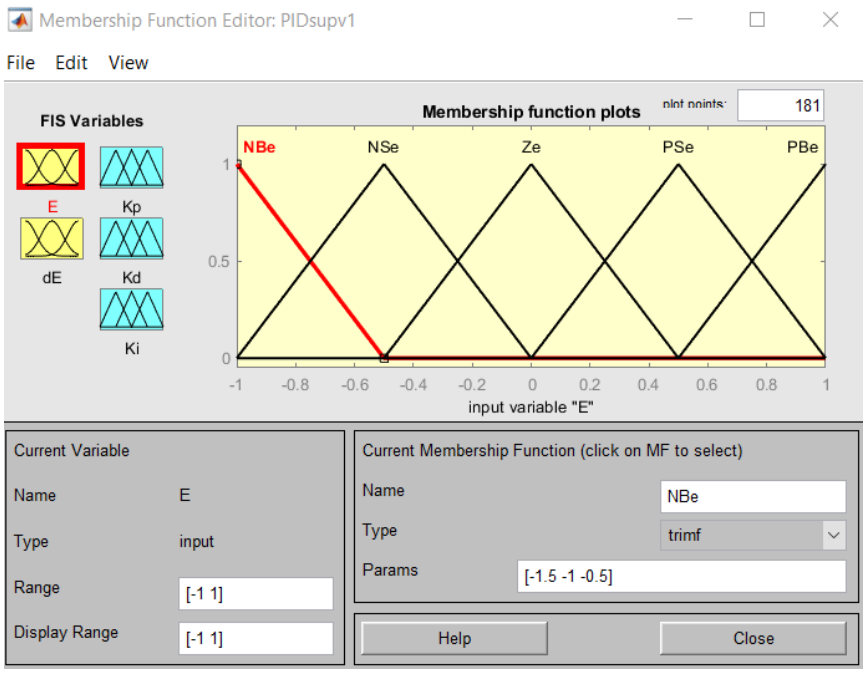


Рисунок 14.7 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління»

Name = "NBde"; Type = "trimf"; Param = [-1.5 -1 -0.5];
Name = "NSde"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.5 0];
Name = "Zde"; Type = " trimf"; Param = [-0.5 0 0.5];
Name = "PSde"; Type = "trimf"; Param = [0 0.5 1].
Name = "PBde"; Type = "trimf"; Param = [0.5 1 1.5].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління» на рис. 14.8.

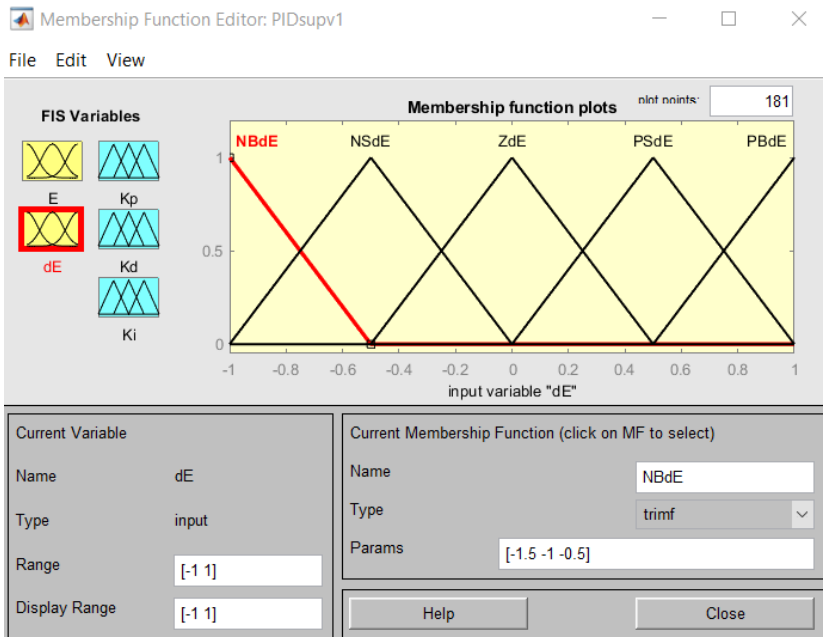


Рисунок 14.8 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління»

Для опису вихідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності.
- для K_p:
Name = "Zp"; Type = " trimf"; Param = [-0.166 0 0.166];
Name = "M1p"; Type = "trimf"; Param = [0 0.166 0.33];
Name = "M2p"; Type = " trimf"; Param = [0.166 0.33 0.5];
Name = "C1p"; Type = " trimf"; Param = [0.33 0.5 0.66];
Name = "C2p"; Type = "trimf"; Param = [0.5 0.66 0.83].
Name = "B1p"; Type = " trimf"; Param = [0.66 0.83 1];
Name = "B2p"; Type = "trimf"; Param = [0.833 1 1.166].
- для K_d:
Name = "Zd"; Type = " trimf"; Param = [-0.166 0 0.166];
Name = "M1d"; Type = "trimf"; Param = [0 0.166 0.33];
Name = "M2d"; Type = " trimf"; Param = [0.166 0.33 0.5];
Name = "C1d"; Type = " trimf"; Param = [0.33 0.5 0.66];
Name = "C2d"; Type = "trimf"; Param = [0.5 0.66 0.83].

Name = "B1d"; Type = " trimf"; Param = [0.66 0.83 1];
Name = "B2d"; Type = "trimf"; Param = [0.833 1 1.166].
- для K_I:
Name = "Zi"; Type = " trimf"; Param = [-0.166 0 0.166];
Name = "M1i"; Type = "trimf"; Param = [0 0.166 0.33];
Name = "M2i"; Type = " trimf"; Param = [0.166 0.33 0.5];
Name = "C1i"; Type = " trimf"; Param = [0.33 0.5 0.66];
Name = "C2i"; Type = "trimf"; Param = [0.5 0.66 0.83].
Name = "B1i"; Type = " trimf"; Param = [0.66 0.83 1];
Name = "B2i"; Type = "trimf"; Param = [0.833 1 1.166].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 14.9.

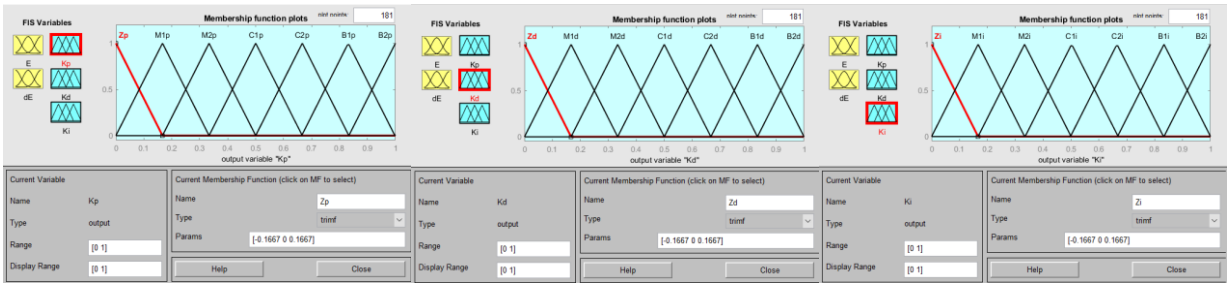


Рисунок 14.9 – Результат налаштування функцій приналежності вихідної змінної K_p, K_d, K_I

Після опису вхідні та вихідні лінгвістичних змінних, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку 25. Управляючі правила сформульовано згідно з табл. 14.4:
1. if (E is NBe) and (dE is NBdE) then (Kp is B2p)(Kd is Zd)(Ki is C1i) (1)
2. if (E is NBe) and (dE is NSdE) then (Kp is B2p)(Kd is M1d)(Ki is C1i) (1)
3. if (E is NBe) and (dE is ZdE) then (Kp is B2p)(Kd is C1d)(Ki is C1i) (1)
4. if (E is NBe) and (dE is PSdE) then (Kp is B2p)(Kd is C2d)(Ki is C1i) (1)
5. if (E is NBe) and (dE is PBdE) then (Kp is B2p)(Kd is B2d)(Ki is C1i) (1)
6. if (E is NSe) and (dE is NBdE) then (Kp is B1p)(Kd is M1d)(Ki is M1i) (1)
7. if (E is NSe) and (dE is NSdE) then (Kp is B1p)(Kd is B1d)(Ki is M1i) (1)
8. if (E is NSe) and (dE is ZdE) then (Kp is B1p)(Kd is C2d)(Ki is M1i) (1)
9. if (E is NSe) and (dE is PSdE) then (Kp is C2p)(Kd is B2d)(Ki is M1i) (1)
10. if (E is NSe) and (dE is PBdE) then (Kp is B2p)(Kd is B2d)(Ki is M1i) (1)
11. if (E is Ze) and (dE is NBdE) then (Kp is Zp)(Kd is B1d)(Ki is M2i) (1)
12. if (E is Ze) and (dE is NSdE) then (Kp is Zp)(Kd is B2d)(Ki is M2i) (1)
13. if (E is Ze) and (dE is ZdE) then (Kp is M2p)(Kd is B2d)(Ki is Zi) (1)
14. if (E is Ze) and (dE is PSdE) then (Kp is M1p)(Kd is B2d)(Ki is M2i) (1)
15. if (E is Ze) and (dE is PBdE) then (Kp is M1p)(Kd is B2d)(Ki is M2i) (1)
16. if (E is PSe) and (dE is NBdE) then (Kp is B1p)(Kd is B2d)(Ki is M1i) (1)
17. if (E is PSe) and (dE is NSdE) then (Kp is B1p)(Kd is B2d)(Ki is M1i) (1)
18. if (E is PSe) and (dE is ZdE) then (Kp is B1p)(Kd is B2d)(Ki is M1i) (1)

19. if (E is PSe) and (dE is PSdE) then (Kp is C2p)(Kd is B2d)(Ki is M1i) (1)
20. if (E is PSe) and (dE is PBdE) then (Kp is B2p)(Kd is B2d)(Ki is M1i) (1)
21. if (E is PBe) and (dE is NBdE) then (Kp is B2p)(Kd is B2d)(Ki is C1i) (1)
22. if (E is PBe) and (dE is NSdE) then (Kp is B2p)(Kd is B2d)(Ki is C1i) (1)
23. if (E is PBe) and (dE is ZdE) then (Kp is B2p)(Kd is B2d)(Ki is C1i) (1)
24. if (E is PBe) and (dE is PSdE) then (Kp is B2p)(Kd is B2d)(Ki is C1i) (1)
25. if (E is PBe) and (dE is PBdE) then (Kp is B2p)(Kd is B2d)(Ki is C1i) (1)

Налаштовування управляючих правил для даного випадку наведено на рисунку (див. рис. 14.10).

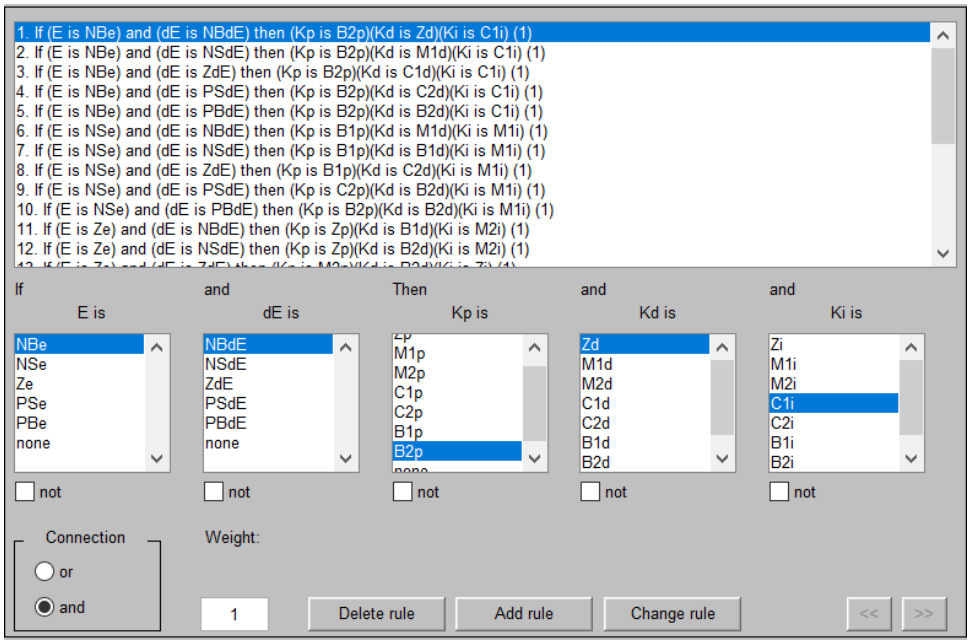


Рисунок 14.10 - Налаштовування опису правил функціонування нечіткого супервізору НЛР_ПІД

Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1).

Після опису правил можливо за допомогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого висновку за різних вхідних даних (див. рис. 14.11).

− інтерфейсу Surface Viewer можливо переглянути графічне подання закону управління (рис. 14.12).

Після процедур налаштування нечіткого супервізору НЛР_ПІД у редакторі системи нечіткого висновку здійснює запис результатів налаштування у Fuzzy Logic Controller. Для цього у вкладці File здійснюємо Export в математичну модуль нечіткого контролера From Workspase вказавши ім’я Fuzzy Logic Controller.

На рис. 14.13 представлені графіки зміни коефіцієнтів ПІД-регулятора під керуванням нечіткого супервізора протягом перехідного процесу.

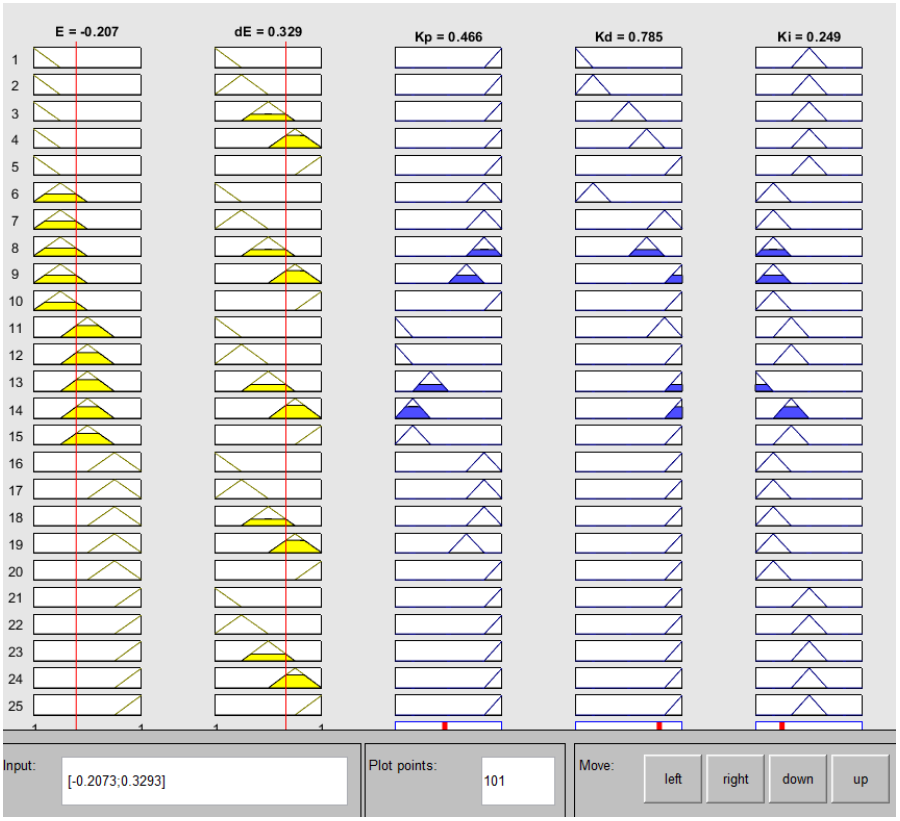


Рисунок 14.11 - Робота системи нечіткого супервізору НЛР_ПІД

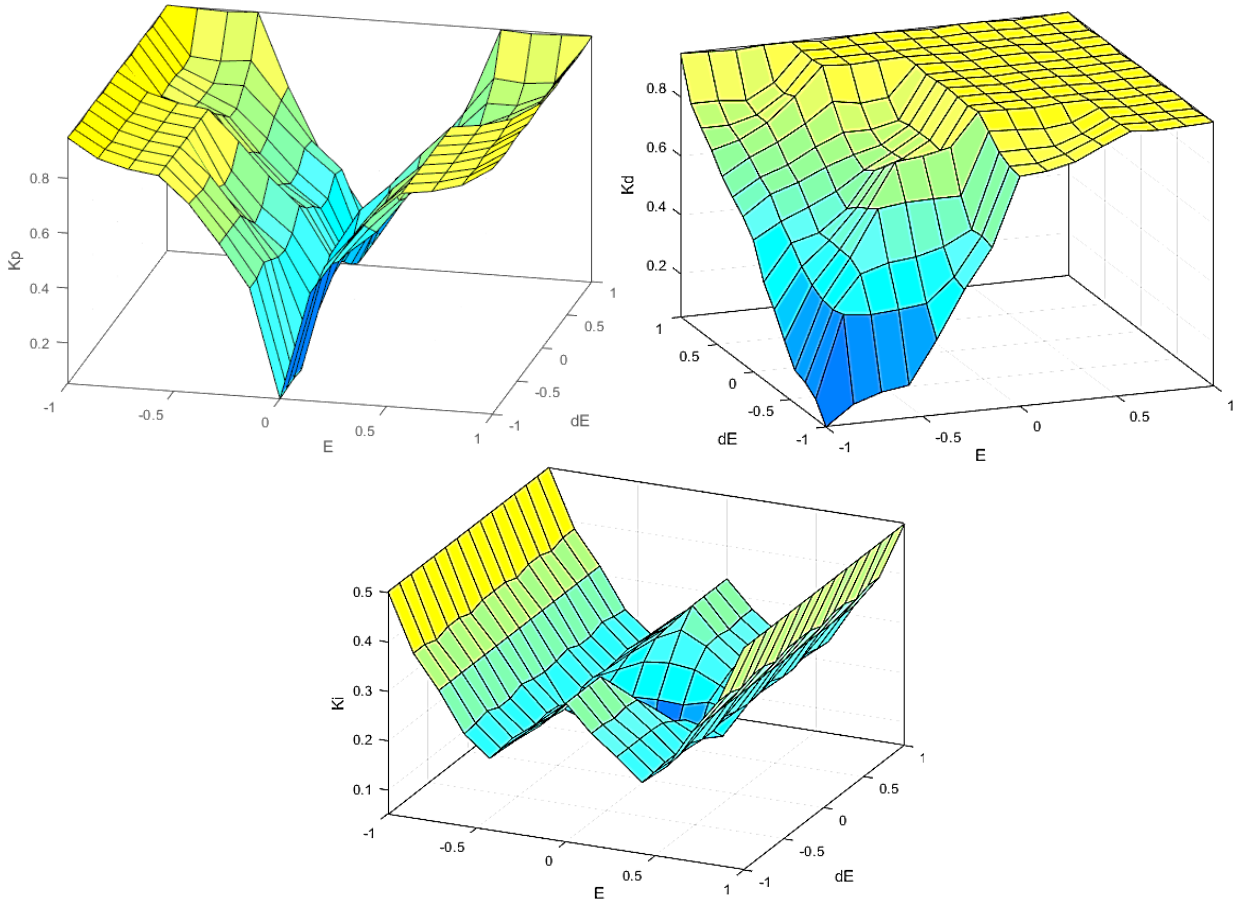


Рисунок 14.12 – Поверхні управління системою нечіткого висновку

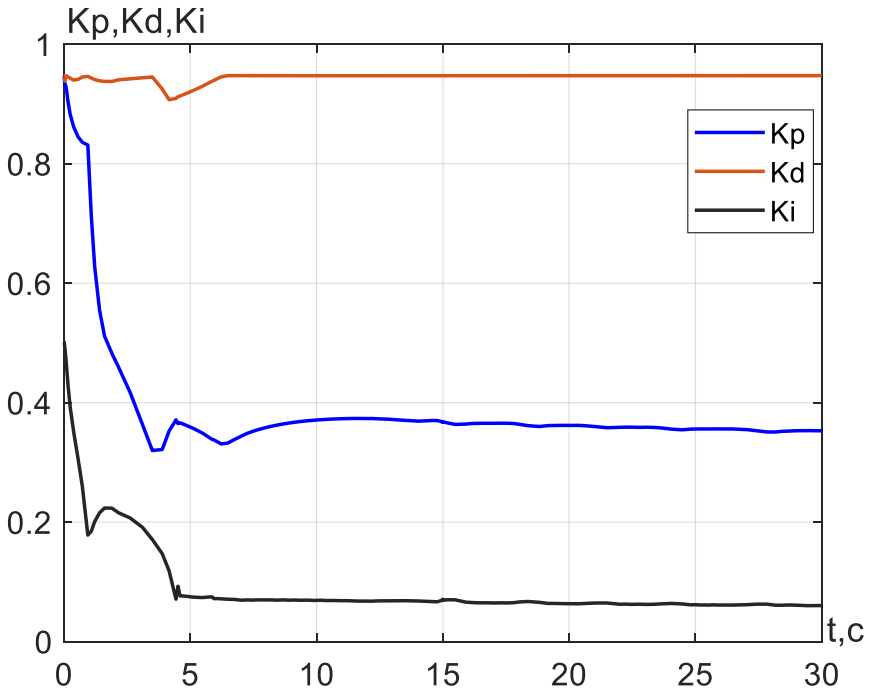


Рисунок 14.13 - Зміна коефіцієнтів ПІД-регулятора протягом перехідного процесу

На рис. 14.14 показаний перехідний процес у системі управління з нечітким супервізором.

