

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

МР.АКПм-39.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-2

**Михайло Дідоха**

**2025**

**Міністерство освіти і науки України**  
**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
**Факультет автоматизації та енергетики**  
**Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій**

Дідоха Михайло Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5  
(індекс)

## **МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

Інтелектуалізація системи автоматичного керування газоперекачувальним

(назва роботи)

агрегатом на основі нечіткої логіки

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

### **Консультант з нормоконтролю**

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### **Здобувач освітнього ступеня**

АКПм-24-2

(шифр групи)

М.О. Дідоха

(ініціали та прізвище)

### **Науковий керівник**

доцент, к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### **Допущено до захисту**

### **Завідувач кафедри**

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### **Рецензент**

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень другий (магістерський)

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

(шифр і назва)

робототехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«   »                      20   року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Дідоха Михайло Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інтелектуалізація системи автоматичного керування  
газоперекачувальним агрегатом на основі нечіткої логіки

керівник роботи Лагойда Андрій Іванович, к.т.н., доцент

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

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Матеріали практик, науково-технічні журнали,  
довідники

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз сучасних методів реалізації керування  
компресорним агрегатом. 2. Синтез системи керування газоперекачувальним  
агрегатом. 3. Синтез нечіткого регулятора для регулювання тиску в  
трубопроводі. 4. Дослідження САР з використанням регуляторів та без них.  
Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)



## АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на здобуття кваліфікації магістра за спеціальністю 174 - «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та освітньою програмою - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2025.

Магістерську роботу присвячено розробці системи керування газоперекачувальним агрегатом з нечітким регулятором.

Здійснено ґрунтовний аналіз методів та підходів синтезу систем нечіткого виводу.

Синтезовано модель компресорної станції в підпрограмі Simulink програми MATLAB. Побудовано імітаційну модель та виконано моделювання системи автоматичного керування із використанням класичних регуляторів. Виконано пошук оптимальних параметрів регуляторів та здійснено оцінку розроблених систем керування.

Синтезовано системи керування газоперекачувальним агрегатом з використанням нечітких контролерів, проведений аналіз якості САК.

Здійснено порівняльний аналіз розроблених регуляторів та визначено найоптимальніший для системи керування газоперекачувальним агрегатом.

Ключові слова: моделювання, система керування, нечітка логіка, газоперекачувальний агрегат.

## ANNOTATION

Master's thesis for obtaining a master's degree in specialty 174 - "Automation, computer-integrated technologies and robotics" and educational program - "Automation and computer-integrated technologies". - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano-Frankivsk, 2025.

The master's thesis is devoted to the development of a control system for a gas pumping unit with a fuzzy controller.

A thorough analysis of methods and approaches to the synthesis of a fuzzy output system has been carried out.

A compressor station model has been synthesized in the Simulink subroutine of the MATLAB program. A simulation model has been built and modeling of the automatic control system using classical controllers has been performed. The search for optimal controller parameters and an effective assessment of the developed control systems have been performed.

A control system for a gas pumping unit using fuzzy controllers has been synthesized, and the quality of the FACS has been analyzed.

A comparative analysis of the developed regulators was carried out and the most optimal one for the gas pumping unit control system was determined.

Keywords: modeling, control system, fuzzy logic, gas pumping unit.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РЕАЛІЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНИМ АГРЕГАТОМ.....</b>	<b>12</b>
1.1. Основні методи регулювання процесів в компресорних станціях.....	12
1.2. Системи, які будуються на основі використання нечіткої логіки.....	17
1.3. Постановка завдання на магістерську роботу.....	20
Висновки до розділу 1.....	21
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ.....</b>	<b>22</b>
Висновки до розділу 2.....	31
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ТРУБОПРОВODІ.....</b>	<b>32</b>
3.1. Теоретичні засади та специфіка керування на основі теорії нечітких множин.....	32
3.2. Розробка регулятора на основі методів нечіткої логіки.....	35
3.2.1. Алгоритм формування нечіткого проекту.....	35
3.2.2. Методи та підходи до розробки нечітких регуляторів у середовищі MATLAB.....	37
3.3 Методика та процедура конфігурування нечіткого регулятора для контролю тиску в трубопровідній системі.....	44
3.3.1 Розробка нечіткого регулятора з П-законом керування.....	44

3.3.2. Розробка нечіткого регулятора з ПД-законом керування.....	52
3.3.3 Розробка нечіткого регулятора з ПД-законом керування.....	56
Висновки до розділу 3.....	59
<b>РОЗДІЛ 4</b>	
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ САР З ВИКОРИСТАННЯМ РЕГУЛЯТОРІВ ТА БЕЗ НИХ.....</b>	<b>60</b>
4.1. Дослідження САР без використання регулятора тиску.....	60
4.2. Дослідження САР з використанням нечіткого регулятора з П-законом регулювання.....	63
4.3. Дослідження САР з використанням нечіткого регулятора з ПД-законом регулювання.....	67
4.4. Дослідження САР з використанням нечіткого регулятора з ПД-законом регулювання.....	69
4.5. Дослідження САР з використанням звичайного регулятора.....	70
Висновки до розділу 4.....	76
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>78</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>79</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>80</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

FLT - Fuzzy Logic Toolbox.