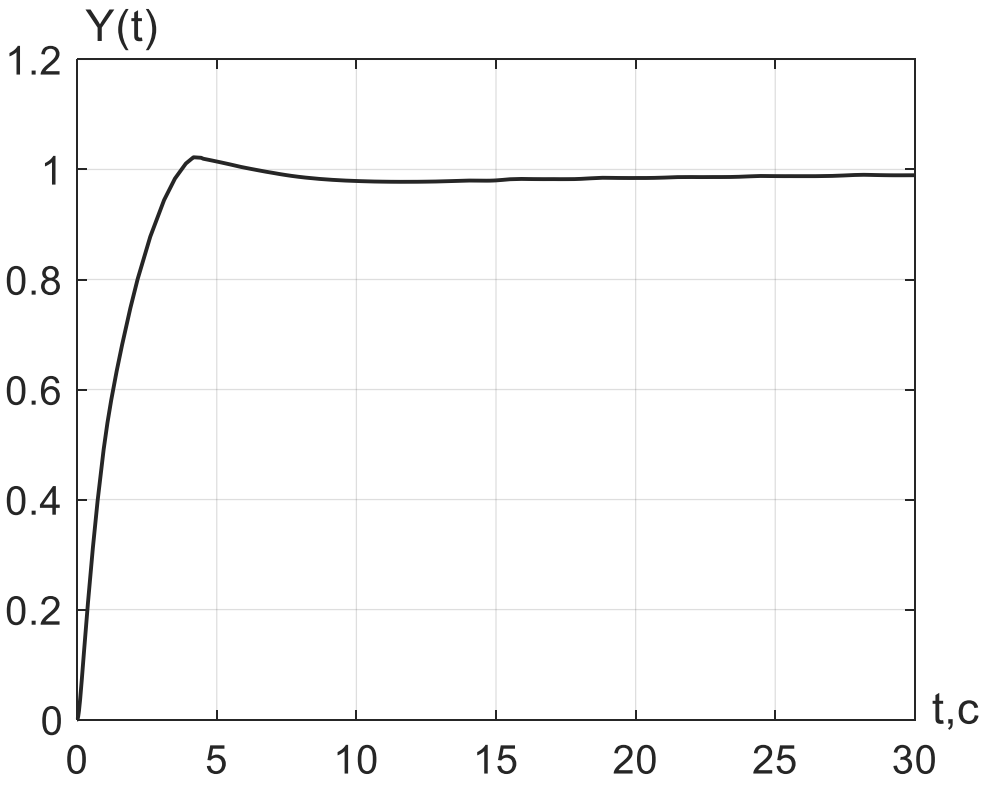


Рисунок 14.14 – Перехідний процес у системі управління з нечітким супервізором

14.3 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 14.5.

За вказаними у табл. 14.5 потрібно синтезувати нечіткий супервізор регулятора ПІД-типу.

Таблиця 14.5 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
1	$W(p)=\frac{1}{2p^2+p+1}$
2	$W(p)=\frac{1}{0.2p^2+0.1p+1}$
3	$W(p)=\frac{1}{2p^2+0.5p+1}$
4	$W(p)=\frac{1}{0.5p^2+0.25p+1}$
5	$W(p)=\frac{1}{0.8p^2+0.4p+1}$
6	$W(p)=\frac{1}{p^2+0.8p+1}$
7	$W(p)=\frac{7}{5p^2+2.5p+1}$
8	$W(p)=\frac{1}{2p^2+1.1p+1}$
9	$W(p)=\frac{1}{6.2p^2+3p+1}$
10	$W(p)=\frac{1}{2p^2+p+1}$
11	$W(p)=\frac{1}{3p^2+1.5p+1}$
12	$W(p)=\frac{1}{0.5p^2+0.25p+1}$
13	$W(p)=\frac{18}{8p^2+4p+1}$
14	$W(p)=\frac{1}{1.5p^2+0.8p+1}$
15	$W(p)=\frac{1}{5.6p^2+3p+1}$
16	$W(p)=\frac{1}{5.2p^2+2.1p+1}$

Продовження табл. 14.5

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
17	$W(p) = \frac{1}{2.7p^2 + 1.3p + 1}$
18	$W(p) = \frac{1}{0.2p^2 + 0.11p + 1}$
19	$W(p) = \frac{1}{2p^2 + 1.3p + 1}$
20	$W(p) = \frac{1}{7.2p^2 + 3.1p + 1}$

14.4 Контрольні питання

1. Що таке нечіткий супервізор?
2. На підставі яких міркувань відбувається синтез правил нечіткого супервізора?
3. Опишіть варіанти схем нечітких супервізорів.
4. Опишіть принципи опису дискретного НЛР ПД.
5. Опишіть принципи опису дискретного НЛР ПІ.

15 СУПЕРВІЗОРНЕ УПРАВЛІННЯ З ІНКРЕМЕНТАЛЬНОЮ ЗМІНОЮ КОЕФІЦІЄНТІВ РЕГУЛЯТОРА

Мета роботи: засвоєння методики синтезу супервізорного управління з інкрементальною зміною коефіцієнтів регулятора з використанням редактора системи нечіткого висновку

15.1 Основи супервізорного управління з інкрементальною зміною коефіцієнтів регулятора

Розглянемо другий варіант супервізорного управління, у якому відбувається інкрементальна зміна коефіцієнтів регулятора. Нехай розглядається ПД-регулятор, у якому нечіткий супервізор може зменшувати чи збільшувати коефіцієнти посилення залежно від характеру перехідного процесу (рис. 15.1).

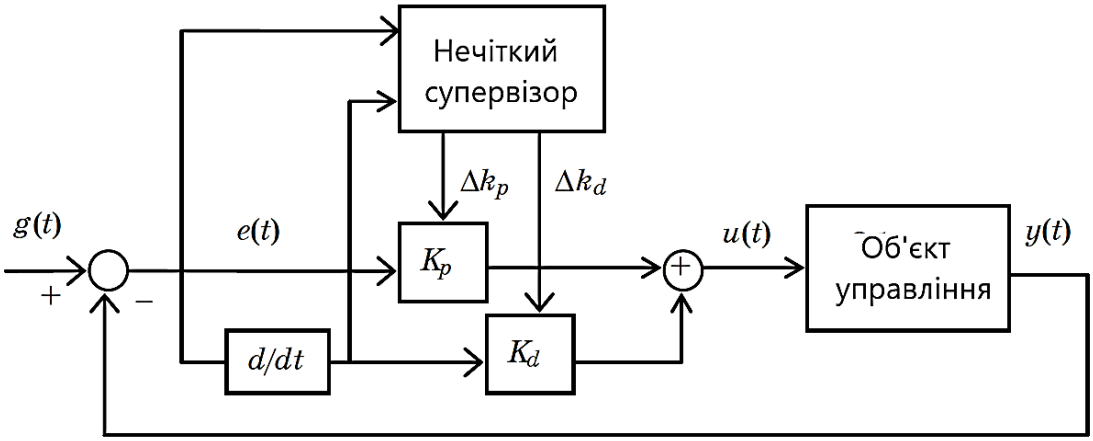


Рисунок 15.1 - Інкрементальний нечіткий супервізор

Таким чином, вихід ПД-регулятора описуватиметься формулою

$$u(t) = \left(k_p + \Delta k_p\right)e(t) + (k_d + \Delta k_d)de(t)/dt.$$

Нечітка система використовується для модифікації параметрів регулятора нижнього рівня (базового). Такий підхід може бути ефективним при керуванні нестаціонарним об'єктом, а також при неточно відомих параметрах об'єкта. Базовий регулятор може бути налаштований за стандартною методикою (наприклад, Зіглера – Ніколса), а нечіткий супервізор дозволяє варіювати коефіцієнти базового регулятора, покращуючи якість управління.

Основна ідея корекції коефіцієнтів ПД-регулятора у тому, щоб збільшувати k_p, коли керується помилка управління. Диференціальний коефіцієнт kd змінюється пропорційно k_p, тому підтримується співвідношення k_d/k_p, отримане при початковому налаштуванні

регулятора. Такий закон корекції забезпечується формулами:

$$\Delta k_p = y(t)k_p;$$

$$\Delta k_d = y(t)k_d.$$

де $y(t)$ - сигнал, що виробляється нечітким супервізором.

Закон роботи нечіткого супервізора відрізняється від таблиці логічних змінних звичайного НЛР, його можна обґрунтувати, розглядаючи типовий графік перехідного процесу (рис. 14.4), який на фазовій площині набуває наступного вигляду (рис. 15.2).

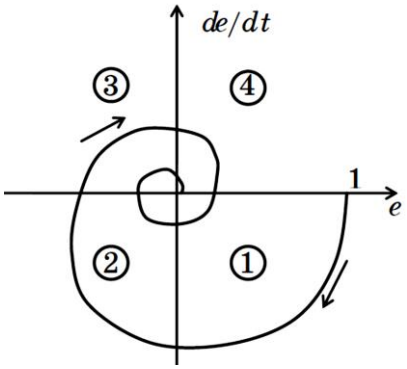


Рисунок 15.2 – Перехідний процес на фазовій площині

На початку перехідного процесу $e(t)$ велика позитивна та de/dt нульова. У регуляторі нижнього рівня використовуються номінальні параметри.

Потім $e(t)$ починає поступово зменшуватися, а de/dt зростає у негативному напрямку (зона 1). Вихід супервізора поступово збільшується від нуля до максимального значення, щоб зменшити час наростання.

У зоні 2 $e(t)$ негативна, і система повинна повільно рухатися вниз зменшення перерегулювання. Це досягається зменшенням контрольованого параметра, і вихід супервізора у цій галузі негативний.

Як тільки перерегулювання досягло пікового значення, знак de/dt стає позитивним (зона 3), і вихід супервізора повинен збільшувати своє значення, доки система не потрапить до регіону 4.

У зоні 4 $e(t)$ знову позитивна, і вихідний сигнал об'єкта наближається до стану, що встановився. Тут потрібно поступово зменшувати посилення, щоб обмежити перерегулювання.

Якщо $e(t)$ нульова, вихід супервізора протилежний за знаком значення de/dt.

Якщо de/dt нульова, то вихід супервізора збігається за знаком з $e(t)$, і має бути більшим у області малих $e(t)$ зменшення статичної помилки.

Зроблені зауваження дозволяють описати поведінку нечіткого

супервізора за допомогою таблиці лінгвістичних змінних, що показана на рис. 15.3.

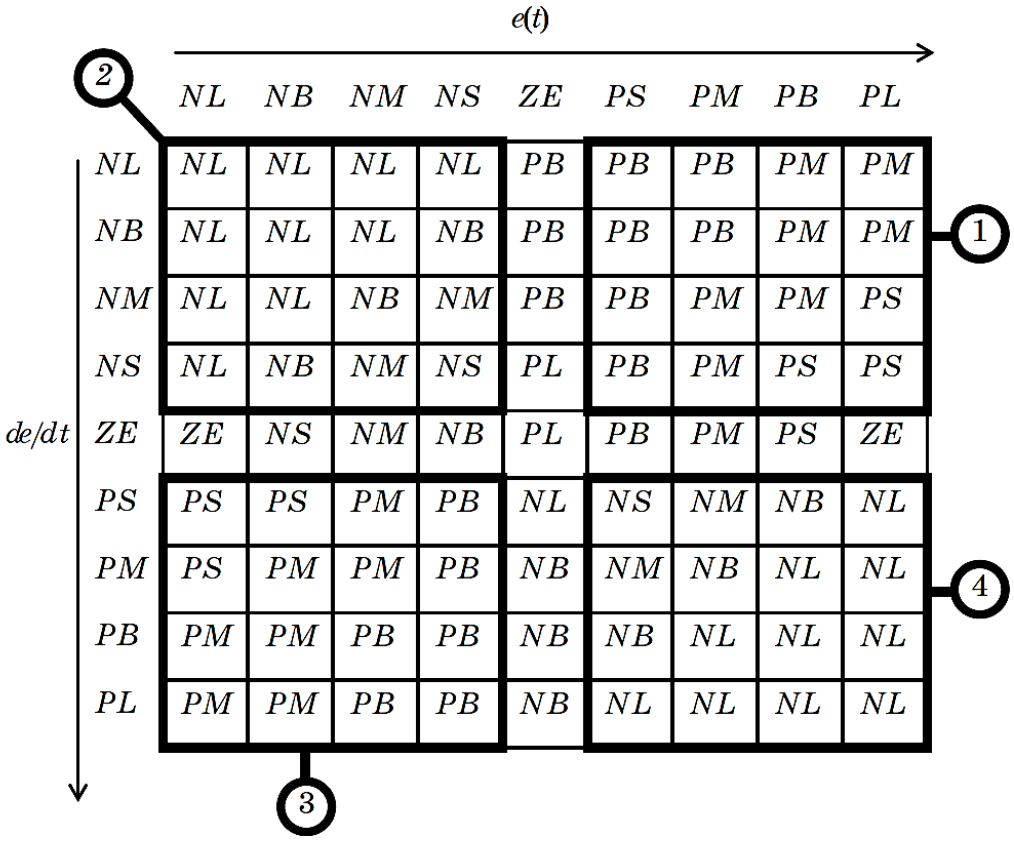


Рисунок 15.3 – Таблиця лінгвістичних правил нечіткого супервізора (цифрами позначені регіони фазової площини)

При опису передбачається використання одноманітного лінгвістичного опису нормалізованих *e*(*t*), *de*/*dt* та *y*(*t*) у вигляді, показаному на рис. 15.4, де використані такі скорочення: NL – negative large (негативне дуже велике), NB – negative big (негативне велике), NM – negative medium (негативне середнє), NS – negative small (негативне мале), ZE – zero (нульове) PS – positive small (позитивне мале), PM – positive medium (позитивне середнє), PB – positive big (позитивне велике), PL – positive large (позитивне дуже велике).

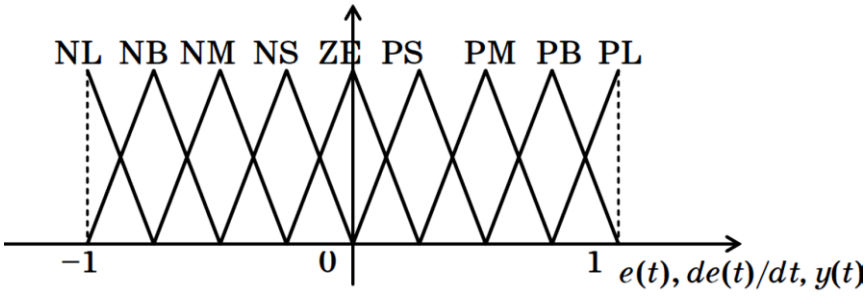


Рисунок 15.4 – Лінгвістичний опис помилки та її похідної

15.2 Приклад синтезу супервізорного управління з інкрементальною зміною коефіцієнтів регулятора

Розглянемо приклад використання нечіткого супервізора. Нехай є система управління з ПД-регулятором, коефіцієнти якого розраховані за методом Зіглера – Ніколса (див. рис. 15.5).

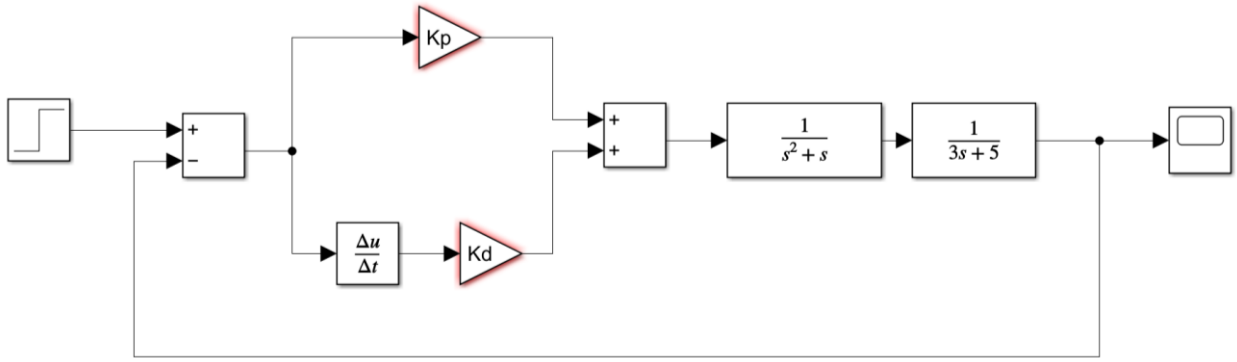


Рисунок 15.5 – Структурна схема математичної моделі системи управління з ПД-регулятором у MatLab Simulink

Налаштування регулятора методом Зіглера – Ніколса полягає в тому, щоб обчислити або підібрати оптимальні значення коефіцієнтів:

- K_P - коефіцієнт посилення пропорційної складової;
- K_I - коефіцієнт посилення інтегруючої складової;
- K_D - коефіцієнт посилення диференціюючої складової.

За великим рахунком, при використанні ПД, ПІ, ПІД-регулятора необхідно побудувати модель усієї системи в цілому та математично обчислити необхідні значення коефіцієнтів. У такому разі значення можна розрахувати точно.

Але на практиці математичний розрахунок коефіцієнтів - завдання далеко не тривіальне і вимагає глибоких знань теорії автоматичного управління, тому в більшості випадків використовуються інші, спрощені методи налаштування.

Метод полягає у послідовному виконанні наступних операцій:

- коефіцієнти регулятора дорівнюємо 0.
- встановлюємо певне цільове значення регульованого (вихідного) параметра.
- поступово починаємо збільшувати пропорційний коефіцієнт та стежимо за реакцією системи.
- за певного значення $K=K_P$ виникнуть незагасні коливання регульованої величини.
- фіксуємо це значення, а також період коливань системи.

У цьому практична частина методу закінчується. З отриманих значень розраховуємо коефіцієнти:

$$K_P = 0.6K;$$

$$K_I = \frac{2K_P}{T};$$

$$K_D = \frac{K_P T}{8}.$$

де *K* - коефіцієнт пропорційної складової, у якому виникли коливання, *T* – період цих коливань.

Налаштуємо коефіцієнти ПД регулятора методом Зиглера-Нікольса для даного випадку.

1. Задаємо на математичної моделі K_D =0, а коефіцієнт пропорційної складової регулятора збільшуємо до значення при якому у системі виникає коливальний перехідний процес з однаковим періодом коливань. У даному випадку такі коливання у системі управління настають при значенні $K=K_P=13$. (див. рис. 15.6).

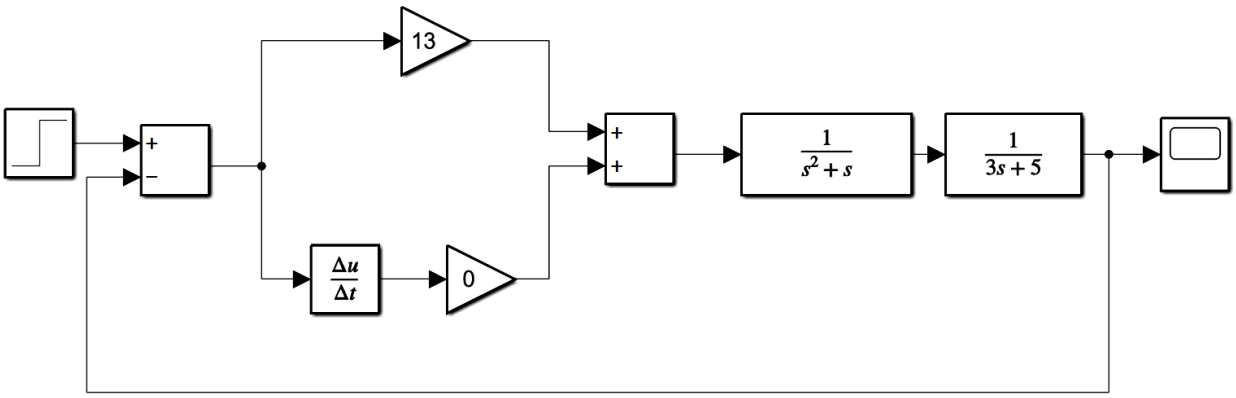


Рисунок 15.6 – Структурна схема налаштування регулятора математичної моделі системи управління у MatLab Simulink

2. На графіку перехідного процесу визначається період коливань *T*=4,9 с (див. рис. 15.7).

3. Розраховуємо коефіцієнти передачі ПД-регулятора

$$K_P = 0.6K = 0{,}6 \cdot 13 = 7{,}8;$$

$$K_D = \frac{K_P T}{8} = \frac{7{,}8 \cdot 4{,}9}{8} = 4{,}8.$$

Заносимо результати розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятору до математичної моделі системи (див. рис 15.8.)

Перехідний процес для системи управління наведеної *на рисунку 15.8 має вигляд який зображено на рис. 15.9.*

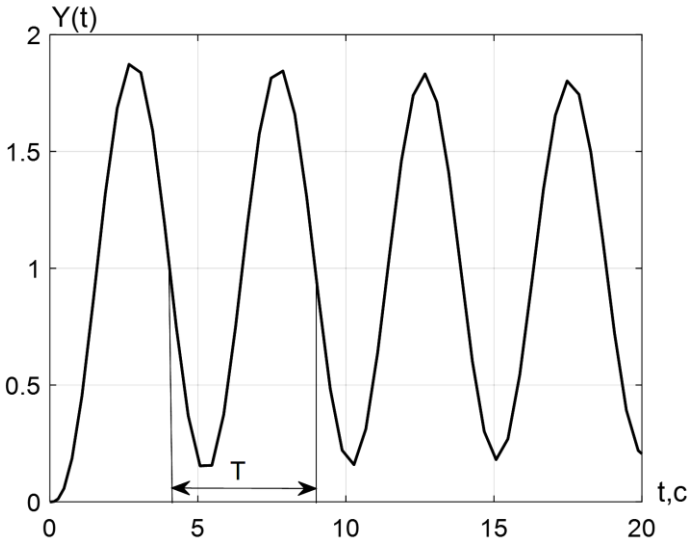


Рисунок 15.7 – Графік перехідного процесу системи управління при $K=K_P=13$

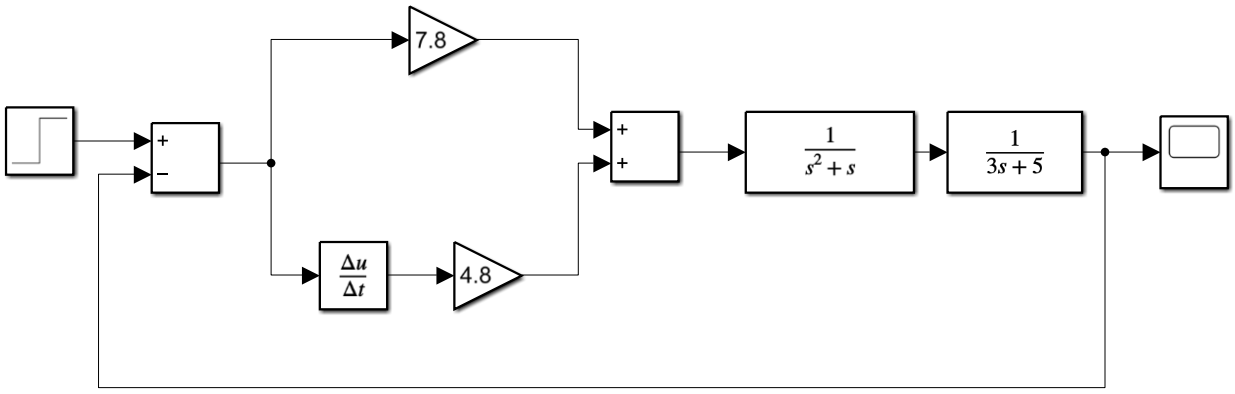


Рисунок 15.8 - Структурна схема математичної моделі системи управління з ПД-регулятором

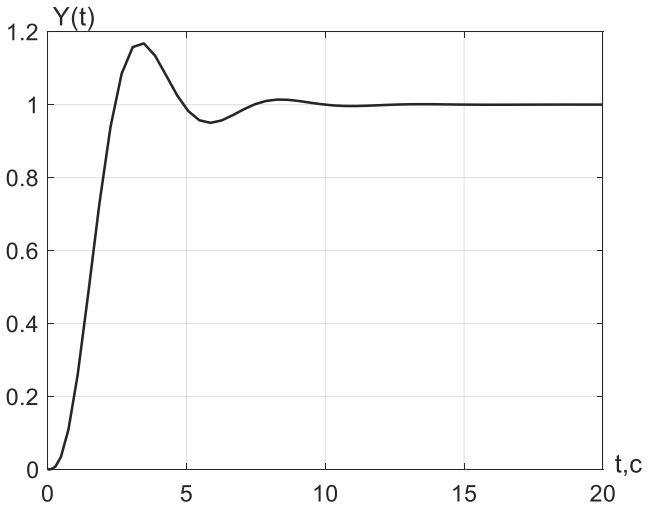


Рисунок 15.9 – Перехідний процес с системі управління з ПД-регулятором

Проведемо синтез ПД-регулятора з нечітким супервізором в якому відбувається інкрементальна зміна коефіцієнтів регулятора нечітким супервізором ПД регулятора. Сформуємо в Simulink MatLab модель системи управління (див. рис. 15.10).

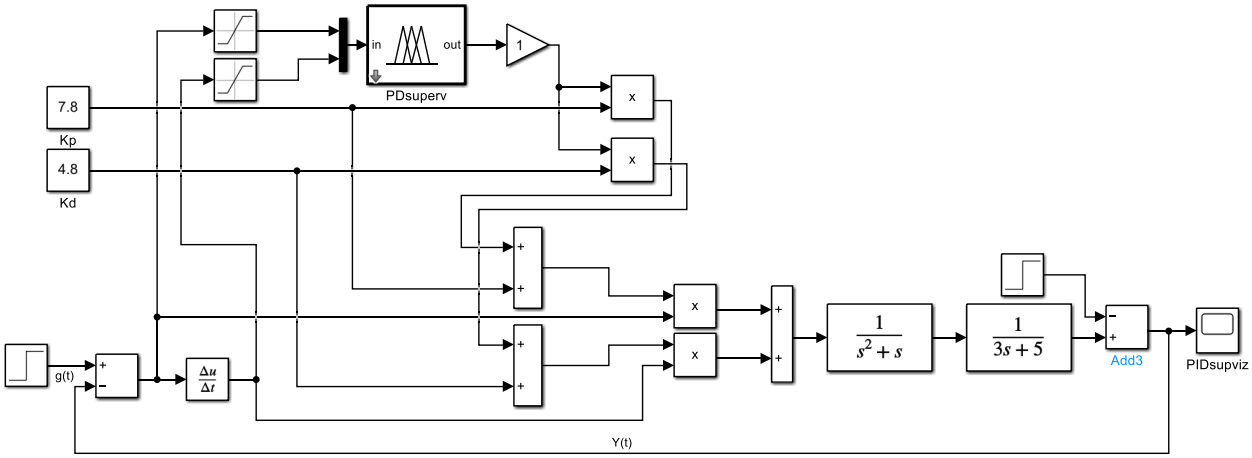


Рисунок 15.10 – Структурна схема математичної моделі системи управління з нечітким супервізором інкрементального типу

Fuzzy Logic Controller надаємо Fis name: PDsupv2 (ім'я може буди будь-яке).

Викликається редактор системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 15.11).

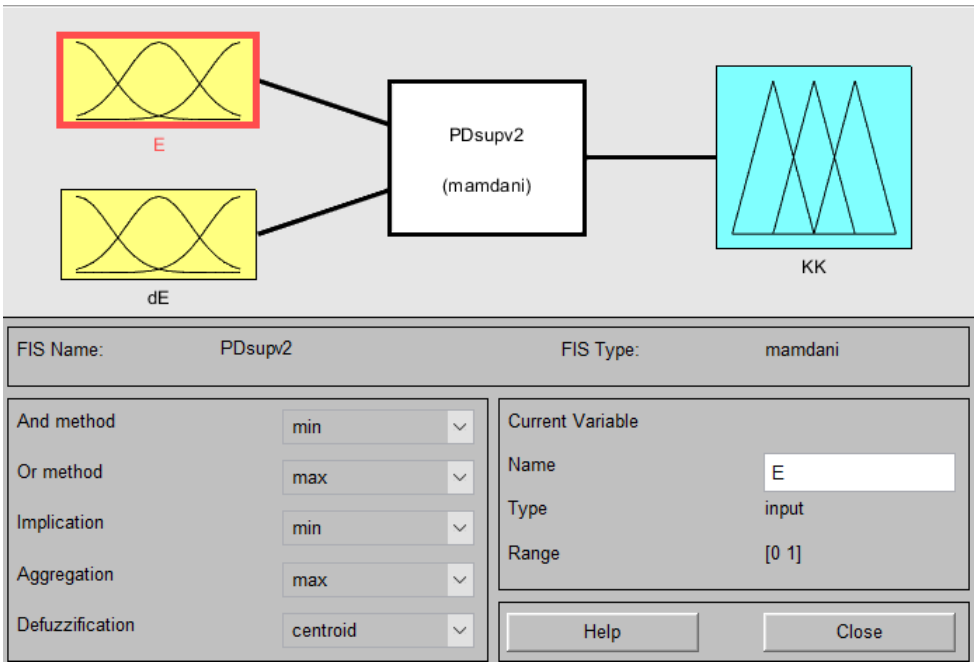


Рисунок 15.11 – Налаштування інтерфейсу FIS editor

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

У меню *Edit* послідовно додаємо 2 вхідні змінні з розміром базової шкали (Range= [-1 1]) та вихідну змінну з розміром базової шкали (*Range*= [0 1]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної трикутну функцію приналежності.

Нехай терми лінгвістичної змінної «Помилка управління» розміщуються відповідно до рис. 15.12 з 9 параметрами функцій приналежності:

Name = "NLe"; Type = "trimf"; Param = [-1.125 -1 -0.75];
Name = "NBe"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.75 -0.5];
Name = "NMe"; Type = "trimf"; Param = [-0.75 -0.5 -0.25];
Name = "NSe"; Type = "trimf"; Param = [-0.5 -0.25 0];
Name = "Ze"; Type = " trimf"; Param = [-0.25 0 0.25];
Name = "PSe"; Type = "trimf"; Param = [0 0.25 0.5].
Name = "PMe"; Type = "trimf"; Param = [0.25 0.5 0.75].
Name = "PBe"; Type = "trimf"; Param = [0.5 0.75 1].
Name = "PLe"; Type = "trimf"; Param = [0.75 1 1.25].

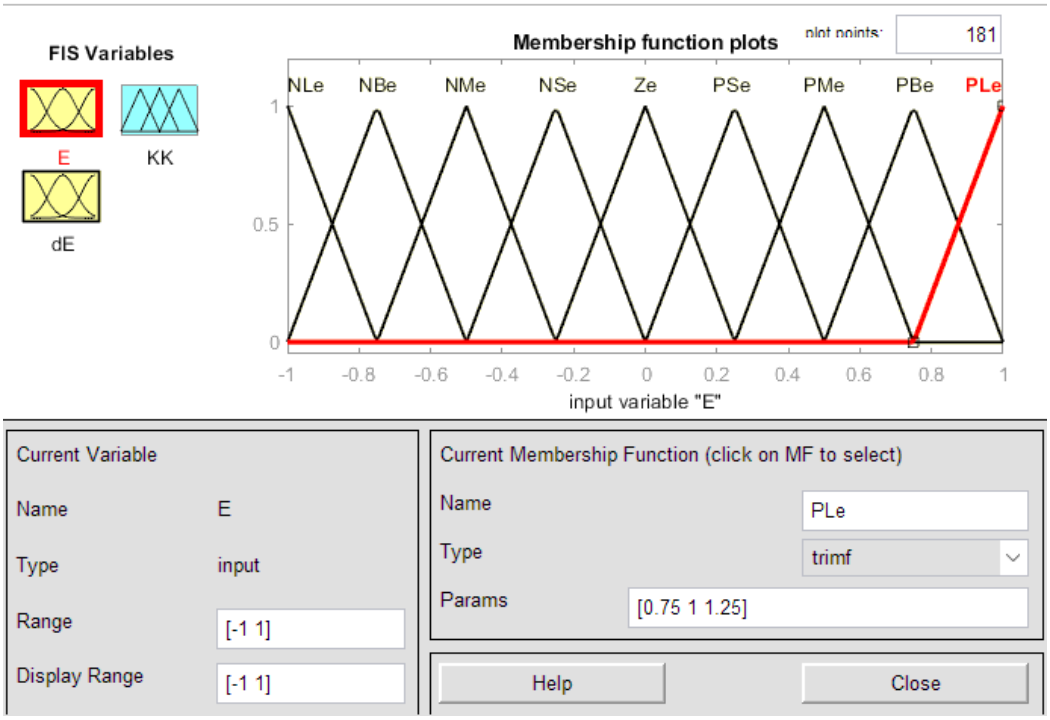


Рисунок 15.12 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління»

Терми вхідної лінгвістичної змінної «Похідна помилки управління» формуємо рівномірно. Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

Name = "NLdE"; Type = "trimf"; Param = [-1.125 -1 -0.75];
Name = "NBdE"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.75 -0.5];
Name = "NMdE"; Type = "trimf"; Param = [-0.75 -0.5 -0.25];
Name = "NSdE"; Type = "trimf"; Param = [-0.5 -0.25 0];
Name = "ZdE"; Type = " trimf"; Param = [-0.25 0 0.25];
Name = "PSdE"; Type = "trimf"; Param = [0 0.25 0.5].
Name = "PMdE"; Type = "trimf"; Param = [0.25 0.5 0.75].
Name = "PBdE"; Type = "trimf"; Param = [0.5 0.75 1].
Name = "PLdE"; Type = "trimf"; Param = [0.75 1 1.25].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління» на рис. 15.13.

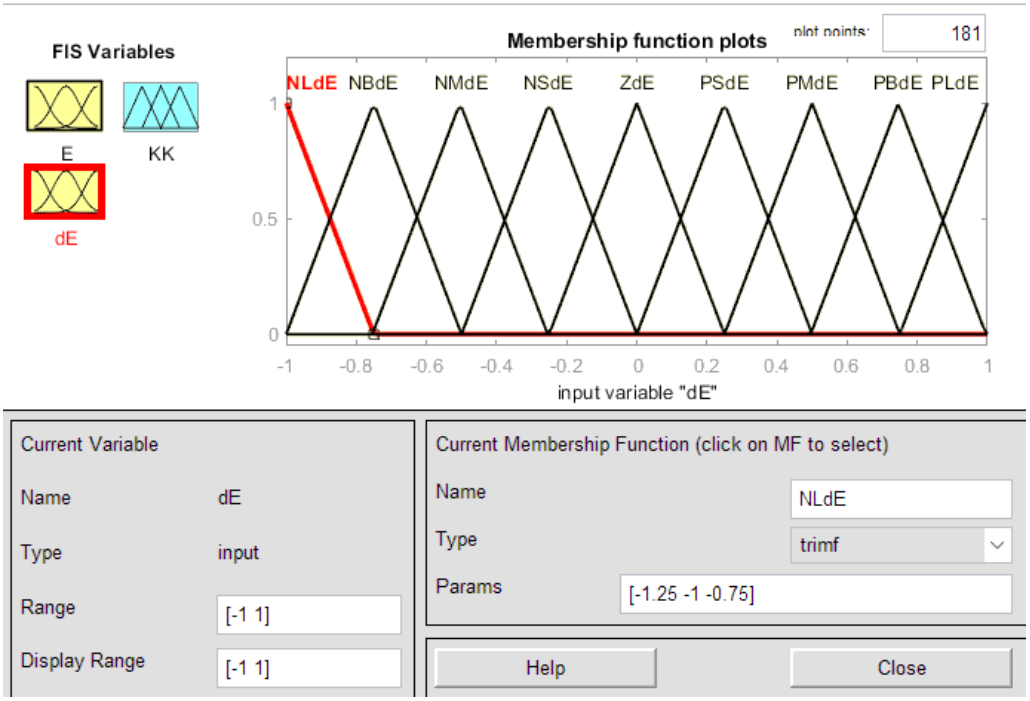


Рисунок 15.13 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління»

Для опису вихідної логічної змінної у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності.
Name = "NL"; Type = "trimf"; Param = [-1.125 -1 -0.75];
Name = "NB"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.75 -0.5];
Name = "NM"; Type = "trimf"; Param = [-0.75 -0.5 -0.25];

Name = "NS"; Type = "trimf"; Param = [-0.5 -0.25 0];
Name = "Z"; Type = " trimf"; Param = [-0.25 0 0.25];
Name = "PS"; Type = "trimf"; Param = [0 0.25 0.5].
Name = "PM"; Type = "trimf"; Param = [0.25 0.5 0.75].
Name = "PB"; Type = "trimf"; Param = [0.5 0.75 1].
Name = "PL"; Type = "trimf"; Param = [0.75 1 1.25].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 15.14.