FIS - Fuzzy Inference System.

АКП - автоматичний керуючий пристрій.

ГПА - газоперекачуючий агрегат.

ВН - відцентровий нагнітач.

ГТУ - газотурбінна установка.

КО - керований об'єкт.

ЕП - електропривід.

УМГ - управління магістральних газопроводів.

КС - компресорна станція.

САР - система автоматичного регулювання.

РО - регулюючий орган.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Одним із найефективніших напрямків розвитку промисловості а також підвищення продуктивності праці являється покращення рівня автоматизації технологічних процесів.

Однією із базових наукових проблем сучасній теорії автоматичного керування являється керування нелінійними динамічними об'єктами. Дану проблематику можна пояснити тим, що досить багато об'єктів можна віднести до числа погано визначених. Більшість із них характеризуються нелінійними статичними та динамічними характеристиками. До вказаних технологічних об'єктів звичайно відносяться й та технологічні процеси, як видобування, буріння, зберігання, транспортування та переробка нафти й газу.

Класичні методи теорії автоматичного керування а також теорії адаптивних систем керування зазвичай є неефективними для керування такими об'єктами, оскільки будуються на твердженні про лінійність об'єкта керування.

Останніми роками для розв'язку таких задач автоматичного керування усе частіше застосовують методи, які побудовані на методах нечіткої логіки а також на нечіткому виведенні.

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Найбільш широке розповсюдження в задачах керування отримали нечіткі контролери, які володіють універсальними апроксимуючими властивостями та мають можливість реалізувати суттєво нелінійні закони автоматичного керування. Сфера використання нечіткої логіки та теорії нечітких множин із кожним роком неухильно продовжує розширюватися.

З наведеного вище можна стверджувати, що магістерська робота, у якій буде здійснено синтез системи автоматичного керування із нечітким керуванням являється актуальною.

**Мета і завдання дослідження.** Розробка та синтез нечітких контролерів для типового газоперекачувального агрегату для забезпечення найвищої якості регулювання являється метою магістерської роботи.

За допомогою розв'язання наведених нище задач можливе досягнення зазначеної мети:

1. Провести аналіз сучасних методів реалізації керування об'єктами і середовищ проектування систем керування та контролю.

2. Здійснити синтез системи керування газоперекачувальним агрегатом на базі нечіткої логіки.

3. Провести дослідження системи керування газоперекачувальним агрегатом з використанням нечітких та класичного регуляторів.

*Об'єктом дослідження* є процес компримування природного газу газоперекачувальним агрегатом.

*Предмет дослідження* є методи і алгоритми керування роботою автоматичної системи газоперекачувального агрегату на базі нечіткої логіки.

**Методи дослідження.** З метою оцінки можливості реалізації а також стійкості розроблюваної адаптивної системи та з метою ідентифікації параметрів котрі характеризують технічний стан об'єкта керування застосовуються методи теорії автоматичного керування.

З метою оцінки поточного стану а також індивідуального прогнозування параметрів котрі характеризують технічний стан об'єкта застосовуються методи теорії імовірності і математичної статистики.

Дослідження проведені з використанням апарата теорії нечітких множин.

**Новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- Вперше створена та опробувана імітаційна модель газоперекачувального агрегату з прилеглими до неї ділянками технологічних трубопроводів за допомогою реальних робочих характеристик агрегату.

- Удосконалено процес регулювання основних параметрів компримування газу за допомогою газоперекачувального агрегату із газотурбінним приводом.

- Синтезовано та проведено імітаційне моделювання автоматичної системи керування газоперекачувального агрегату з використанням нечіткого регулятора.

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

Тематика магістерської роботи відповідає держбюджетному напрямку роботи

кафедри Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Результати, які отримувались під час виконання науково-дослідних робіт, котрі виконувались за планами наукових досліджень ІФНТУНГ в рамках держбюджетних тем: «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР № 011U605890), «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (ДР № 0115U007099) стали науковою базою магістерської роботи.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі синтезованих рішень та структур нечітких контролерів розроблена система автоматизованого управління для керування газоперекачувальним агрегатом. Для управління процесом синтезовано нечіткий контролер в середовищі MATLAB, що забезпечує ефективне управління газоперекачувальним агрегатом.