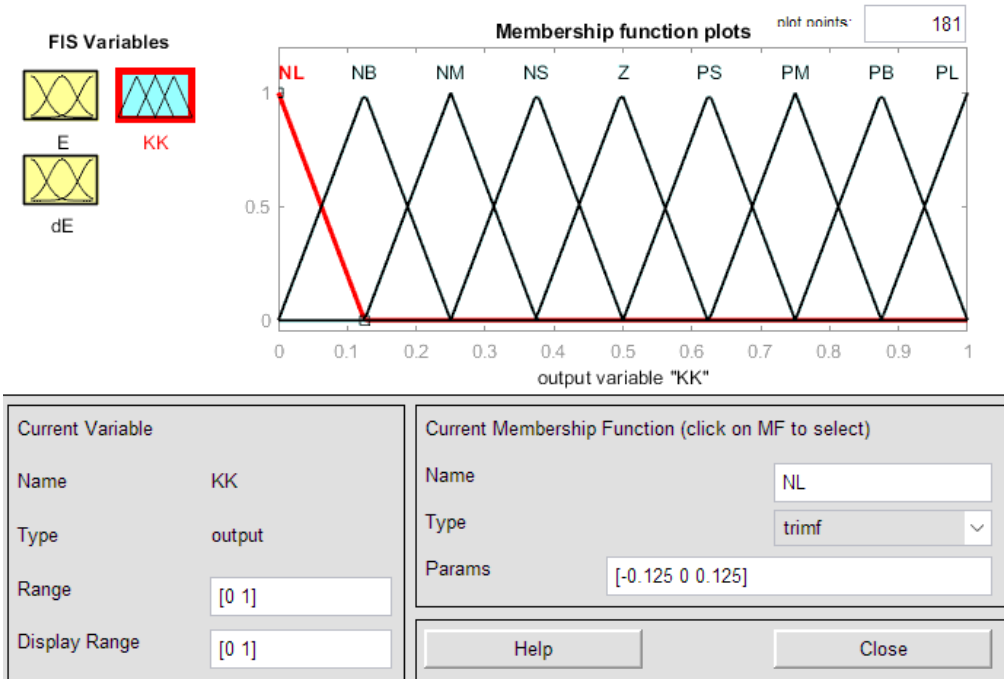


Рисунок 15.14 – Результат налаштування функцій приналежності вихідної змінної

Після опису вхідні та вихідні лінгвістичних змінних, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку 25. Управляючі правила сформульовано згідно з рис. 15.3:

1. if (E is NLe) and (dE is NLdE) then (KK is NL) (1)
2. if (E is NLe) and (dE is NBdE) then (KK is NL) (1)
3. if (E is NLe) and (dE is NMdE) then (KK is NL) (1)
4. if (E is NLe) and (dE is NSdE) then (KK is NL) (1)
5. if (E is NLe) and (dE is ZdE) then (KK is PB) (1)
6. if (E is NLe) and (dE is PSdE) then (KK is PB) (1)
7. if (E is NLe) and (dE is PMdE) then (KK is PB) (1)
8. if (E is NLe) and (dE is PBdE) then (KK is PM) (1)
9. if (E is NLe) and (dE is PLE) then (KK is PM) (1)
10. if (E is NBe) and (dE is NLdE) then (KK is NL) (1)
11. if (E is NBe) and (dE is NBdE) then (KK is NL) (1)
12. if (E is NBe) and (dE is NMdE) then (KK is NL) (1)

13. if (E is NBe) and (dE is NSdE) then (KK is NB) (1)
14. if (E is NBe) and (dE is ZdE) then (KK is PB) (1)
15. if (E is NBe) and (dE is PSdE) then (KK is PB) (1)
16. if (E is NBe) and (dE is PMdE) then (KK is PB) (1)
17. if (E is NBe) and (dE is PBdE) then (KK is PM) (1)
18. if (E is NBe) and (dE is PLE) then (KK is PM) (1)
19. if (E is NMe) and (dE is NLdE) then (KK is NL) (1)
20. if (E is NMe) and (dE is NBdE) then (KK is NL) (1)
21. if (E is NMe) and (dE is NMdE) then (KK is NB) (1)
22. if (E is NMe) and (dE is NSdE) then (KK is NM) (1)
23. if (E is NMe) and (dE is ZdE) then (KK is PB) (1)
24. if (E is NMe) and (dE is PSdE) then (KK is PB) (1)
25. if (E is NMe) and (dE is PMdE) then (KK is PM) (1)
26. if (E is NMe) and (dE is PBdE) then (KK is PM) (1)
27. if (E is NMe) and (dE is PLE) then (KK is PS) (1)
28. if (E is NSe) and (dE is NLdE) then (KK is NL) (1)
29. if (E is NSe) and (dE is NBdE) then (KK is NB) (1)
30. if (E is NSe) and (dE is NMdE) then (KK is NM) (1)
31. if (E is NSe) and (dE is NSdE) then (KK is NS) (1)
32. if (E is NSe) and (dE is ZdE) then (KK is PL) (1)
33. if (E is NSe) and (dE is PSdE) then (KK is PB) (1)
34. if (E is NSe) and (dE is PMdE) then (KK is PM) (1)
35. if (E is NSe) and (dE is PBdE) then (KK is PS) (1)
36. if (E is NSe) and (dE is PLE) then (KK is PS) (1)
37. if (E is Ze) and (dE is NLdE) then (KK is Z) (1)
38. if (E is Ze) and (dE is NBdE) then (KK is NS) (1)
39. if (E is Ze) and (dE is NMdE) then (KK is NM) (1)
40. if (E is Ze) and (dE is NSdE) then (KK is NB) (1)
41. if (E is Ze) and (dE is ZdE) then (KK is PL) (1)
42. if (E is Ze) and (dE is PSdE) then (KK is PB) (1)
43. if (E is Ze) and (dE is PMdE) then (KK is PM) (1)
44. if (E is Ze) and (dE is PBdE) then (KK is PS) (1)
45. if (E is Ze) and (dE is PLE) then (KK is Z) (1)
46. if (E is PSe) and (dE is NLdE) then (KK is PS) (1)
47. if (E is PSe) and (dE is NBdE) then (KK is PS) (1)
48. if (E is PSe) and (dE is NMdE) then (KK is PM) (1)
49. if (E is PSe) and (dE is NSdE) then (KK is PB) (1)
50. if (E is PSe) and (dE is ZdE) then (KK is NL) (1)
51. if (E is PSe) and (dE is PSdE) then (KK is NS) (1)
52. if (E is PSe) and (dE is PMdE) then (KK is NM) (1)
53. if (E is PSe) and (dE is PBdE) then (KK is NB) (1)
54. if (E is PSe) and (dE is PLE) then (KK is NL) (1)
55. if (E is PMe) and (dE is NLdE) then (KK is PS) (1)
56. if (E is PMe) and (dE is NBdE) then (KK is PM) (1)
57. if (E is PMe) and (dE is NMdE) then (KK is PM) (1)

58. if (E is PMe) and (dE is NSdE) then (KK is PB) (1)
59. if (E is PMe) and (dE is ZdE) then (KK is NB) (1)
60. if (E is PMe) and (dE is PSdE) then (KK is NM) (1)
61. if (E is PMe) and (dE is PMdE) then (KK is NB) (1)
62. if (E is PMe) and (dE is PBdE) then (KK is NL) (1)
63. if (E is PMe) and (dE is PLE) then (KK is NL) (1)
64. if (E is PBe) and (dE is NLdE) then (KK is PM) (1)
65. if (E is PBe) and (dE is NBdE) then (KK is PM) (1)
66. if (E is PBe) and (dE is NMdE) then (KK is PB) (1)
67. if (E is PBe) and (dE is NSdE) then (KK is PB) (1)
68. if (E is PBe) and (dE is ZdE) then (KK is NB) (1)
69. if (E is PBe) and (dE is PSdE) then (KK is NB) (1)
70. if (E is PBe) and (dE is PMdE) then (KK is NL) (1)
71. if (E is PBe) and (dE is PBdE) then (KK is NL) (1)
72. if (E is PBe) and (dE is PLE) then (KK is NL) (1)
73. if (E is PLe) and (dE is NLdE) then (KK is PM) (1)
74. if (E is PLe) and (dE is NBdE) then (KK is PM) (1)
75. if (E is PLe) and (dE is NMdE) then (KK is PB) (1)
76. if (E is PLe) and (dE is NSdE) then (KK is PB) (1)
77. if (E is PLe) and (dE is ZdE) then (KK is NB) (1)
78. if (E is PLe) and (dE is PSdE) then (KK is NL) (1)
79. if (E is PLe) and (dE is PMdE) then (KK is NL) (1)
80. if (E is PLe) and (dE is PBdE) then (KK is NL) (1)
81. if (E is PLe) and (dE is PLE) then (KK is NL) (1)

Налаштовування управляючих правил для даного випадку наведено на рисунку (див. рис. 15.15).

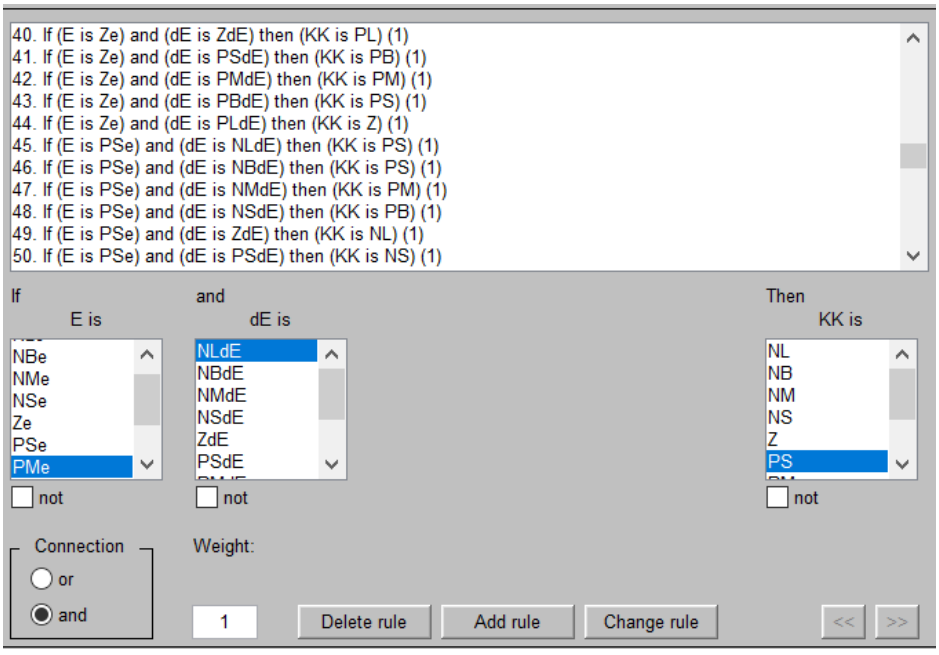


Рисунок 15.15 - Налаштовування опису правил функціонування нечіткого інкрементального супервізору НЛР_ПД

Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1). Після опису правил можливо за допомогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого висновку за різних вхідних даних (див. рис. 11.152).

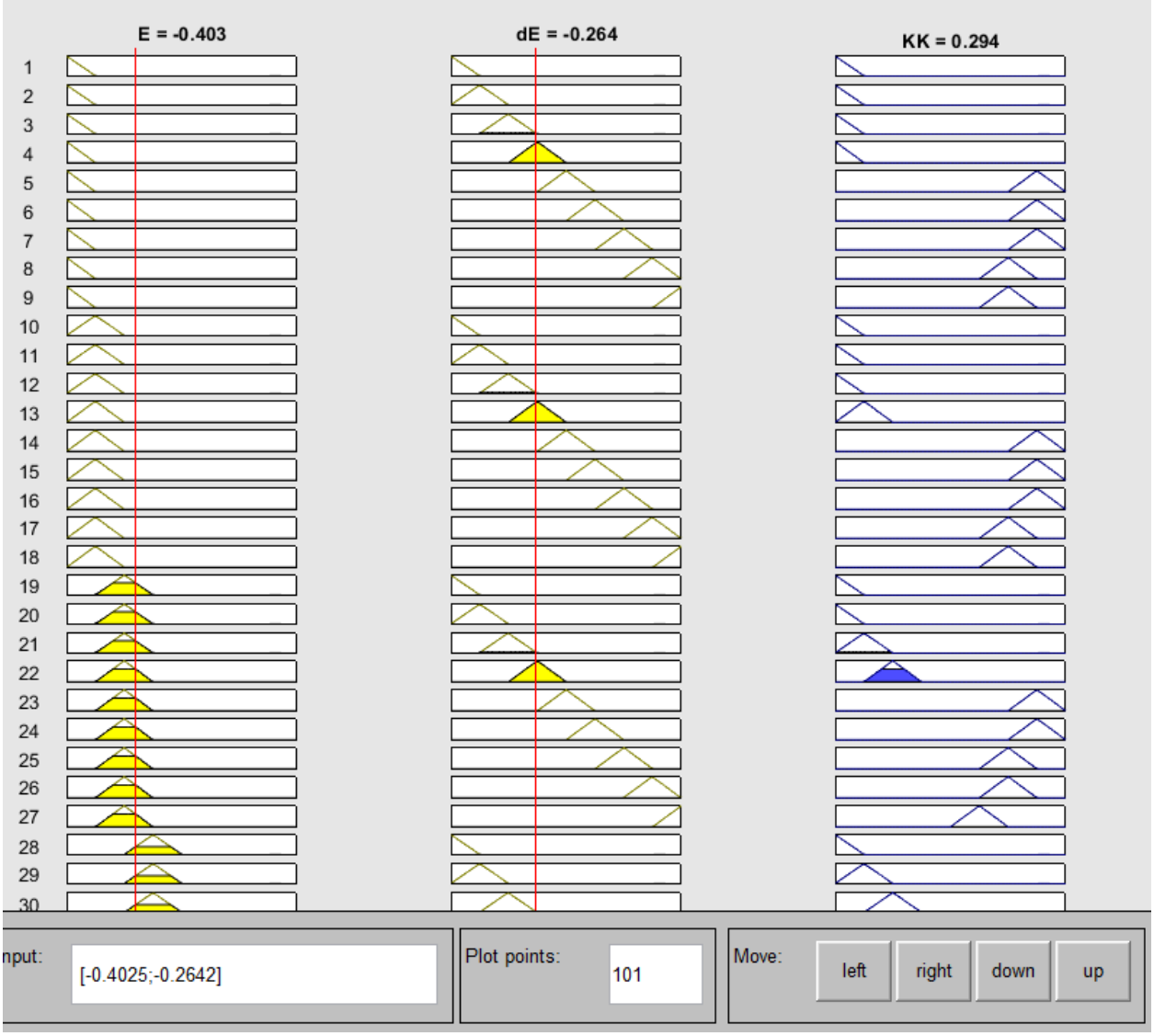


Рисунок 15.16 - Робота системи нечіткого інкрементального супервізору НЛР_ПД

− інтерфейсу Surface Viewer можливо переглянути графічне подання закону управління (рис. 15.17).

Після процедур налаштування нечіткого інкрементального супервізору НЛР_ПД у редакторі системи нечіткого висновку здійснює запис результатів налаштування у Fuzzy Logic Controller. Для цього у вкладці File здійснюємо Export в математичну модуль нечіткого контролера From Workspase вказавши ім’я Fuzzy Logic Controller.

На рис. 15.18 представлені графіки перехідного процесу у системі управління з нечітким інкрементальним супервізором НЛР_ПД. На

математичної моделі (див. рис. 15.10) у момент часу 15 с додано збурення. Як видно з графіку перехідного процесу, що спроектована система управління повністю компенсує збурюючи впливи.

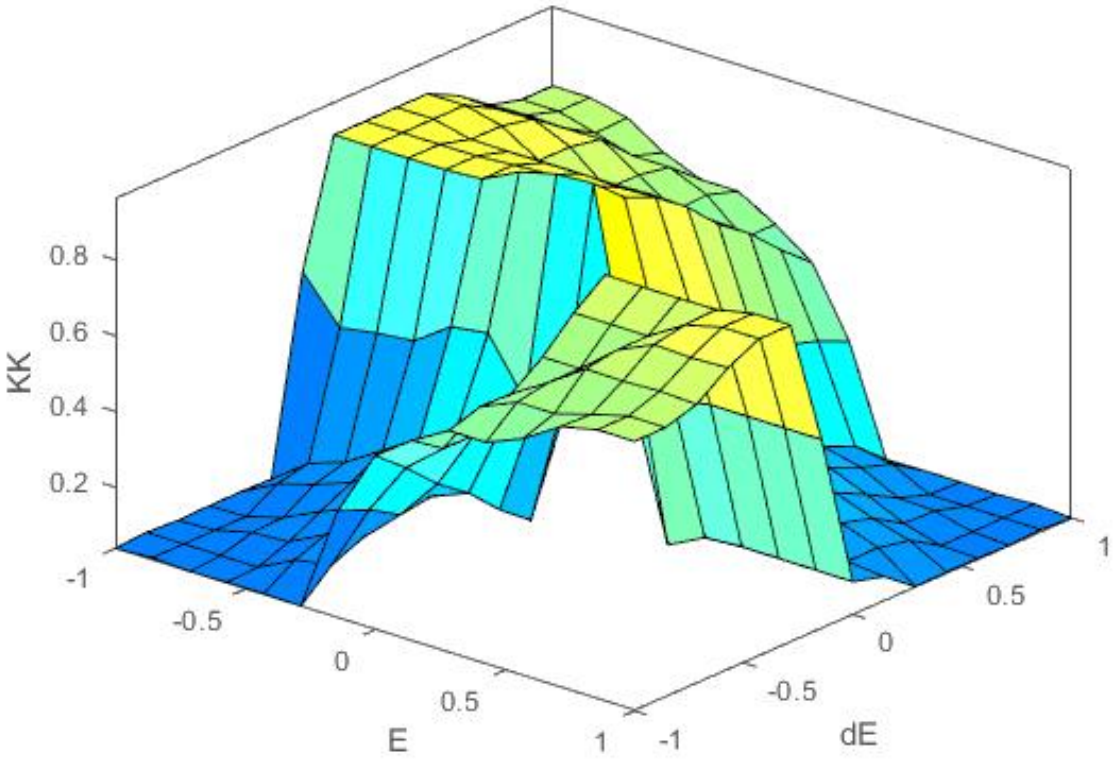


Рисунок 15.17 - Графічне подання закону управління

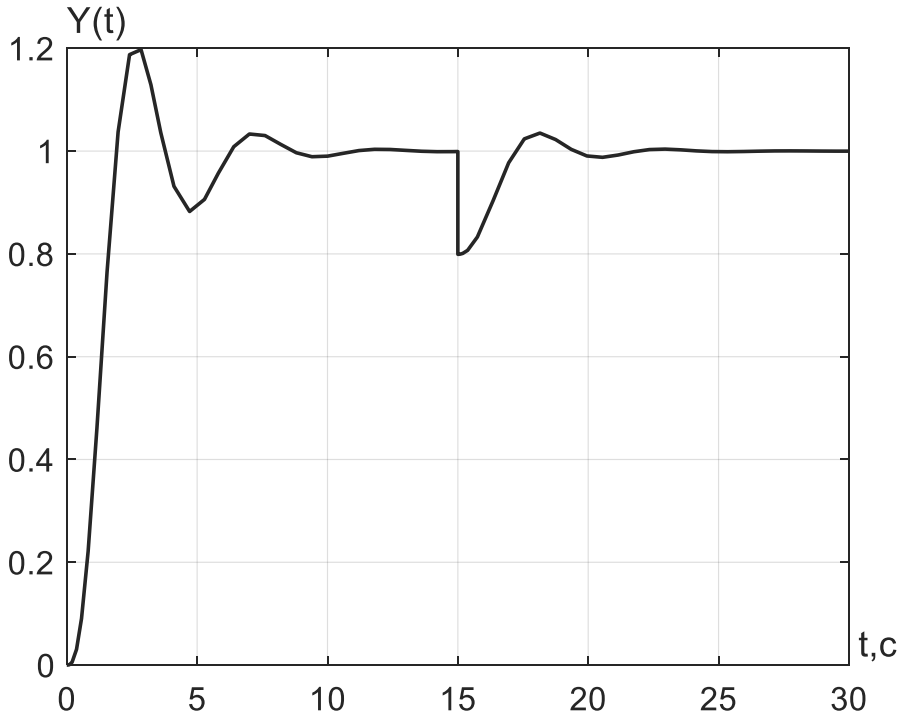


Рисунок 15.18 – Графік перехідного процесу у системі управління з нечітким інкрементальним супервізором ПД-типу

15.3 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 15.5.

За вказаними у табл. 15.5 потрібно синтезувати нечіткий інкрементальний супервізор регулятора ПД-типу.

Таблиця 15.5 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
1	$W_1(p)=\frac{1}{2p^2+p};\ W_2(p)=\frac{1}{3p+1}$
2	$W_1(p)=\frac{1}{p^2+p};\ W_2(p)=\frac{1}{3p+1}$
3	$W_1(p)=\frac{1}{3p^2+p};\ W_2(p)=\frac{1}{p+1}$
4	$W_1(p)=\frac{1}{2{,}5p^2+p};\ W_2(p)=\frac{1}{1{,}5p+1}$
5	$W_1(p)=\frac{1}{3p^2+p};\ W_2(p)=\frac{1}{2p+1}$
6	$W_1(p)=\frac{1}{4p^2+p};\ W_2(p)=\frac{1}{3p+1}$
7	$W_1(p)=\frac{1}{2p^2+0{,}2p};\ W_2(p)=\frac{1}{3p+1}$
8	$W_1(p)=\frac{1}{4p^2+0{,}4p};\ W_2(p)=\frac{1}{3p+1}$
9	$W_1(p)=\frac{1}{2p^2+0{,}1p};\ W_2(p)=\frac{1}{2p+1}$
10	$W_1(p)=\frac{1}{5p^2+0{,}5p};\ W_2(p)=\frac{1}{p+1}$
11	$W_1(p)=\frac{1}{0{,}2p^2+0{,}01p};\ W_2(p)=\frac{1}{2p+1}$
12	$W_1(p)=\frac{1}{3{,}5p^2+0{,}35p};\ W_2(p)=\frac{1}{p+1}$
13	$W_1(p)=\frac{1}{2{,}2p^2+0{,}02p};\ W_2(p)=\frac{1}{0{,}1p+1}$
14	$W_1(p)=\frac{1}{2{,}5p^2+0{,}25p};\ W_2(p)=\frac{1}{4p+1}$
15	$W_1(p)=\frac{1}{4p^2+p};\ W_2(p)=\frac{1}{2{,}5p+1}$
16	$W_1(p)=\frac{1}{1{,}6p^2+0{,}36p};\ W_2(p)=\frac{1}{p+1}$

Продовження табл. 15.5

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
17	$W_1(p) = \frac{1}{4{,}4p^2 + 0{,}44p};\ W_2(p) = \frac{1}{2{,}2p + 1}$
18	$W_1(p) = \frac{1}{1{,}5p^2 + 0{,}125p};\ W_2(p) = \frac{1}{2p + 1}$
19	$W_1(p) = \frac{1}{3{,}2p^2 + 0{,}2p};\ W_2(p) = \frac{1}{p + 1}$
20	$W_1(p) = \frac{1}{5p^2 + 0{,}25p};\ W_2(p) = \frac{1}{0{,}2p + 1}$

15.4 Контрольні питання

1. Що таке нечіткий супервізор?
2. На підставі яких міркувань відбувається синтез правил нечіткого супервізора?
3. Опишіть варіанти схем нечітких супервізорів.
4. Опишіть принципи опису дискретного НЛР ПД.
5. Опишіть принципи опису дискретного НЛР ПІ.

16 СУПЕРВІЗОРНЕ УПРАВЛІННЯ З КОРЕКЦІЄЮ КОЕФІЦІЄНТІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НА ПІДСТАВІ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ПОМИЛКУ ТА ЇЇ ПОХІДНУ

Мета роботи: засвоєння методики синтезу супервізорного управління з корекцією коефіцієнтів ПІД-регулятора на підставі інформації про помилку та її похідну з використанням редактора системи нечіткого висновку

16.1 Основи організації нечіткого супервізора з корекцією коефіцієнтів ПІД-регулятора на підставі інформації про помилку та її похідну

Припустимо, що відомі діапазони, в яких можуть змінюватися коефіцієнти K_p та K_d:

$$K_p \in \left[K_{p.min}, K_{p.max}\right],$$

$$K_d \in [K_{d.min}, K_{d.max}]$$

При виборі діапазону зміни коефіцієнтів можна керуватися такими формулами

$$K_{p.min} = 0.32K_u;\ \ K_{p.max} = 0.6K_u$$
$$K_{d.min} = 0.08K_uT_u;\ \ K_{d.max} = 0.15K_uT_u$$

де K_u – мінімальне значення коефіцієнта посилення П–регулятора, у якому виникають автоколивання з періодом T_u.

Вважатимемо, що значення коефіцієнтів нормалізовані:

$$K_p^{/} = \frac{K_p - K_{p.min}}{K_{p.max} - K_{p.min}};\ \ K_d^{/} = \frac{K_d - K_{d.min}}{K_{d.max} - K_{d.min}}$$

відкіля

$$K_p = \left(K_{p.max} - K_{p.min}\right)K_p^{/} + K_{p.min};$$

$$K_d = (K_{d.max} - K_{d.min})K_d^{/} + K_{d.min}.$$

Згідно з методикою Зіглера - Ніколса, постійна часу інтегрування залежить від постійного часу диференціювання:

$$T_i = \alpha T_d,$$

таким чином

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} = \frac{(K_p)^2}{\alpha K_d}$$

Супервізор містить безліч правил виду:

Якщо ($e(t) = A_i$) та ($de(t)/dt = B_i$), то ($K'_p = C_i$) і ($K'_d = D_i$) та $\alpha = \alpha_i$.;
$i = 1, 2, \ldots m$,

де A_i, B_i, C_i і D_i – нечіткі множини, α_i – константа.

Лінгвістичне опис $e(t)$ та $de(t)/dt$ показано на рис. 16.1.

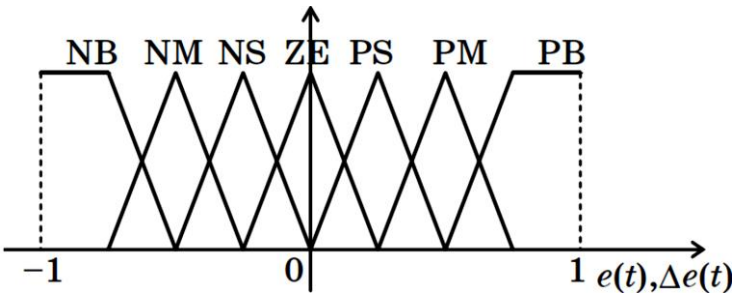


Рисунок 16.1 – Лінгвістичний опис помилки та її прирощення

Лінгвістичний опис K'_p та K'_d показано на рис. 16.2, де використано лише два терми: *Big* та *Small* («велике» і «мале»), для їх опису можуть бути використані дзвонові функції приналежності.

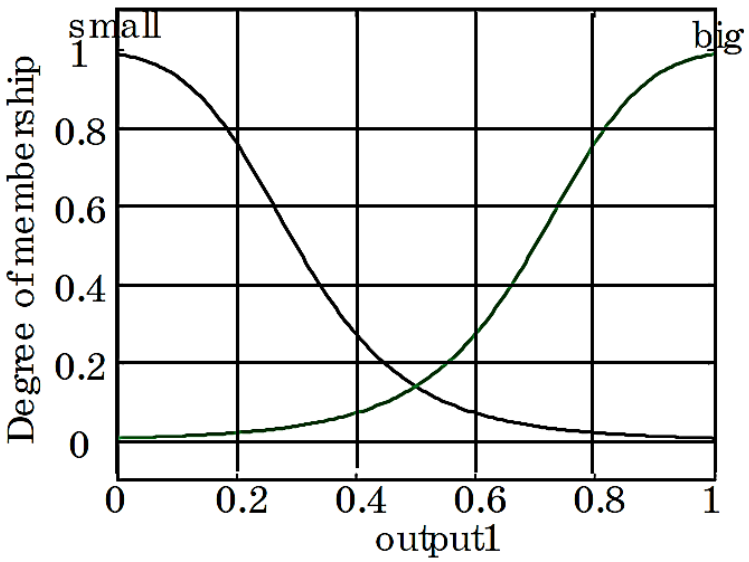


Рисунок 16.2 - Лінгвістичний опис K'p та K'd

Для опису правил зміни коефіцієнтів розглянемо характерні точки типового перехідного процесу (рис. 16.3).

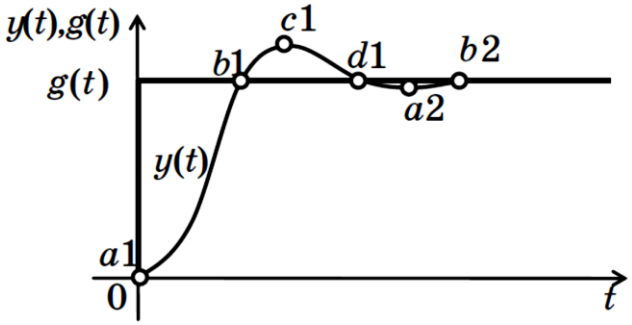


Рисунок 16.3 – Бажаний перехідний процес

На початку перехідного процесу (точка a_1) потрібно велике значення сигналу керування для отримання малого часу наростання. Тому ПІД-регулятор повинен мати велике значення K_p та K_i, а значення K_d має бути малим, тобто K'_p повинен мати значення *Big*, а K'_d – *Small*. Для забезпечення великого значення K_i (порівняно з вихідним значенням, отриманим за методом Зіглера – Ніколса) треба, щоб значення α було мало.

У методі Зіглера – Ніколса T_i задається вчетверо більше T_d ($\alpha = 4$). Тому якщо α набуває значення менше 4, то вплив інтеграла посилюється, таким чином, у точці a_1 справедливо правило виду:

Якщо ($e(k)$ = PB) та ($\Delta e(k)$ = ZE), то (K'_p = *Big*) та (K'_d = *Small*) та $\alpha = 2$.

Величина a може розглядатися як синглетон (рис. 16.4, де використані позначення *S-small*, *MS-medium small, M-medium, B-big*).

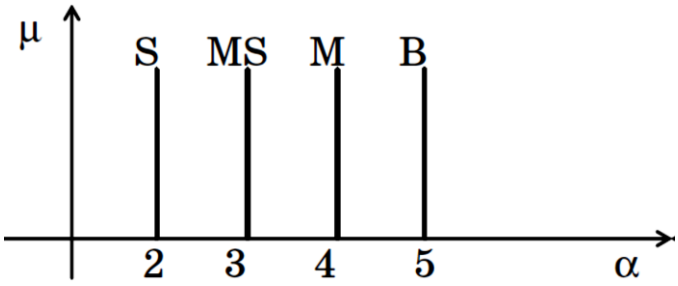


Рисунок 16.4 – Лінгвістичний опис варіантів значень α

В околиці точки b_1 (див. рис. 16.3) сигнал керування повинен бути малим для уникнення великого перерегулювання. Тому ПІД-регулятор повинен мати малі K_p та K_i і великий K_d. Ці умови описує правило:

Якщо ($e(k)$ = ZE) та ($\Delta e(k)$ = NB), то (K'_p = Small) та (K'_d = Big) та $\alpha = 5$.

Повторюючи наведені міркування, можна описати правила зміни K_p та K_d у вигляді табл. 16.1 та 16.2.

Таблиця 16.1 – Правила визначення K'_p

Таблиця правил		$de(t)/dt$						
		NB	*NM*	*NS*	*ZE*	*PS*	*PM*	*PB*
$e(t)$	*NB*	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
	NM	**S**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**S**
	NS	**S**	**S**	**B**	**B**	**B**	**S**	**S**
	ZE	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**
	PS	**S**	**S**	**S**	**B**	**B**	**S**	**S**
	PM	**S**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**S**
	PB	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**

K'_P

Таблиця 16.2 – Правила визначення K'_d

Таблиця правил		$de(t)/dt$						
		NB	*NM*	*NS*	*ZE*	*PS*	*PM*	*PB*
$e(t)$	*NB*	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**
	NM	**B**	**B**	**S**	**S**	**S**	**B**	**B**
	NS	**B**	**B**	**B**	**S**	**B**	**B**	**B**
	ZE	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**	**B**
	PS	**B**	**B**	**B**	**S**	**B**	**B**	**B**
	PM	**B**	**B**	**S**	**S**	**S**	**B**	**B**
	PB	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**

K'_D

Закон зміни коефіцієнта a показаний у табл. 16.3.

Таблиця 16.3 – Правила визначення α

Таблиця правил		*de*(*t*)/*dt*						
		NB	*NM*	*NS*	*ZE*	*PS*	*PM*	*PB*
e(*t*)	*NB*	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**
	NM	**3**	**3**	**2**	**2**	**2**	**3**	**3**
	NS	**4**	**3**	**3**	**2**	**3**	**3**	**4**
	ZE	**5**	**4**	**3**	**3**	**3**	**4**	**5**
	PS	**4**	**3**	**3**	**2**	**3**	**3**	**4**
	PM	**3**	**3**	**2**	**2**	**2**	**3**	**3**
	PB	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**
								a

Таблиці 16.1–16.3 можуть бути зведені в одну таблицю з 49 правил, що мають дві посилки та три висновки.

16.1 Приклад синтезу нечіткого супервізора з корекцією коефіцієнтів ПІД-регулятора на підставі інформації про помилку та її похідну

Приклад. На рис. 16.5 показана схема моделювання супервізора Simulink MatLab для об'єкта, заданого передатною функцією:

$$W(p) = \frac{27}{(p+1)(p+3)^3}.$$

Fuzzy Logic Controller надаємо Fis name: PIDsupv3 (ім’я може буди будь-яке).

Викликається редактор системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS) у MatLab командою

>> fuzzy

Дале проводиться налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи (див. рис. 16.6).

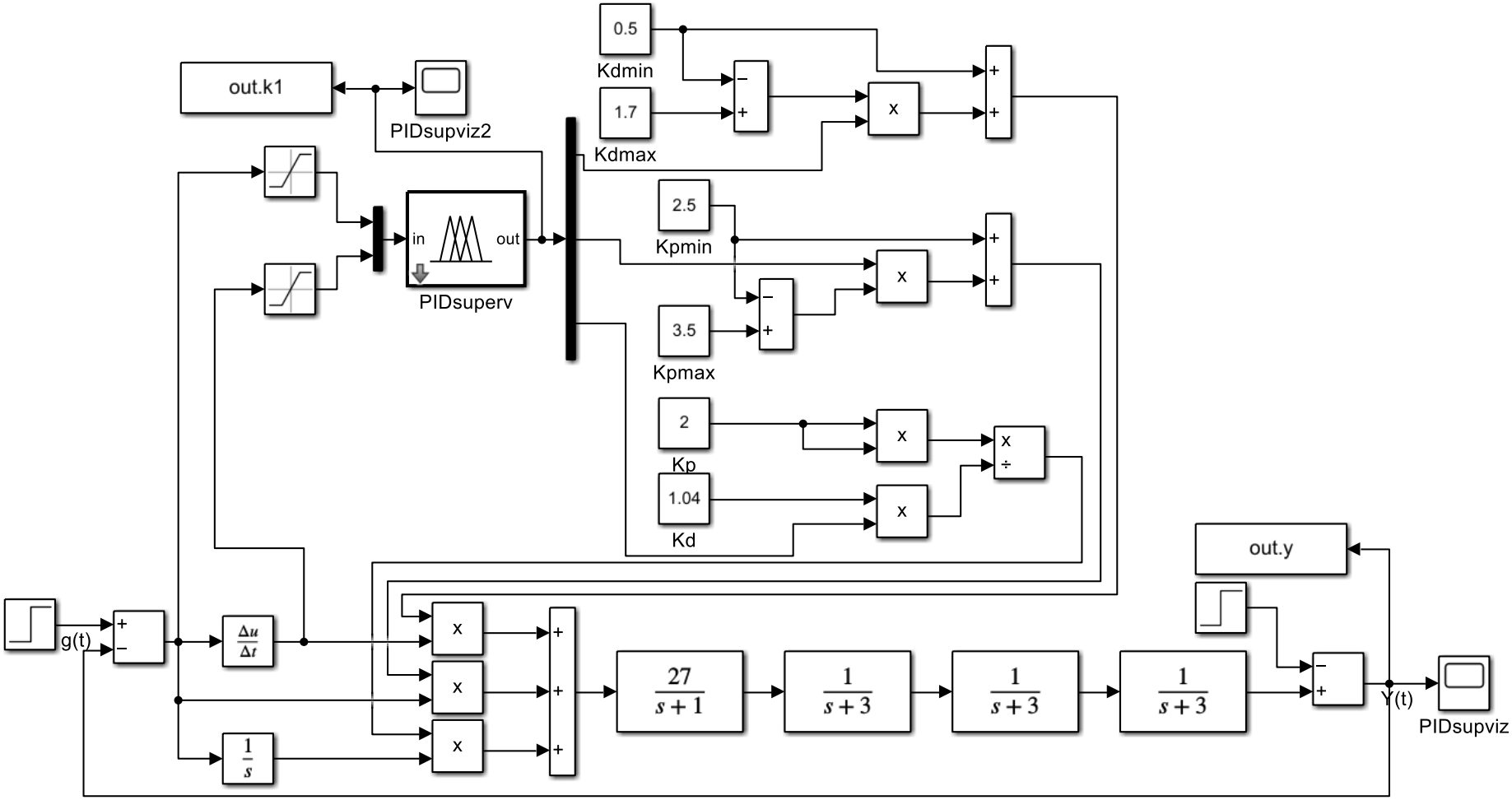


Рисунок 16.5 – Структурна схема математичної моделі системи управління

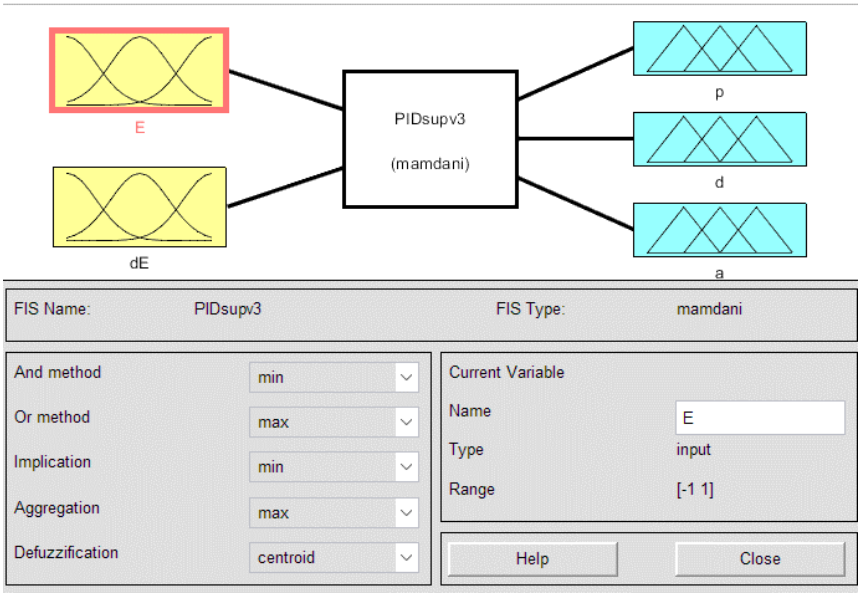


Рисунок 16.6 – Налаштування інтерфейсу FIS editor

У *FIS editor* задається опис систему нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створюваної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*).

У меню *Edit* послідовно додаємо 2 вхідні змінні з розміром базової шкали (Range= [-1 1]) та 3 вихідні змінні з розміром базової шкали (*Range*= [0 1]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної змінної трикутну функцію приналежності.

Нехай терми лінгвістичної змінної «Помилка управління» розміщуються відповідно до рис. 16.7 з 7 параметрами функцій приналежності:

Name = "NBe"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
Name = "NMe"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
Name = "NSe"; Type = "trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
Name = "Ze"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];
Name = "PSe"; Type = "trimf"; Param = [0 0.33 0.66].
Name = "PMe"; Type = "trimf"; Param = [0.33 0.66 1].
Name = "PBe"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Терми вхідної лінгвістичної змінної «Похідна помилки управління» формуємо рівномірно. Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності. З параметрами:

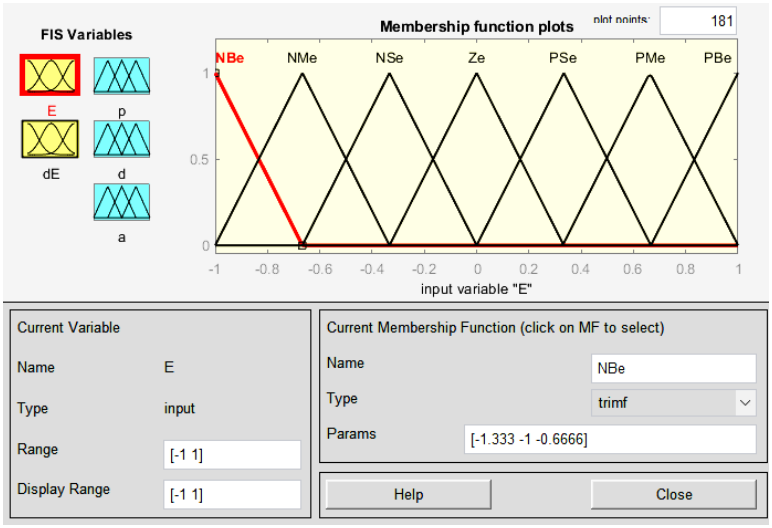


Рисунок 16.7 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Помилка управління»

Name = "NBde"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
Name = "NMde"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
Name = "NSde"; Type = "trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
Name = "Zde"; Type = " trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];
Name = "PSde"; Type = "trimf"; Param = [0 0.33 0.66].
Name = "PMde"; Type = "trimf"; Param = [0.33 0.66 1].
Name = "PBde"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління» на рис. 16.8.

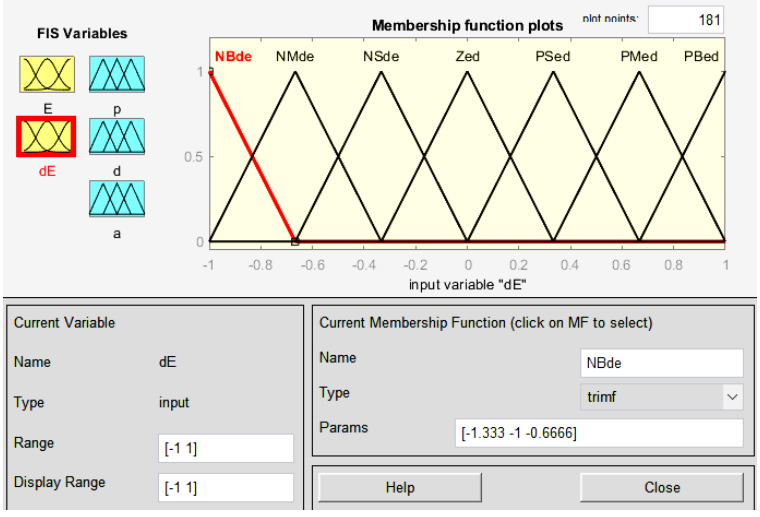


Рисунок 16.8 – Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних «Похідна помилки управління»

Для опису вихідної логічної змінної K'_p у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної дзвоноподібну функцію приналежності.

Name = "Sp"; Type = "gbellmf"; Param = [0.5 2.5 0];
Name = "Bp"; Type = "gbellmf"; Param = [0.5 2.5 1].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 16.9.