**Структура та обсяг магістерської роботи.** Магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Повний обсяг магістерської роботи становить 86 сторінок: обсяг основного тексту - 78 сторінок, 48 рисунків, 1 таблиця; список використаних джерел, що включає 10 найменувань та займає 1 сторінку; 2 додатки на 7 сторінках.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РЕАЛІЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНИМ АГРЕГАТОМ

### 1.1. Основні методи регулювання процесів в компресорних станціях

Як відомо, основною задачею автоматичної системи є регулювання одного або декількох параметрів технологічного процесу. Регулюванням називається процес підтримки на заданому рівні якого-небудь параметра, зміна його по заданому закону, алгоритму або програмі, або процес відновлення порушеного режиму [1]. Розрізняють ручне і автоматичне регулювання.

При ручному регулюванні на регулюючий орган (РО) впливає людина, що спостерігає за ходом процесу, при автоматичному - спеціальний пристрій - автоматичний керуючий пристрій (АКП), так званий автоматичний регулятор. Пристрій, що здійснює технічний процес і потребує спеціально організованих впливів ззовні для здійснення алгоритму функціонування, називається керованим об'єктом (КО), а величини або параметри, що піддаються регулюванню - керованими величинами (регульованими параметрами). Системою автоматичного регулювання (САР) називається сукупність керованого об'єкту і автоматичного регулятора.

САР може бути виведена з стану рівноваги шляхом дії (збурюючої або регулюючої) на керований об'єкт. Збурюючою називається зовнішня дія на керований об'єкт, яка викликає відхилення регульованої величини від її заданого значення. Регулюючою називається дія регулятора на керований об'єкт для забезпечення протікання в ньому процесу по заданому закону так, щоб керована величина була рівною її заданому значенню.

На даний час газова промисловість України являється провідною галуззю енергетичного комплексу. Від її надійної роботи в значній мірі залежить стабільність національної економіки та постачання газу в країни Західної Європи.

Газотранспортна мережа України включає близько 37 тис. км газопроводів,

72 компресорні станції (КС) загальною потужністю 5442,9 МВт. Важливою складовою газотранспортної мережі нашої держави є Управління магістральних газопроводів котре має у своєму складі 18 компресорних станцій (КС) загальною продуктивністю  $380 \times 10^6$  Нм<sup>3</sup>/добу. Однією із вузлових і найпотужніших КС УМГ “Прикарпаттрансгаз” є Богородчанська КС, загальна проектна продуктивність якої майже  $8,5 \times 10^6$  Нм<sup>3</sup>/год. Витрати газу на власні потреби тільки по цій КС складають біля  $32 \times 10^3$  Нм<sup>3</sup>/год, а витрати електричної енергії – біля  $1,2 \times 10^6$  кВт·год/добу. У даний час важливим значенням є раціональне використання енергетичних ресурсів, котрі витрачаються на перекачування газу магістральними газопроводами. Один із шляхів вирішення цієї проблеми є оптимальне керування роботою компресорних станцій.

Компресорне обладнання магістральних газопроводів УМГ “Прикарпаттрансгаз” характеризується значною різноманітністю. Тут встановлено обладнання як вітчизняного виробництва (АТ СМЗ, м. Суми), так і зарубіжного виробництва (АТ ХЗЕМ, м. Хабаровськ; АТ НЗЛ, м. Санкт-Петербург; АТ ТМЗ, м. Екатеринбург; ЧДК, м. Прага; Купер-Бессемер, США; Нуово-Піньоне, Італія). Привід турбокомпресорів здійснюється за допомогою газотурбінних установок та електричних двигунів.

Газоперекачуючий агрегат (ГПА) являється основним елементом для компресорної станції (КС). Функціонально а також конструктивно ГПА у загальному складається із приводу та компресора. У нагнітача привід може мати один із двох таких типів:

- електропривід (ЕП);
- газотурбінна установка (ГТУ).

Компресори - це відцентрові нагнітачі (ВН), які приводяться в дію ГТУ або ЕП. Можливі наступні дві варіації структур для ГПА: ЕП та ВН а також ГТУ та ВН.

Привід типу ГТУ дає можливість здійснювати зміну продуктивності ВН шляхом зміни частоти його обертання. ЕП теж може мати змінну або незмінну частоту обертання вихідного валу.

КС можуть бути таких видів:

- одноцехові, котрі складаються із однотипних ГПА;
- багатоцехові, які складаються із різнотипних ГПА.

Наявні цехи КС з'єднуються із магістральними газопроводами за допомогою всмоктуючих а також нагнітальних шлейфів, а відповідно газопроводи з'єднуються за допомогою вхідних а також вихідних газопроводів.