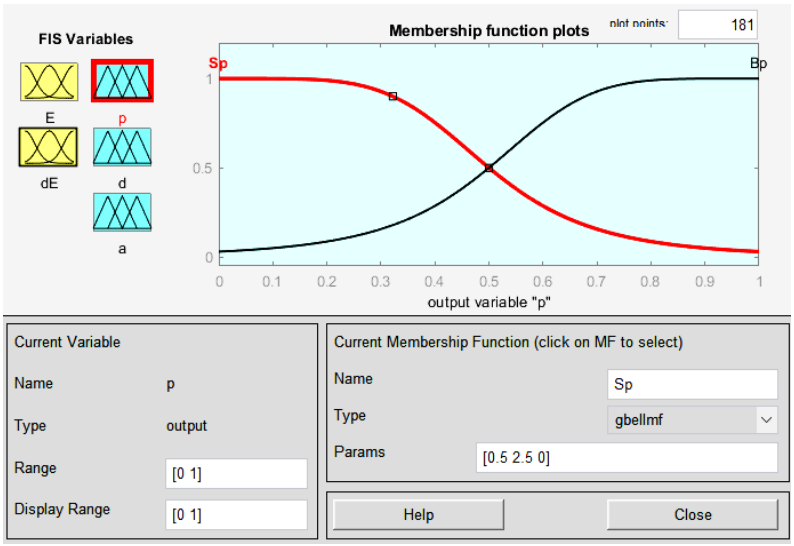


Рисунок 16.9 – Результат налаштування функцій приналежності вихідної змінної $K^{/}_{p}$

Для опису вихідної логічної змінної $K^{/}_{d}$ у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної дзвоноподібну функцію приналежності.

Name = "Sd"; Type = " trimf "; Param = [0.5 2.5 0];
Name = "Bd"; Type = " trimf "; Param = [0.5 2.5 1].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 16.10.

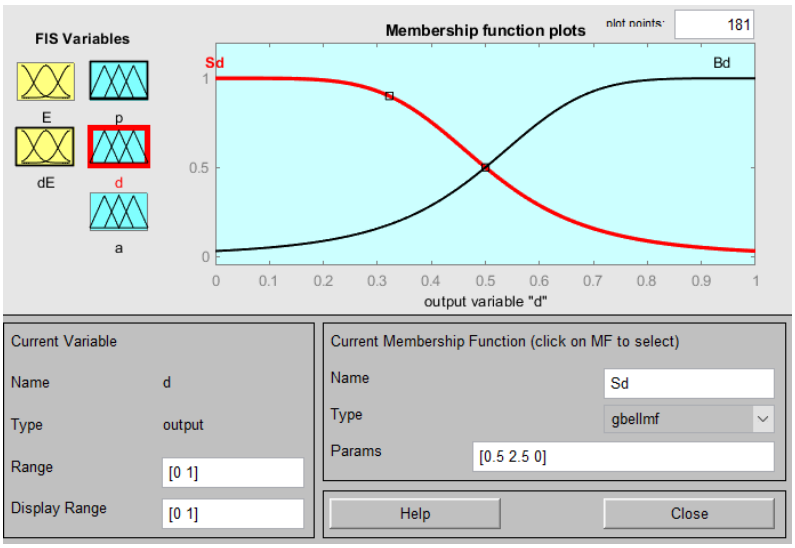


Рисунок 16.10 – Результат налаштування функцій приналежності вихідної змінної $K^{/}_{d}$

Для опису вихідної логічної змінної α у редакторі функцій приналежності (*Membership Function Editor*), задаємо для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності.
Name = "Sa"; Type = "gbellmf"; Param = [0.5 2.5 0];
Name = "Ba"; Type = "gbellmf"; Param = [0.5 2.5 1].

Результат налаштування функцій приналежності вхідних змінних наведено на рис. 16.11.

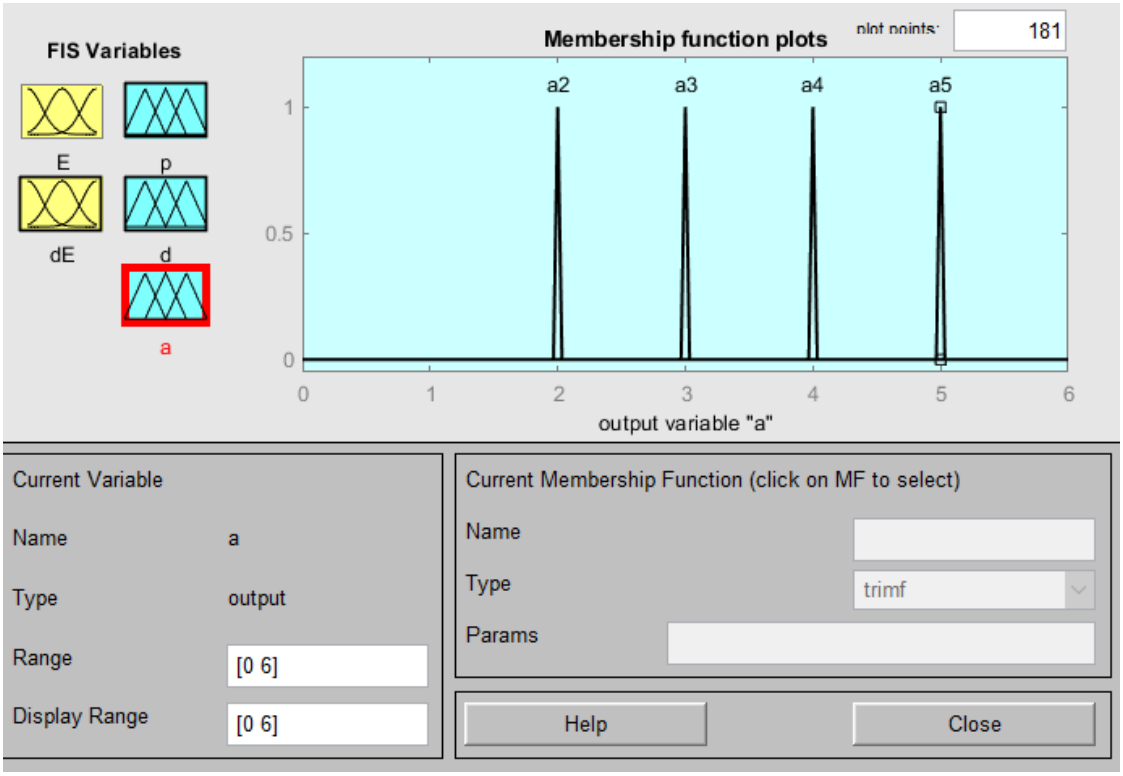


Рисунок 16.11 – Результат налаштування функцій приналежності вихідної змінної α

Після опису вхідні та вихідні лінгвістичних змінних, здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку 25. Управляючі правила сформульовано згідно з рис. 11.166:
1. if (E is NBe) and (dE is NBdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
2. if (E is NBe) and (dE is NMdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
3. if (E is NBe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
4. if (E is NBe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
5. if (E is NBe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
6. if (E is NBe) and (dE is PMdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
7. if (E is NBe) and (dE is PBdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
8. if (E is NMe) and (dE is NBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
9. if (E is NMe) and (dE is NMdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
10. if (E is NMe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
11. if (E is NMe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
12. if (E is NMe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)

13. if (E is NMe) and (dE is PMdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
14. if (E is NMe) and (dE is PBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
15. if (E is NSe) and (dE is NBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
16. if (E is NSe) and (dE is NMdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
17. if (E is NSe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
18. if (E is NSe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
19. if (E is NSe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
20. if (E is NSe) and (dE is PMdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
21. if (E is NSe) and (dE is PBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
22. if (E is Ze) and (dE is NBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a5) (1)
23. if (E is Ze) and (dE is NMdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
24. if (E is Ze) and (dE is NSdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
25. if (E is Ze) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
26. if (E is Ze) and (dE is PSdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
27. if (E is Ze) and (dE is PMdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
28. if (E is Ze) and (dE is PBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a5) (1)
29. if (E is PSe) and (dE is NBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
30. if (E is PSe) and (dE is NMdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
31. if (E is PSe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
32. if (E is PSe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
33. if (E is PSe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
34. if (E is PSe) and (dE is PMdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
35. if (E is PSe) and (dE is PBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
36. if (E is PMe) and (dE is NBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
37. if (E is PMe) and (dE is NMdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
38. if (E is PMe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
39. if (E is PMe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
40. if (E is PMe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
41. if (E is PMe) and (dE is PMdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
42. if (E is PMe) and (dE is PBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
43. if (E is PBe) and (dE is NBdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
44. if (E is PBe) and (dE is NMdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
45. if (E is PBe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
46. if (E is PBe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
47. if (E is PBe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
48. if (E is PBe) and (dE is PMdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
49. if (E is NBe) and (dE is PBdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)

Налаштовування управляючих правил для даного випадку наведено на рисунку (див. рис. 16.12).

Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Введене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight*=1).

Після опису правил можливо за допомогою

- інтерфейсу *Rule Viewer* можливо переглянути роботу системи нечіткого висновку за різних вхідних даних (див. рис. 16.13).

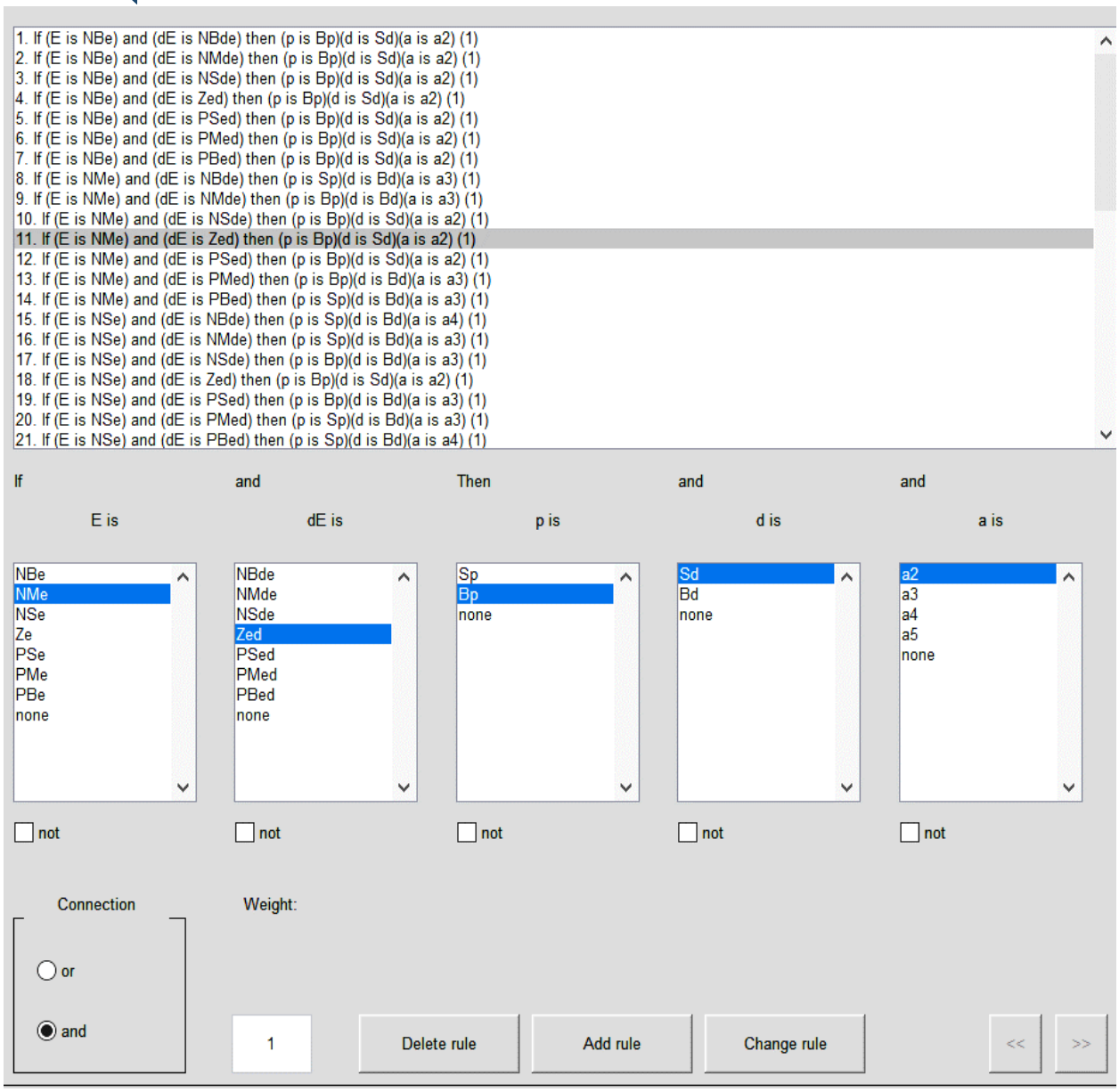


Рисунок 16.12 - Налаштовування опису правил функціонування нечіткого супервізору НЛР_ПІД

− інтерфейсу Surface Viewer можливо переглянути графічне подання закону управління (рис. 16.14).

Після процедур налаштування нечіткого супервізору НЛР_ПІД у редакторі системи нечіткого висновку здійснює запис результатів налаштування у Fuzzy Logic Controller. Для цього у вкладці File здійснюємо Export в математичну модуль нечіткого контролера From Workspase вказавши ім’я Fuzzy Logic Controller.

На рис. 16.15 представлені графіки перехідного процесу у системі управління з нечітким супервізором НЛР_ПІД. На математичної моделі (див. рис. 16.5) у момент часу 12 с додано збурення. Як видно з графіку перехідного процесу, що спроектована система управління повністю компенсує збурюючи впливи .

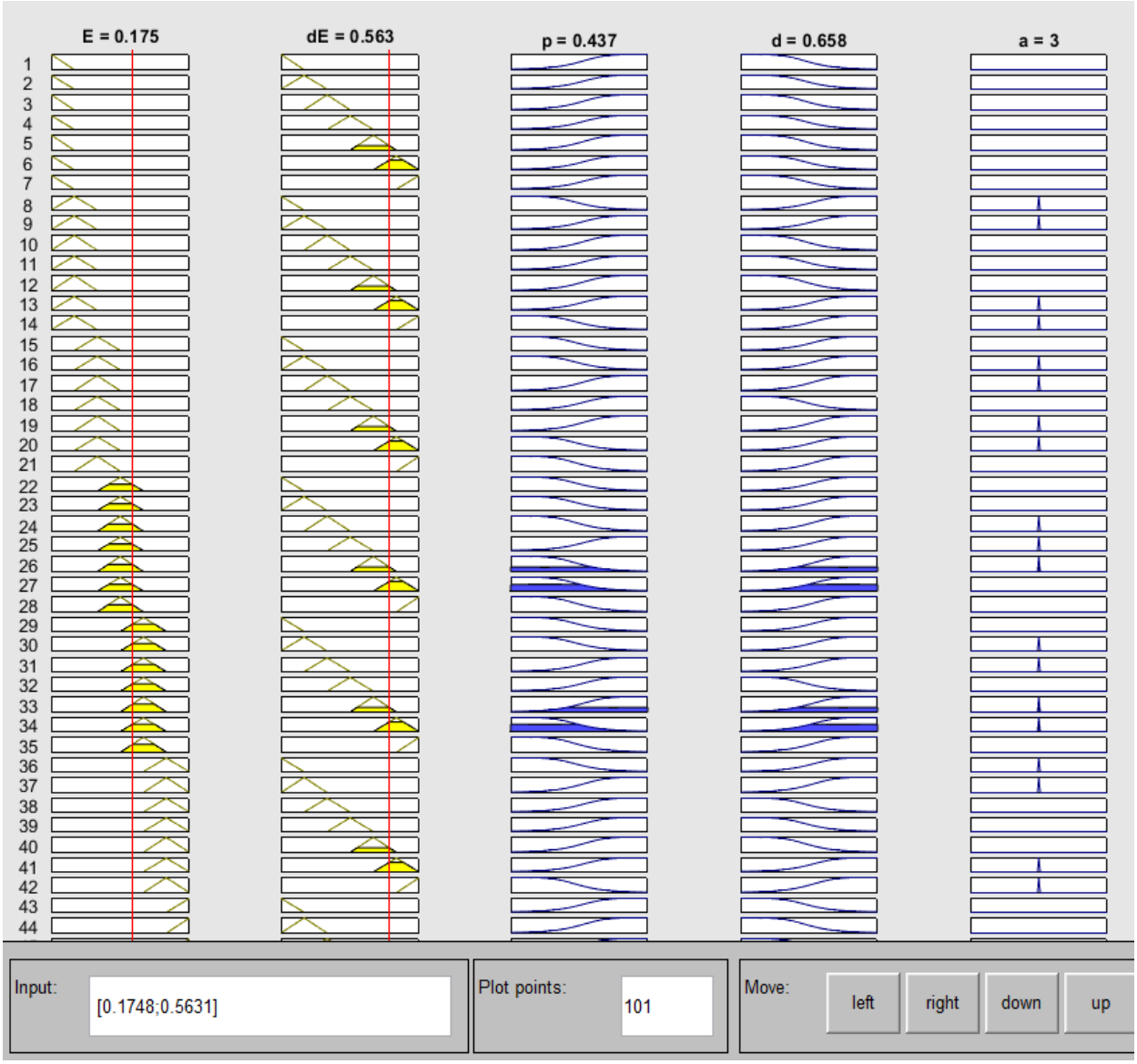


Рисунок 16.13 - Робота системи нечіткого супервізору НЛР_ПІД

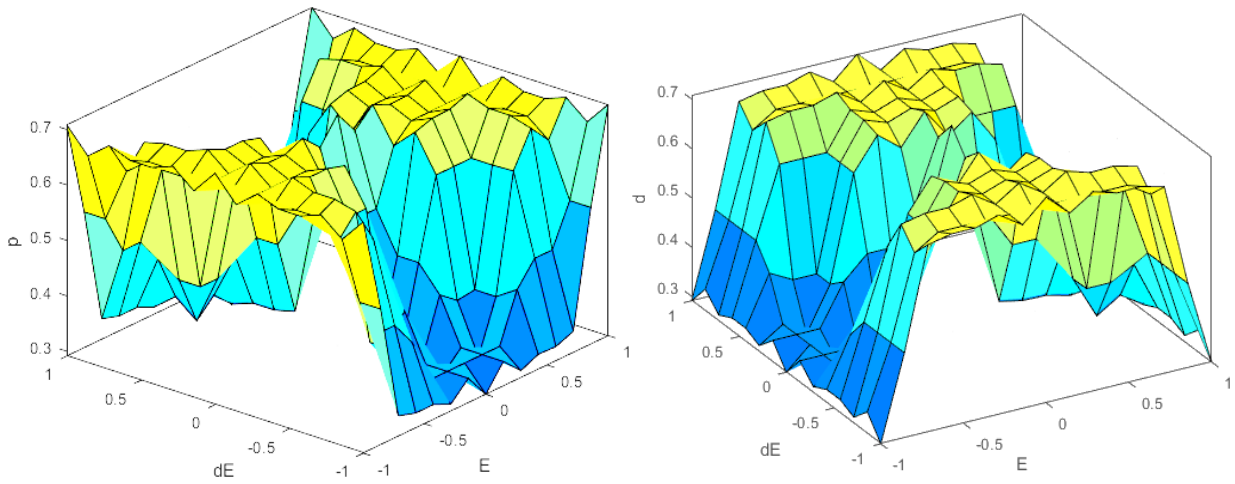


Рисунок 16.14 - Графічне подання закону управління K'_p, K'_d

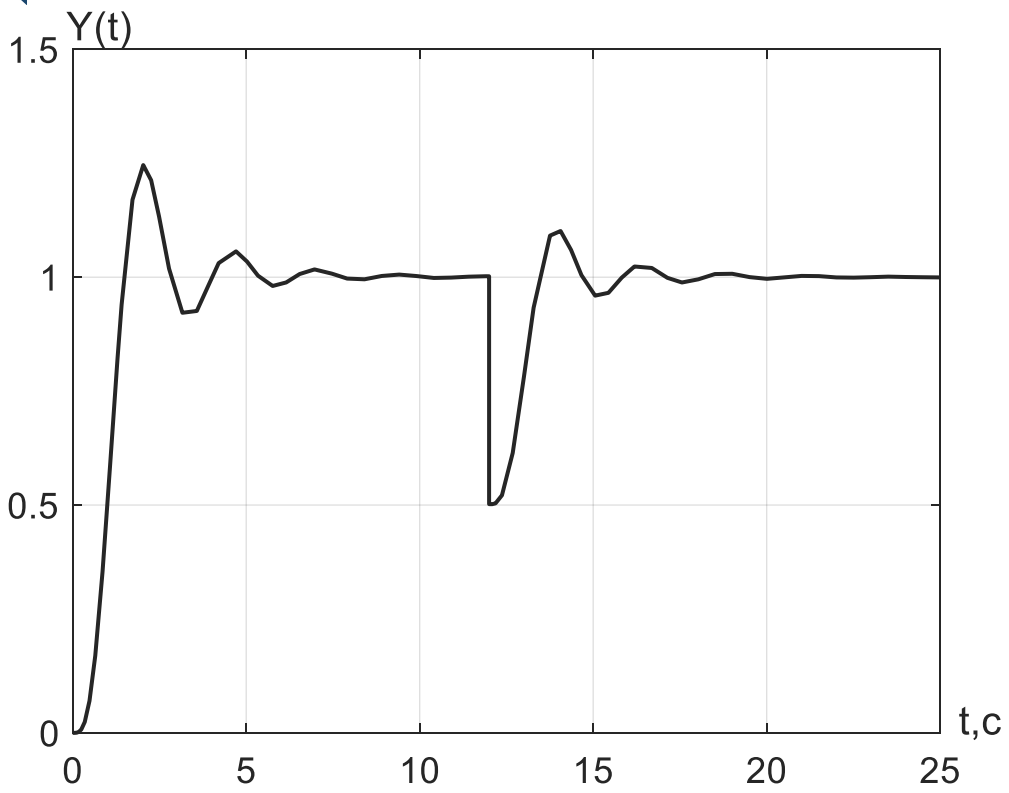


Рисунок 16.15 – Графік перехідного процесу у системі управління з нечітким супервізором ПІД-типу

16.3 Зміст звіту

Для виконання роботи студент отримують індивідуальні завдання, варіанти яких наведені у таблиці 16.4.

За вказаними у табл. 16.4 потрібно синтезувати нечіткий супервізор регулятора ПІД-типу.

Таблиця 16.4 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
1	$W(p) = \frac{1}{(3p+1)(p+1)^3}$
2	$W(p) = \frac{2}{(p+1)(2p+1)^3}$
3	$W(p) = \frac{3}{(3p+1)(3p+1)^3}$
4	$W(p) = \frac{4}{(2p+1)(3p+1)^3}$
5	$W(p) = \frac{5}{(p+1)(3p+1)^3}$
6	$W(p) = \frac{6}{(2p+1)(2p+1)^3}$

Продовження табл. 16.4

№ вар	*Передаточна функція об'єкту управління*
7	$W(p) = \frac{7}{(4p+1)(3p+1)^3}$
8	$W(p) = \frac{8}{(3p+1)(p+1)^3}$
9	$W(p) = \frac{9}{(p+1)(2p+1)^3}$
10	$W(p) = \frac{10}{(3p+1)(3p+1)^3}$
11	$W(p) = \frac{11}{(2p+1)(3p+1)^3}$
12	$W(p) = \frac{12}{(p+1)(3p+1)^3}$
13	$W(p) = \frac{13}{(2p+1)(2p+1)^3}$
14	$W(p) = \frac{14}{(4p+1)(3p+1)^3}$
15	$W(p) = \frac{15}{(3p+1)(p+1)^3}$
16	$W(p) = \frac{16}{(p+1)(2p+1)^3}$
17	$W(p) = \frac{17}{(3p+1)(3p+1)^3}$
18	$W(p) = \frac{18}{(2p+1)(3p+1)^3}$
19	$W(p) = \frac{19}{(p+1)(3p+1)^3}$
20	$W(p) = \frac{20}{(2p+1)(2p+1)^3}$

16.4 Контрольні питання

1. Що таке нечіткий супервізор?
2. На підставі яких міркувань відбувається синтез правил нечіткого супервізора?
3. Опишіть варіанти схем нечітких супервізорів.
4. Опишіть принципи опису дискретного НЛР ПД.
5. Опишіть принципи опису дискретного НЛР ПІ.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hornik K., Stinchcombe M., White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators // Neural Network. 1989. Vol. 2. P. 359–366.256
2. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. Харьков: Основа, 1997.
3. Hagan M. T., Demuth H. B. Neural networks for control // Proc. 1999 American Control Conference. San Diego: CA, 1999. P. 1642–1656.
4. Neural systems for control / O. Omidvar, D. L. Elliott eds. // New York: Academic Press. 1997. P. 272.
5. Галушкин А. И. Основы нейроуправления // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2002. № 10. С. 2–16.
6. Чернодуб А. Н., Дзюба Д. А. Обзор методов нейроуправления // Проблемы программирования. 2011. № 2. С.79–94.
7. Soloway D., Haley P. J. Neural generalized predictive control // Proc. 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control. 1996. P. 277–281.
8. Chen S., Billings S. A. Representation of nonlinear systems: The NARMA model // Int. J. Control. 1989. Vol. 49(3). P. 1013–1032.
9. Narendra K. S., Mukhopadhyay S. Adaptive control using neural networks and approximate models //IEEE Trans. Neural Networks. 1997. Vol. 8. P. 475–485.
10. Broomhead D. S., Lowe D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks // Complex Systems. 1988. N 2. P. 321–355.
11. Yager R., Filev D. Essentials of fuzzy modeling and control. New York: John Wiley & Sons. 1984.
12. Elman J. L. Finding structure in time // Cognitive Sci. Ser. 1990. N 14. P. 179–211.
13. Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence // Comput. Oper. Res. 1986. Vol. 13(5). P. 533–549.

ДОДАТОК А

Налаштування коефіцієнтів передаточної функції ПІД-регулятора

Метод Зіглера – Ніколса може бути формульовано у двох варіантах – для замкнутої та розімкнутої системи. Розглядаються П, ПІ та ПІД-регулятори.

Перепишемо закон управління ПІД-регулятора у вигляді передаточної функції

$$H(p) = K_p\left(1 + T_d p + \frac{1}{T_i p}\right).$$

Розглянемо перший варіант (замкнута система):

1) коефіцієнти k_d і k_i встановлюються рівними нулю, а коефіцієнт k_p збільшується до тих, доки в системі не виникнуть автоколивання (рис. А.1а).

2) позначимо граничне значення k_p як P, а період автоколивань як T.

3) значення коефіцієнтів регулятора розраховуються відповідно до табл. А.1.

Таблиця А.1 – Розрахунок коефіцієнтів регулятора (варіант 1)

	k_p	T_i	T_d
П-регулятор	0,5P		
ПІ-регулятор	0,45P	T/1,2	
ПІД-регулятор	0,6P	$T/2$	$T/8$

Нехай об'єкт управління описується передаточною функцією

$$W(p) = \frac{1}{p^3 + 15p^2 + 2p + 1}.$$

Потрібно розрахувати параметри ПІД-регулятора.

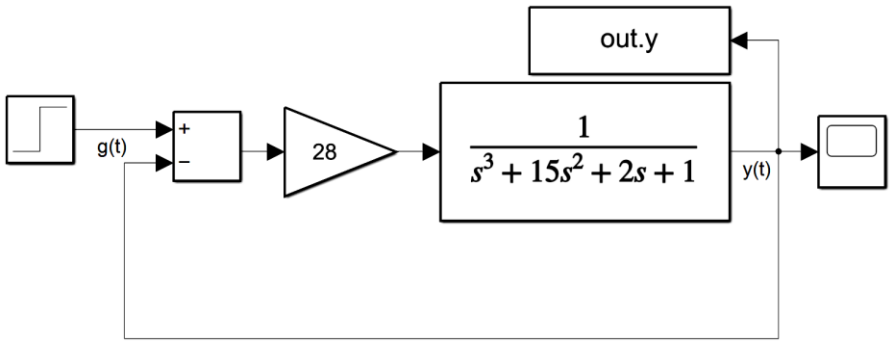
Схема моделювання у Simulink MatLab показана на рис. А.1.

Автоколивання у системі виникають при k_p =28 (див. рис. А.2).

Таким чином, P = 28, $T \approx 5$. Відповідно до табл. А.1 отримуємо:

$$K_P \approx 17;\ T_d \approx 0.625;\ T_i \approx 2.5.$$

а)



б)

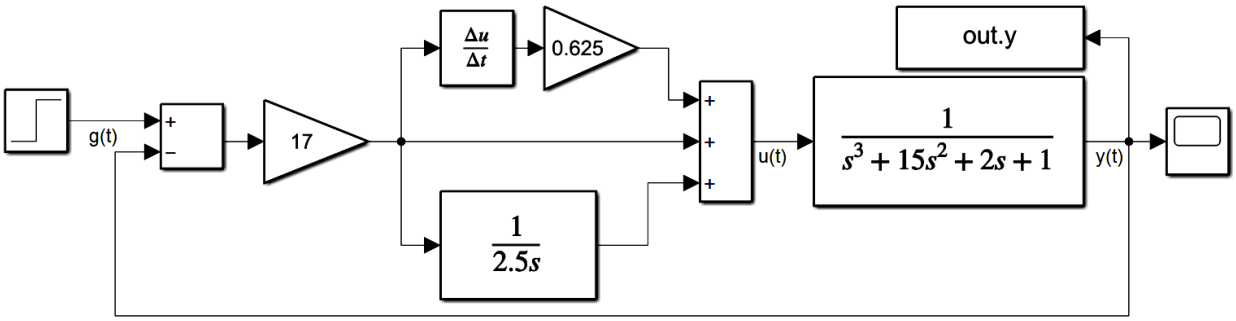


Рисунок А.1 – Математична модель роботи а) П-регулятора та б) ПІД-регулятора

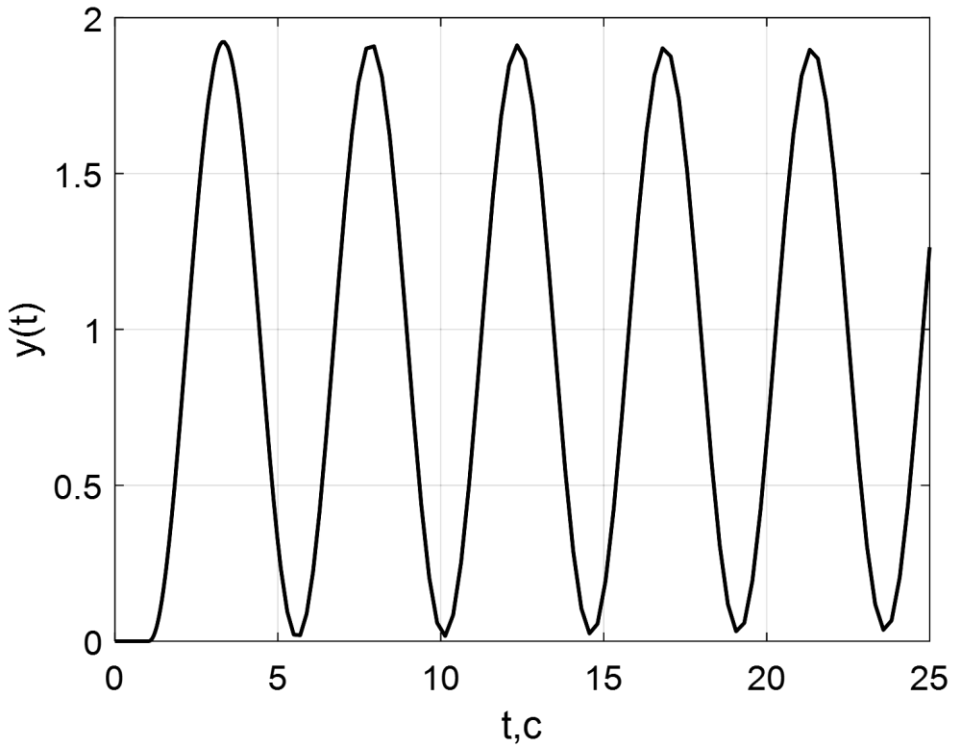


Рисунок А.2 - Незагасні коливання в системі управління

Перехідний процес для ПІД-регулятора (див. рис. А.1б)за розрахованими коефіцієнтами регулятора показано на рис. А.3.

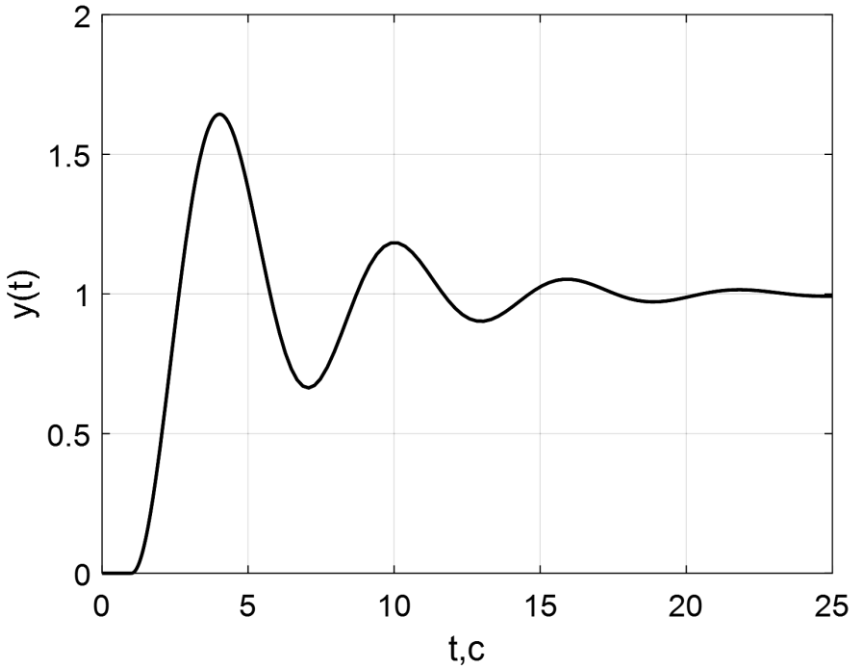


Рисунок А.3 – Перехідний процес у системі з ПІД-регулятором

Розглянемо другий варіант (розімкнута система).

На вхід системи подається одиничний стрибок. Незалежно від того, чи є система стійкою чи нестійкою, будується дотична до точки перегину кривої перехідного процесу, і визначаються два параметри: *R* та *L* (рис. А.;). Далі коефіцієнти обраного типу регулятора розраховуються відповідно до табл. А.2.

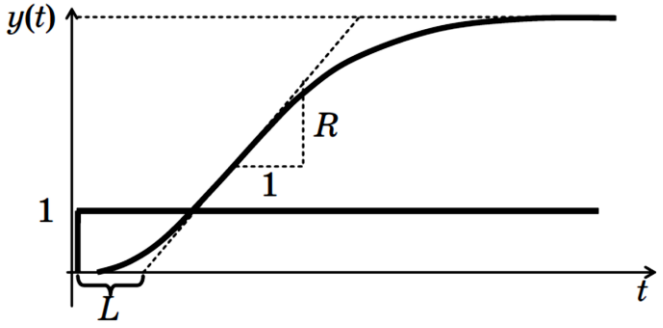


Рисунок А.4 – Визначення параметрів для стійкої системи

Таблиця А.2 – Розрахунок коефіцієнтів регуляторів (варіант 2)

	k_p	T_i	T_d
П	$1/(RL)$		
ПІ	$0{,}9/(RL)$	$3L$	
ПІД	$1{,}2/(RL)$	$3L$	$0{,}5L$

Нехай об'єкт управління описується передаточною функцією

$$W(p) = \frac{1}{15p^2 + 8p + 1}.$$

Необхідно розрахувати параметри ПІД-регулятора. Математична модель об’єкта наведена на рисунку А.5.

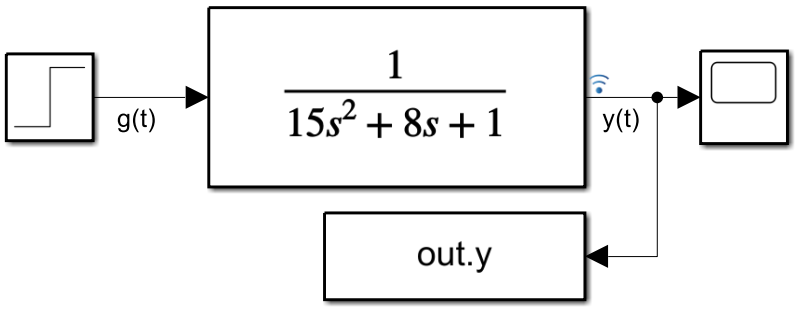


Рисунок А.5 – Математична модель об’єкта

Крива перехідного процесу для розімкнутої системи показано на рис. А.6.

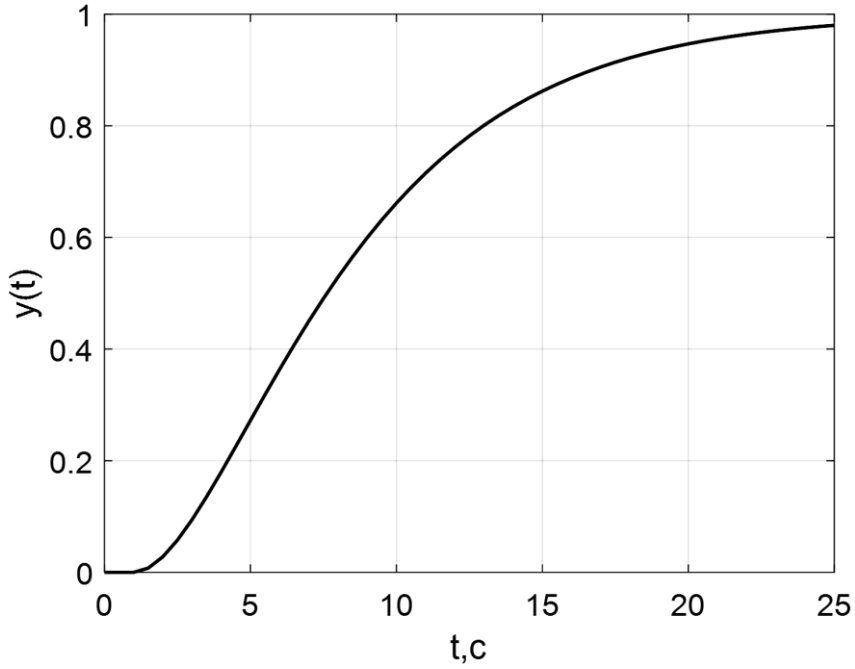


Рисунок А.6 – Графік перехідного процесу для системи без регулятора

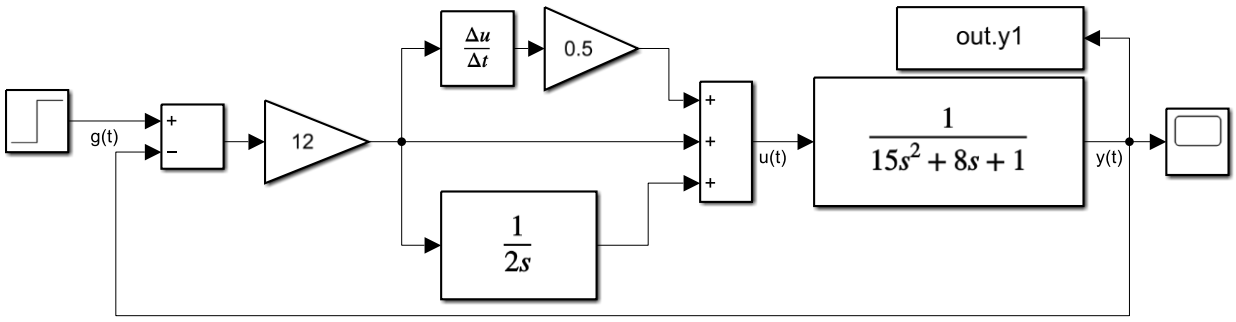
За кривою перехідного процесу, показаної на рис. А.6, визначаємо

$$L \approx 1;\ R \approx 0.1.$$

Потім за формулами табл. А.2 маємо

$$K_P \approx 12;\ T_d \approx 0.5;\ T_i \approx 2.$$

Математична модель роботи замкненої системи управління з ПІД-регулятором наведена на рис.А.7.



Перехідний процес для замкнутої системи показано на рис. А.7.