У загальному компромівування газу рахується деяким стаціонарним процесом у кожен момент часу. Це твердження є справедливим незалежно від характеру руху газу у наявних прилеглих ділянках.

Завданням автоматизації при керуванні компресорною станцією є підтримання постійного тиску в трубопроводі - задача стабілізації тиску. Існують різні способи регулювання тиску в трубопроводі.

Основним показником роботи ВН, який характеризує його економічність є питома потужність  $H$ .

При дроселюванні на вході або виході ВН питома потужність зі зменшенням продуктивності  $Q$  збільшується, тоді як при зміні числа обертів вона падає зі зменшенням  $Q$ . При цьому досягається значне зменшення питомої потужності до 24,5 % - влітку і до 36 % - зимою при зменшенні  $Q / Q_0$  до 60 %, де  $Q_0$  - початкове значення витрати. При дроселюванні на вході ВН питома потужність практично не залежить від початкової температури повітря  $t_n$ ; в той же час зміна числа обертів ВН приводить до зменшення питомої потужності приблизно пропорційно абсолютній початковій температурі  $T_n$ .

При регулюванні продуктивності ВН шляхом зміни числа обертів досягається економія до 15 % від потужності при дроселюванні.

Серед інших способів регулювання продуктивності КС слід відмітити байпасування, включення-виключення агрегатів та закручування течії газу на вході в ВН за допомогою вхідного направляючого апарату (ВНА).

Байпасування не приводить до зменшення потужності компресора, але зменшується питома потужність компресора, тому, що байпасування викликає зменшення рівня продуктивності газопроводу.

Включення-виключення компресорів, як і при регулюванні зміною числа обертів ВН, є досить ефективним. Але безперервне включення-виключення не допустиме для ГПА і запірної арматури, оскільки це приводить до їх швидкого зношення.

Регулювання продуктивності ВН методом закручування газової течії може здійснюватися за допомогою двох способів:

- за течією;
- проти течії.

У кожному із випадків змінюється напір, що створюється ВН. Закручування течії в сторону течії зменшує напір ВН, а закручування течії в зворотну сторону - збільшує напір ВН.

Порівняння режимів керування, які основані на дроселюванні на вході а також закручуванні течії перед входом ВН засвідчує, що втрати питомої потужності досягають 20 %.

Отже, регулювання витрати газу через компресор за допомогою зміни числа обертів відцентрового нагнітача (ВН) є найбільш практичним і економічним.

В основному покращення якості регулювання в компресорних станціях на даному етапі розвитку автоматизації не визначається зміною структури регулювання, а застосуванням прогресивних технологій регулювання, таких як регулювання з використанням нечіткої логіки та різні варіанти класичного ПІД регулювання.

В теперішній час є актуальним та доцільним проводити дослідження в напрямку проектування та розробки інтелектуальних систем керування процесами нафтогазової галузі з використанням новітніх технологій.

Автоматичні регулятори в нафтогазовій промисловості класифікуються за призначенням, принципом дії, законом керування, конструктивними особливостями, видом енергії, що використовується, характером зміни регулюючого впливу [2].

Згідно з принципом дії, регулятори класифікуються на регулятори прямої та непрямої дії. Регулятори прямої дії здійснюють керування без використання

зовнішнього джерела енергії, застосовуючи енергію самого об'єкта керування; типовим прикладом таких пристроїв є регулятори тиску. Регулятори непрямой дії, навпаки, потребують наявності зовнішнього джерела енергії (електричної, гідравлічної тощо) для виконання своїх функцій.

За характером дії регулятори поділяються на неперервні та дискретні. Останні, у свою чергу, класифікуються на релейні, імпульсні та цифрові регулятори.

За видом енергії, що використовується, поділяються на електричні, пневматичні, гідравлічні, механічні, комбіновані. Вибір регулятора визначається характером об'єкта керування та особливостями автоматичної системи.

За типом виконуваних функцій регулятори класифікують на регулятори автоматичної стабілізації, програмні, коригувальні, слідкуючі та регулятори співвідношення параметрів.

За законом керування поділяються на типові регулятори (П, І, ПІ, ПД, ПІД), регулятори із змінною структурою, оптимальні регулятори, адаптивні, нечіткі і нейромережеві регулятори.

Вибір типу регулятора це складний і відповідальний етап. Завдання проектувальника полягає у виборі такого типу мікропроцесорного регулятора, який за мінімальних витрат і максимальної надійності забезпечуватиме необхідну якість процесу автоматичного регулювання.

Для обґрунтованого вибору типу регулятора та визначення його параметрів налаштування необхідно мати уявлення про:

- статичні і динамічні характеристики об'єкта керування;
- необхідні показники якості системи регулювання;
- вимоги до показників якості системи автоматичного регулювання для задіяних серійних регуляторів;
- тип збурень, котрі появляються у процесі автоматичного регулювання.

Процес вибору типу регулятора може починатися із простих двопозиційних і закінчуватися адаптивними нечіткими видами.

Одними з найпоширеніших на практиці є ПІ та ПІД-регулятори. ПІД-

регулятор забезпечує найвищу швидкодію системи, проте така характеристика досягається лише за умови оптимального налаштування його трьох параметрів. Із збільшенням запізнення в системі спостерігається істотне зростання від'ємних фазових зсувів, що знижує ефективність дії диференціальної складової. Унаслідок цього якість функціонування ПД-регулятора в системах із великим запізненням стає порівнянною з якістю роботи П-регулятора. Застосування ПД-регулятора доцільне в системах автоматичного регулювання, для яких характерні відносно низький рівень шумів і незначна величина запізнення в об'єкті керування.

Для визначення параметрів налаштування регуляторів використовують такі методи: формальний метод, розрахунок по частотним характеристикам об'єкту, експериментальні методи налаштування - метод незатухаючих та затухаючих коливань; для багато-зв'язних систем - метод автономного налаштування регулятора, ітеративного налаштування, аналітичного конструювання.

## **1.2. Системи, які будуються на основі використання нечіткої логіки**

Виконані дослідження засвідчили, що наявні у даний час системи автоматичного контролю а також керування технологічних процесів не можуть виконувати урахування неповноти інформації та певні лінгвістичні невизначеності котрі можуть прийматися операторами. Отож появляється необхідність розробки засобів призначених для ефективного аналізу ситуації для приймання ефективних керуючих рішень. Невизначеність а також динаміка процесів перетворюють задачу керування у досить складний процес. Необхідну якість системи керування можна отримати за умов повного інформаційного забезпечення а також при оптимальному адаптивному управлінні. Отож, появляється потреба в побудові високоефективних автоматичних систем управління технологічними процесами. Саме одним з можливих методів розв'язання даної задачі являється впровадження методів нечіткої логіки а також теорії нечітких множин, розробленої і запропонованої професором Лотфі А. Заде (Lotfi A. Zadeh).

У цьому випадку потрібним математичним апаратом буде теорія нечітких

множин, а також методи фази логіки.

Системи, які призначені для нечіткого логічного виведення мають важливу роль у багатьох додатках теорії нечітких множин, а саме: нечіткі контролери, нечіткі експертні системи та багато інших [3]. Основою таких систем є логічні правила типу «Якщо ..., то ...», у яких як умови, так і висновки формулюються у вигляді нечітких понять. Подібні наближені судження становлять фундамент здатності людини сприймати природну мову, розпізнавати складні образи (зокрема почерк і голос), а також приймати рішення в умовах невизначеності та складності середовища. Теорія нечітких множин, а також пов'язані з нею теорії - теорія наближених суджень і теорія можливостей - для повного та всебічного опису потребують введення значної кількості додаткових понять і логічних міркувань, зокрема таких, як *modus ponens*, *modus tollens* та різноманітних логічних зв'язків.

Методи побудови інформаційних моделей, засновані на теорії нечітких множин, істотно розширюють традиційні сфери застосування обчислювальної техніки та формують самостійний науково-прикладний напрям, відомий серед дослідників як нечітке моделювання.

Останнім часом нечітке моделювання стало одним із найбільш динамічних і перспективних напрямів прикладних досліджень у галузі керування та прийняття рішень. У сфері управління технічними процесами використання методів нечіткого моделювання дозволяє отримувати більш адекватні результати порівняно з тими, що базуються на традиційних аналітичних моделях і алгоритмах керування.

Фази-логіка, яка становить теоретичну основу нечіткого управління, забезпечує більш ефективний опис особливостей людського мислення та логіки міркувань, ніж класичні формально-логічні системи. У зв'язку з цим вивчення та застосування математичних засобів для представлення нечіткої вихідної інформації створює можливості для побудови моделей, що найбільш повно відображають різні аспекти невизначеності, притаманної реальним процесам і явищам навколишнього середовища [4].

Розв'язання задач керування процесами, об'єктами а також системами являється базовим напрямком використання нечітких систем виводу. У такому

випадку створення нечіткої моделі базується на певному представленні наявних характеристик системи у деяких термінах лінгвістичних змінних. З урахуванням того, що основними поняттями системи управління крім алгоритму управління являються вхідні та вихідні змінні, то якраз саме вони розглядатимуться як лінгвістичні змінні в процесі формуванні бази правил у системах нечіткого виводу.