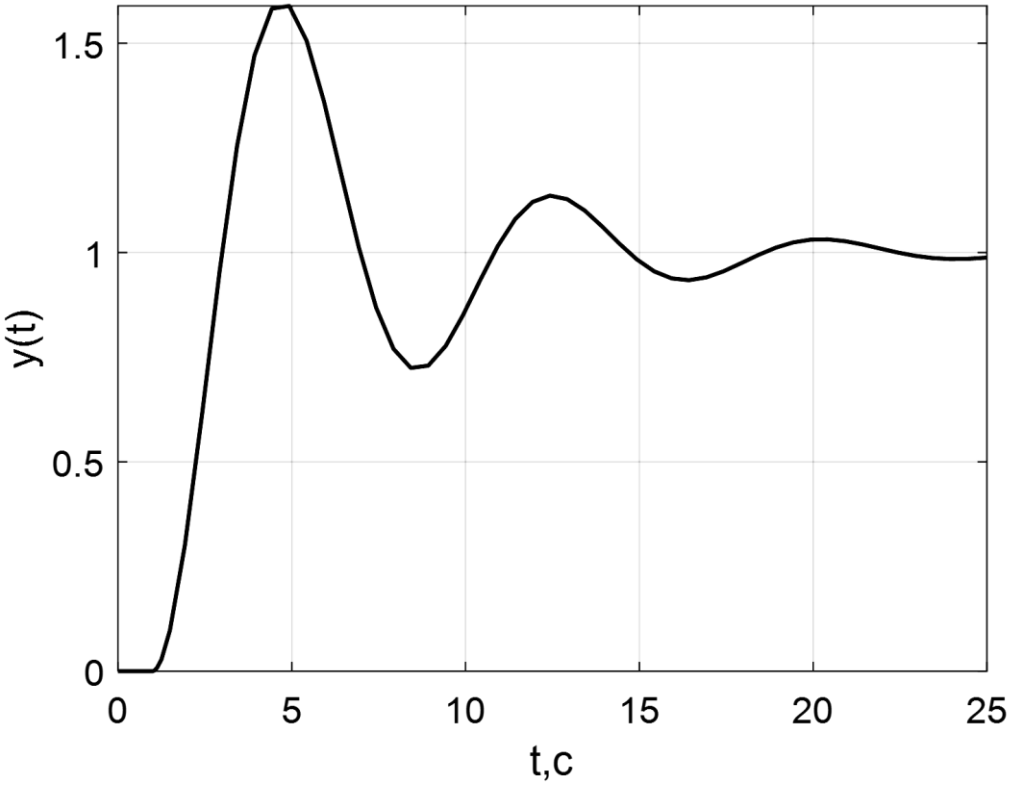


Рисунок А.7 – Графік перехідного процесу в замкненій системі з ПІД-регулятором (варіант 2)

Як свідчать рис. А.3 та А.7, для ПІД-регуляторів, розрахованих за методикою Зіглера – Ніколса, характерне велике перерегулювання (порядку 60%).

Нечіткі регулятори можуть розглядатися як природний розвиток ідей ПІД-управління, при правильному проектуванні вони забезпечують

кращі експлуатаційні показники, тобто можуть зменшити перерегулювання, час перехідного процесу і помилку, що встановилася. Для НЛР, як буде показано нижче, можна запропонувати досить прості експертні алгоритми налаштування.

ДОДАТОК Б
Демонстраційні приклади ППП NNT

Ім'я функції	Зміст прикладу
Персепторон	
demop1	Персептрон із двома входами
demop4	Формування вхідних векторів
demop5	Навчання з нормованою функцією налаштування
demop6	Приклад лінійно нероздільних векторів
Лінійні мережи	
demolin1	Приклад функціонування лінійної мережі
demolin2	Навчання лінійного нейрона
demolin4	Завдання лінійної апроксимації
demolin5	Завдання з неповними даними
demolin6	Завдання з лінійно залежними даними
demolin7	Оцінка впливу параметрів швидкості налаштування
demolin8	Адаптований лінійний шар
Радіальні базисні мережі	
demorb1	Пример радиальной базисной сети
Рекурентна мережа Хопфілда	
demohop1	Пример двумерной сети Хопфилда
Застосування нейронних мереж	
applin2	Передбачення нестаціонарного сигналу
appcr1	Розпізнавання символів
predcstr	Управління каталітичним реактором
narmamaglev	Управління магнітною подушкою
mrefrobotarm	Управління ланкою робота

Перелік усіх демонстраційних прикладів, включених до пакета Neural Network Toolbox, можна отримати за командою help nndemos.

ДОДАТОК В

Функції пакета «Neural Network Toolbox» системи MATLAB для роботи з нейронними мережами

Функції створення нової мережі

- network – створення нейронної мережі користувача

Запис:

net=network

net=network(numInputs, numLayers, biasConnect, inputConnect, layerConnect, outputConnect, targetConnect) – функція повертає створену нейронну мережу з ім'ям net і з наступними характеристиками (у дужках дано значення за замовчуванням):

numInputs – кількість входів (0),

numLayers – кількість шарів (0),

biasConnect – булевський вектор з кількістю елементів, що дорівнює кількості шарів (нулі),

inputConnect – булевська матриця з числом рядків, рівним кількості шарів і числом стовпців, рівним кількості входів (нулі),

layerConnect – булевська матриця з числом рядків і стовпців, що дорівнює кількості шарів (нулі),

outputConnect – булевський вектор-рядок з числом елементів, що дорівнює кількості шарів (нулі),

targetConnect – вектор-рядок, такий самий, як попередній (нулі).

- newc – створення конкурентного шару

net=newc(PR, S, KLR, CLR) – функція створення шару Кохонена.

Аргументи функції:

PR – R ×2 матриця мінімальних та максимальних значень для R вхідних елементів,

S – число нейронів,

KLR – коефіцієнт навчання Кохонена (за замовчуванням 0.01),

CLR – коефіцієнт «справедливості» (за умовчанням 0.001).

- newcf – створення каскадної спрямованої мережі

net=newcf(PR, [S1 S2…SNl], {TF1 TF2…TFNl}, BTF, BLF, PF) – функція створення різновиду багатошарової нейронної мережі зі зворотним поширенням помилки – так званої каскадної нейронної мережі. Така мережа містить приховані *N*1 шари, використовує вхідні функції типу dotprod та netsum, ініціалізація мережі здійснюється функцією initnw.

Аргументи функції:

PR – R ×2 матриця мінімальних та максимальних значень для R вхідних елементів,

Si – розмір *i*-го прихованого шару, для *N*1 шарів,

TFi – функція активації нейронів і-го шару, за умовчанням 'tansig',

BTF – функція навчання мережі, за умовчанням 'traingd',

BLF – функція налаштування ваг та зміщень, за замовчуванням 'learngdm',

PF – *функція помилки, за умовчанням* 'mse'.

- newelm – створення мережі зворотного розповсюдження Елмана (Elman)

net=newelm(PR, [S1 S2…SNI], {TF1 TF2…TFNI}, BTF, BLF, PF) – функція створення мережі Елмана. Аргументи такі самі, як і в попередньої функції.

- newff – створення односпрямованої мережі

net=newff(PR, [S1 S2…SNI], {TF1 TF2…TFNI}, BTF, BLF, PF) – функція створення «класичної» багатошарової нейронної мережі з навчанням за методом зворотного розповсюдження помилки.

- newfftd – створення односпрямованої мережі із вхідними затримками

net=newfftd(PR, ID, [S1 S2…SNI], {TF1 TF2…TFNI}, BTF, BLF, PF) – те, що й попередня функція, але з наявністю затримок по входах. Додатковий аргумент ID – вектор вхідних затримок.

- newgrnn – створення узагальненої регресійної нейронної мережі

net=newgrnn(P, T, spread) – функція створення узагальнено-регресійної мережі.

Аргументи функції:

P – R ×Q матриця Q вхідних векторів,

T – S ×Q матриця Q цільових векторів,

spread – відхилення (за замовчуванням 1.0).

- newhop – створення рекурентної мережі Хопфілда

net=newhop(T) – функція створення мережі Хопфілд. Використовує лише один аргумент

T – R×Q матриця Q цільових векторів (значення елементів мають бути +1 або -1).

- newlin – створення лінійного шару

net=newlin(PR, S, ID, LR) – функція створення шару лінійних нейронів.

Аргументи функції:

PR – R ×2 матриця мінімальних та максимальних значень для R вхідних елементів,

S – кількість елементів у вихідному векторі,

ID – вектор вхідної затримки (за умовчанням [0]),

LR – коефіцієнт навчання (за умовчанням 0.01).

Повертається новий лінійний шар.

При записі у формі net=newlin(PR, S, 0, P) використовується аргумент

P – матриця вхідних векторів, повертається лінійний шар з максимально можливим коефіцієнтом навчання при заданій P.

- newlind – конструювання лінійного шару

net=newlind(P, T) – функція проектування нового лінійного прошарку.

Дана функція за матрицями вхідних та вихідних векторів методом найменших квадратів визначає ваги та зміщення лінійної нейронної мережі.

- newlvq – створення квантованої мережі

net=newlvq(PR, S1, PC, LR, LF) – функція створення мережі зустрічного розповсюдження.

Аргументи функції:

PR – R ×2 матриця мінімальних та максимальних значень для R вхідних елементів,

S1 – кількість прихованих нейронів,

PC – S2 елементів вектора, що задають частки приналежності до різних класів,

LR – коефіцієнт навчання за замовчуванням 0.01,

LF – функція навчання, за умовчанням 'learnlv2'.

- newp – створення перцептрону

net=newp(PR, S, TF, LF) – функція створення персептрону.

Аргументи функції:

PR – R ×2 матриця мінімальних та максимальних значень для R вхідних елементів,

S – кількість нейронів,

TF – функція активації, за замовчуванням 'hardlim',

LF – функція навчання, за замовчуванням 'learnp'.

- newpnn – конструювання імовірнісної нейронної мережі

net=newpnn(P, T, spread) – функція створення ймовірнісної нейронної мережі. Аргументи – як у функції newgrnn.

- newrb – конструювання мережі з радіальним базисом

net=newrb(P, T, goal, spread) – функція створення мережі з радіальними базовими елементами. Аргументи P, T, spread – такие же, как у функции newgrnn; аргумент goal – задана середньоквадратична помилка.

- newrbe – конструювання точної мережі з радіальними базовими функціями

net=newrbe (P, T, spread) – функція створення мережі з радіальними базовими елементами з нульовою помилкою на навчальній вибірці.

- newsom – створення самоорганізованої карти

net=newsom(PR, [D1, D2,…], TFCN, DFCN, OLR, OSTEPS, TLR, TND) – функція створення карти, що самоорганізується, з аргументами:

PR – R ×2 матриця мінімальних та максимальних значень для R вхідних елементів,

I – розміри *i*-го шару, за замовчуванням,

TFCN – топологічна функція, за замовчуванням 'hextop',

DFCN – функція відстані, за замовчуванням 'linkdist',

OLR – коефіцієнт навчання фази упорядкування, за замовчуванням 0.9,

OSTEPS – кількість кроків фази впорядкування, за замовчуванням 1000,

TLR – коефіцієнт навчання фази налаштування, за замовчуванням 0.02,

TND – відстань для фази налаштування, за замовчуванням 1.

Функції навчання

[net, tr]=trainbfg(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV, TV) – функція навчання, що реалізує різновид квазиньютоновского алгоритму зворотного поширення помилки (*BFGS*).

Аргументи функції:

net - ім'я нейронної мережі, що навчається,

Pd – найменування масиву затриманих входів навчальної вибірки,

Tl – масив цільових значень виходів,

Ai - матриця початкових умов вхідних затримок,

Q – кількість навчальних пар в одному циклі навчання (розмір «пачки»),

TS – вектор тимчасових інтервалів,

VV – порожній ([]) масив чи масив перевірочних даних,

TV – порожній ([]) масив або масив тестових даних.

Функція повертає навчену нейронну net мережу та набір записів tr для кожного циклу навчання (tr.epoch – номер циклу, tr.perf – поточна помилка навчання, tr.vperf – *поточна помилка для перевірки*, tr.tperf – поточна помилка для тестової вибірки).

Процес навчання відбувається відповідно до значень наступних параметрів (у дужках наведено значення за замовчуванням):

net.trainParam.epochs (100) – задану кількість циклів навчання,

net.trainParam.show (25) – кількість циклів для показу проміжних результатів,

net.trainParam.goal (0) – цільова помилка навчання,

net.trainParam.time (∞) – максимальний час навчання за секунди,

net.trainParam.min_grad (10^{-6}) – цільове значення градієнта,

net.trainParam.max_fail (5) – максимально допустима кратність перевищення помилки перевірочної вибірки порівняно з досягнутим мінімальним значенням,

net.trainParam.searchFcn ('srchcha') – ім'я одновимірного алгоритму оптимізації, що використовується.

Структури та розміри масивів:

Pd – No ×Ni×Ts – клітинний масив, кожен елемент якого P{i, j, ts} є матриця Dij×Q,

Tl – N1×TS – клітинний масив, кожен елемент якого P{i, ts} є матриця Vi×Q,

Ai – N1×LD – клітинний масив, кожен елемент якого Ai{i, k} є матриця Si×Q,

де

Ni=net.numInputs (кількість входів мережі),

N1=net.numLayers (кількість її шарів),

LD=net.numLayerDelays (кількість шарів затримки),

Ri=net.inputs{i}.size (розмір i–го входу),

Si=net.layers{i}.size (розмір i–го шару),

Vi=net.targets{i}.size (розмір цільового вектору),

Dij=Ri*length(net.inputWeights{i, j}.delays).

Якщо масив VV – непустий, то він повинен мати структуру, що визначається наступними компонентами:

VV.PD – затримані значення входів перевірочної вибірки,

VV.Tl – цільові значення,

VV.Ai - початкові вхідні умови,

VV.Q – кількість перевірочних пар в одному циклі навчання,

VV.TS – часові інтервали перевірочної вибірки.

Ці параметри використовуються для завдання зупинки процесу навчання у випадках, коли помилка для перевірки не зменшується або починає зростати.

Структуру, аналогічну структурі масиву VV, має масив TV.

Розглянута функція, задана у формі trainbfg(code), повертає для значень аргументу, відповідно, 'phames' та 'pdefaults', імена параметрів навчання та їх значення за промовчанням.

Для використання функції в нейронних мережах, що визначаються користувачем, необхідно:

1) встановити параметр net.trainFcn='trainbfg' (при цьому параметри алгоритму будуть задані за умовчанням);
2) встановити необхідні значення параметрів (net.trainParam).

Процес навчання зупиняється у разі виконання будь-якої з наступних умов:

- перевищено задану кількість циклів навчання (net.trainParam.epochs),
- перевищено завданий час навчання (net.trainParam.time),
- помилка навчання стала менш завданої (net.trainParam.goal),
- градієнт став менш завданого (net.trainParam.min_grad),
- зростання помилки перевірочної вибірки в порівнянні з досягнутим мінімальним перевищило задане значення (net.trainParam.max_fail).

[net, tr]=trainbr(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – функція, що реалізує так званий Байєсовський метод навчання, сутність якого полягає в підстроюванні ваг та зміщень мережі на основі алгоритму Левенберга-Марквардта. Даний алгоритм мінімізує комбінацію квадратів помилок і ваг з вибором найкращої такої (для отримання найкращих узагальнюючих властивостей мережі). Ця процедура відома як Байєсівська регуляризація, звідки слідує назва методу.

Аргументи, параметри, величини, що повертаються і використання - такі ж, як у попередньої функції. Сказане залишається чинним всім іншим функціям цієї групи.

[net, tr]=traincgb(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – функція навчання нейронної мережі, що реалізує різновид алгоритму сполучених градієнтів (так званий метод Powell-Beale).

[net, tr]=traincgf(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – функція навчання нейронної мережі, що реалізує різновид алгоритму зворотного розповсюдження помилки у поєднанні з методом оптимізації Флетчера-Поуелла.

[net, tr]=traincgp(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – те саме, що й у попередньому випадку, але з використанням методу Polak-Ribiere.

[net, tr] = traingd (net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) - функція, що реалізує "класичний" алгоритм зворотного поширення помилки.

[net, tr] = traingda (net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – те саме, що й у попередньому випадку, але з адаптацією коефіцієнта швидкості навчання.

[net, tr] = traingdm (net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) - функція, що реалізує модифікований алгоритм зворотного розповсюдження помилки з введеною "інерційністю" корекції ваги і зміщення.

[net, tr] = traingdx (net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) - функція, що реалізує комбінований алгоритм навчання, що поєднує особливості двох вищенаведених.

[net, tr] = trainlm (net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – дана функція повертає ваги та усунення нейронної мережі, використовуючи алгоритм оптимізації Левенберга-Марквардта.

[net, tr] = trainoss (net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) - функція, що реалізує різновид алгоритму зворотного розповсюдження помилки з використанням методу посічених.

[net, tr] = trainrp (net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) - функція, що реалізує різновид алгоритму зворотного поширення помилки, так званий пружний алгоритм зворотного поширення (resilient backpropagation algorithm, RPROP).

[net, tr]=trainscg(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – дана функція повертає ваги та зміщення нейронної мережі, використовуючи алгоритм масштабованих сполучених градієнтів.

[net, tr]=trainwb(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – дана функція коригує ваги та усунення нейронної мережі відповідно до заданої функції навчання нейронів.

[net, tr]=trainb1(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS, VV) – те саме, що й попередня функція, але одночасно на вхід мережі пред'являється лише один вектор входу.

[net, Ac, El]=adaptwb(net, Pd, Tl, Ai, Q, TS) – функція адаптації ваг та зміщень нейронної мережі. Використовується разом із функціями newp та newlin. Повертає масив виходів шарів Ac та масив помилок шарів El.

Функції використання мережі

- sim – моделювання нейронної мережі

[Y, Pf, Af]=sim(net, P, Pi, Ai) – функція, що моделює роботу мережі.

Аргументи функції:

net – ім’я мережі, P –входи мережи, Pi – масив початкові умови вхідних затримок (за замовчуванням вони нульові), Ai – масив початкових умов затримок шару нейронів (за умовчанням вони нульові). Функція повертає значення виходів Y та масиви кінцевих умов затримок.

Аргументи Pi, Ai, Pf, Af використовуються тільки у випадках, коли мережа має затримки по входах або шарах нейронів.

Структура даних аргументів:

P – масив розміру Ni×TS, кожен елемент якого P{i, ts} є матрицею розміру Ri×Q.

Pi – масив розміру Ni×ID, кожен елемент якого Pi{i, k} (i-й вхід у момент ts = k-ID) є матрицею розміру Ri×Q (за замовчуванням – нуль).

Ai – масив розміру Nl×LD, кожен елемент якого Ai{i, k} (вихід i-го шару в момент ts=k-LD) є матрицею розміру Si×Q (за замовчуванням – нуль).

Y – масив розміру NO×TS, кожен елемент якого Y{i, ts} є матрицею розміру Ui×Q.

Pf – масив розміру Ni×ID, кожен елемент якого Pf{i, k} (i-й вхід в момент ts=TS+k-ID) є матрицею розміру Ri×Q.

Af – масив розміру Nl×LD, кожен елемент якого Af{i, k} (вихід i-го шару в момент ts=TS+k-LD) є матрицею розміру Si×Q,

при цьому

Ni=net.numInputs (кількість входів мережі),

Nl=net.numLayers (кількість її шарів),

No=net.numOutputs (кількість виходів мережі),

ID=net.numInputDelays (вхідні затримки),

LD=net.numLayerDelays (затримки шару),

TS=Number of time steps (число часових інтервалів),

Q=Batch size (розмір набору векторів, що подаються),

Ri=net.inputs{i}.size (розмір i-го вектора входу),

Si=net.layers{i}.size (розмір i-го шару),

Ui=net.outputs{i}.size (розмір вектора виходу).

- init – ініціалізація нейронної мережі

net=init(net) – функція ініціалізує нейронну мережу з ім'ям net, встановлюючи ваги та зміщення мережі відповідно до установок net.initFcn и net.initParam.

- adapt – функція адаптації мережі

[net, Y, E, Pf, Af]=adapt(net, P, T, Pi, Ai) – функція адаптації мережі. Встановлює адаптацію мережі відповідно до установок net.adaptFcn та net.adaptParam., де E – помилка мережі, T – цільові значення виходів (за замовчуванням – нуль); решта аргументів – як у команди sim.

- train – тренування нейронної мережі

[net, tr]=train(net, P, T, Pi, Ai) – функція здійснює навчання мережі відповідно до установок net.trainFcn та net.trainParam, де tr –

інформація про виконання процесу навчання (кількість циклів та відповідна помилка навчання).

- disp – функція відображення властивостей нейронної мережі

disp(net) – функція повертає розгорнуту інформацію про структуру та властивості мережі.

display – функція відображення імен змінних та властивостей мережі.