Метою процесу керування в загальному випадку є визначення на основі поточного аналізу стану об'єкта керування таких значень керуючих змінних, реалізація яких забезпечує досягнення заданої поведінки або необхідного стану керованої системи. На сучасному етапі для розв'язання відповідних задач застосовується загальна теорія керування, на основі якої розроблено широкий спектр алгоритмів, що дають змогу формулювати оптимальні закони керування для об'єктів різної фізичної природи.

Найбільш типовим прикладом моделі керування є система, що використовує ПІД-регулятори. Алгоритм їх роботи ґрунтується на порівнянні вихідних параметрів об'єкта керування із заданими значеннями та визначенні величини відхилення між ними, тобто похибки, яка слугує основою для формування керуючого впливу.

Одним із основних недоліків ПІД-контролерів є припущення про лінійний характер взаємозв'язку між вхідними та вихідними змінними керованого процесу. Це суттєво обмежує адекватність моделі під час розв'язання складних прикладних задач, у яких об'єкти мають виражену нелінійну динаміку.

Ще однією істотною вадою такої моделі є значна обчислювальна складність реалізації алгоритмів керування, що може зумовлювати небажані часові затримки у формуванні керуючих дій, особливо в системах, для яких характерна висока швидкість зміни вихідних параметрів.

Розроблення нечітких моделей і систем у процесі проєктування здійснюється із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення для нечіткого моделювання, зокрема Fuzzy Logic Toolbox.

Архітектура (модель) системи нечіткого керування базується на заміні традиційної системи автоматичного керування системою нечіткого виведення (FIS,

Fuzzy Inference System), яка забезпечує формування керуючих дій на основі нечітких правил і логічних висновків [4].

В процесі побудови системи автоматичного керування, котра включає нечітку модель, правила повинні формуватися на основі апріорної інформації, котра носить якісний характер та виходячи із наявного досвіду та кваліфікації експертів.

Наявні методи, які призначені для корекції певного нечіткого відношення можуть умовно бути розбиті на певні два напрямки. Характерною рисою першого напрямку являється корекція нечіткого відношення на базі вибору правил самою системою автоматичного керування із бази заданих варіантів. Характерною рисою другого напрямку є використання даних, котрі одержані безпосередньо від об'єкта у процесі керування [5].

### **1.3. Постановка завдання на магістерську роботу**

Після ґрунтовного огляду наявних підходів а також шляхів реалізації систем нечіткого проектування, моделювання, контролю та керування сформуємо задачі для магістерської роботи:

1. Провести аналіз ГПА як об'єкта автоматизації а також визначити динамічні властивості головних каналів автоматичного регулювання, визначити якісні показники регулювання як з застосуванням традиційних регуляторів так само з застосуванням новітніх технологій автоматичного контролю і керування.

2. Побудувати систему автоматичного керування об'єктом на основі застосування нечіткої логіки.

3. Налаштувати нечіткі контролери з метою керування об'єктом у системі автоматичного керування.

Провести імітаційне моделювання та аналіз результатів роботи нечітких контролерів.

### **Висновки до розділу 1**

Виконано огляд та аналіз систем керування а також контролю із застосуванням методів нечіткої логіки. Виконано аналіз способів керування газоперекачувальним агрегатом як з застосуванням класичних так і сучасних технологій та методів, що відповідно дало змогу визначити найефективніший спосіб автоматичного керування.

## РОЗДІЛ 2

### СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ

Для створення та дослідження системи автоматичного регулювання використовуємо підпрограму Simulink програмного пакету MATLAB.

Simulink - пакет програм для моделювання, проведення розрахунків і аналізу динамічних систем. Simulink забезпечує високоякісний графічний інтерфейс користувача для створення моделей систем у вигляді блок-схем, використовуючи дії маніпулятора “натискання і перенесення”. Simulink включає багатофункціональну бібліотеку блоків виводу результатів розрахунку, велику бібліотеку різноманітних джерел, лінійних і нелінійних елементів, з’єднань, засобів зв’язку і запису, структур, функцій тощо.

Для запуску Simulink необхідно спочатку запустити MATLAB після цього розпочати роботу Simulink можна двома шляхами:

- натиснути ліву клавішу “мишки” на іконці Simulink інструментальної панелі MATLAB;
- набрати команду `simulink` в командному рядку пакета MATLAB і натиснути клавішу “Ввід”.

Використання Scope та інших блоків виводу інформаційних потоків дає змогу отримати результати моделювання під час розрахунків.

Для створення будь-якої моделі в Simulink необхідно дотримуватись загальноприйнятого і обов’язкового алгоритму:

- відкрити нове вікно для створення моделі;
- помістити в нього блоки, що формуватимуть модель;
- з’єднати порти вводу та виводу блоків за допомогою ліній зв’язку за принциповою схемою моделі;
- задати чіткі та коректні параметри елементів моделі;
- помістити у вікно моделі блоки виводу результатів розрахунку;
- за допомогою відгалужень подати сигнали з відповідних точок схеми на

входи блоків виводу результатів та ліній зв'язку;

- задати параметри моделювання і, якщо необхідно, задати опції виводу результатів розрахунку;

- зберегти модель системи у вигляді файлу моделі;

- запустити симуляцію моделювання.

Магістральний трубопровід представляє собою складну динамічну систему, яка містить пасивні (лінійні ділянки трубопроводів) та активні (КС) елементи. Структурна схема компресорної станції з прилеглими трубопроводами представлена на рисунку 2.1.

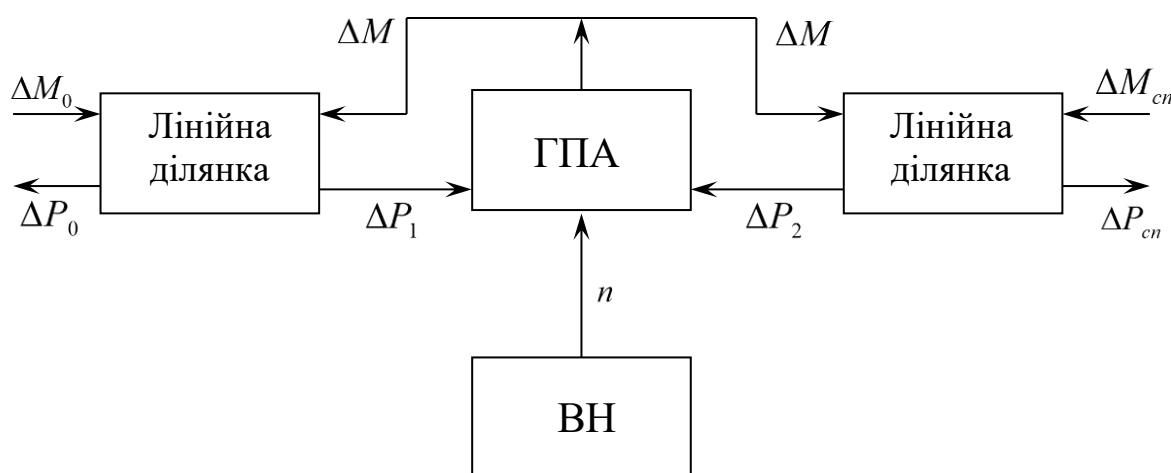


Рис. 2.1. Структурна схема компресорної станції з прилеглими трубопроводами:  $\Delta M_0$ ,  $\Delta M_{cn}$ ,  $\Delta M$  - відносна зміна масової витрати;  $\Delta P_0$ ,  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_{cn}$  - відносна зміна тиску;  $n$  - оберти нагнітача

Нестационарний потік газу в трубопроводі математично можна описати з допомогою системи диференціальних рівнянь в частинних похідних. Такими рівняннями є рівняння нерозривності течії, яке описує закон збереження маси, а також рівняння руху, яке можна вивести із закону Ньютона наступним чином:

$$S \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} = 0, \quad (2.1)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\lambda \cdot w^2}{2 \cdot D} \cdot \rho = \rho \cdot \left( \frac{\partial w}{\partial t} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (2.2)$$

де  $S$  - поперечний переріз трубопроводу, м<sup>2</sup>;

$\rho$  - густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$m$  - маса газу, кг;

$x$  - координата довжини;

$t$  - час;

$P$  - тиск, МПа;

$D$  - діаметр трубопроводу, м;

$\lambda$  - коефіцієнт гідравлічного опору;

$w$  - середня швидкість газу, м/с.

Виконавши перетворення Лапласа для випадку, коли гідравлічний опір трубопроводу незначний і малий перепад висот, отримано шукану залежність динаміки відносних змін тиску та потоку на початку та в кінці трубопроводу:

$$\begin{aligned}\Delta M_2 &= F_1(s)\Delta M_1 - F_2(s)\Delta P_1, \\ \Delta P_2 &= -F_3(s)\Delta M_1 + F_4(s)\Delta P_1.\end{aligned}\quad (2.3)$$

Рівняння виражають відносну зміну  $\Delta M_2$  та  $\Delta P_2$  в кінці трубопроводу в залежності від зміни  $\Delta M_1$  та  $\Delta P_1$  на його початку. На кожному кінці трубопроводу одну величину потрібно вважати залежною (вихідною), іншу - незалежною (вхідною).

Для нашого випадку (рисунок 2.2.) ми отримали співвідношення:

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= W_{P1M1}(s)\Delta M_1 - W_{P1M2}(s)\Delta M_2, \\ \Delta P_2 &= W_{P2M1}(s)\Delta M_1 - W_{P2M2}(s)\Delta M_2, \\ W_{P1M2}(s) &= \frac{1}{bs}, \\ W_{P2M1}(s) &= \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \frac{1}{bs}, \\ W_{P1M1}(s) &= \frac{1+as}{bs}, \\ W_{P2M2}(s) &= \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \frac{1+cs}{bs},\end{aligned}\quad (2.4)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - параметри моделі;

$\varepsilon$  - степінь стискування.

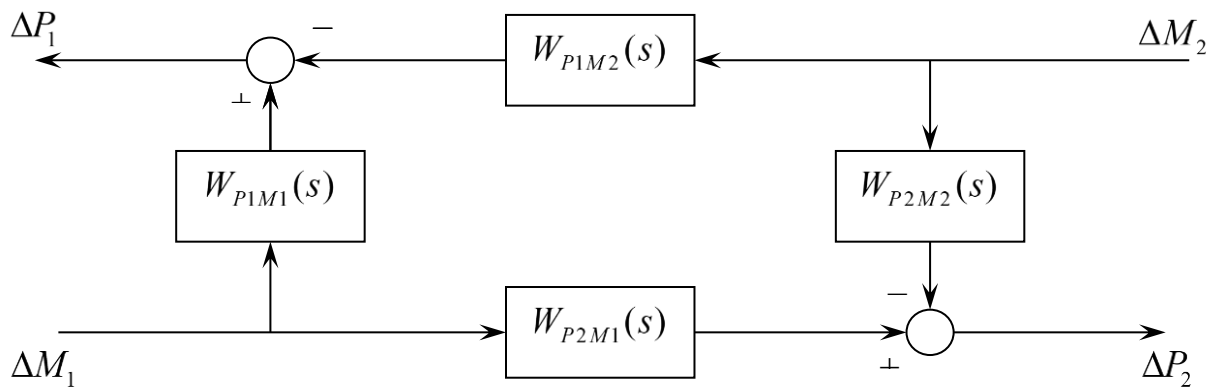


Рис. 2.2. Структурна схема трубопроводу

При параметрах трубопроводу:  $D=1.42$  м.;  $L=100$  км. (довжина трубопроводу);  $\rho=38,455$  кг/м<sup>3</sup>;  $P_1=5.1$  МПа;  $P_2=7.75$  МПа;  $M_0=73.24$  кг/с, отримаємо  $a=2.768 \cdot 10^4$ ,  $b=9.361 \cdot 10^4$ ,  $c=2.436 \cdot 10^4$ ,  $\varepsilon=0.658$  [11].

Отже, модель в Simulink лінійної ділянки трубопроводу матиме вигляд:

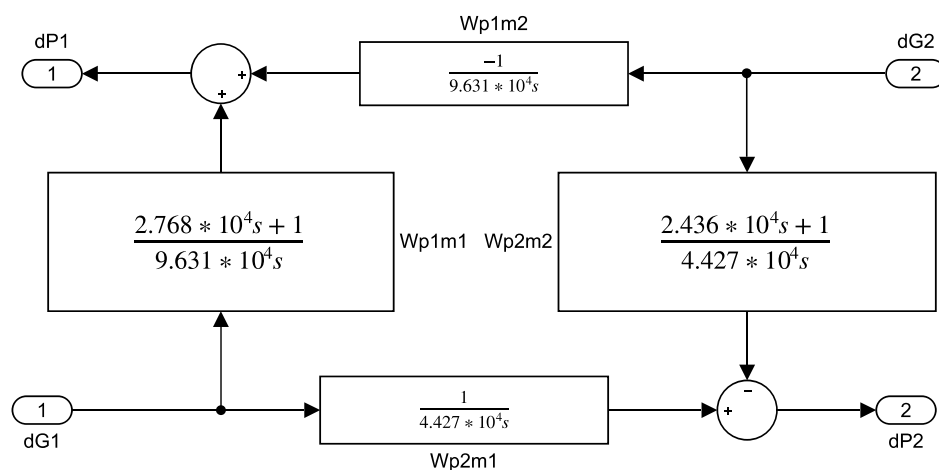


Рис. 2.3. Модель в Simulink лінійної ділянки трубопроводу

Для відтворення нелінійної газодинамічної характеристики нагнітача необхідно використовувати поточні значення параметрів, а не їх приріст. З цією метою прирости параметрів сумуються в моделі компресорної станції (рисунок 2.4.) з початковими значеннями відповідних параметрів. Модель КС формує приріст масової витрати газу.

Тиск на вході компресорної станції  $P_1$  знаходиться як сума початкового тиску  $P_{01}$  і приросту тиску  $\Delta P_1$ . Відповідно знадиться і тиск  $P_{02}$  на виході КС. Степінь стискування  $\varepsilon$  визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.5)$$

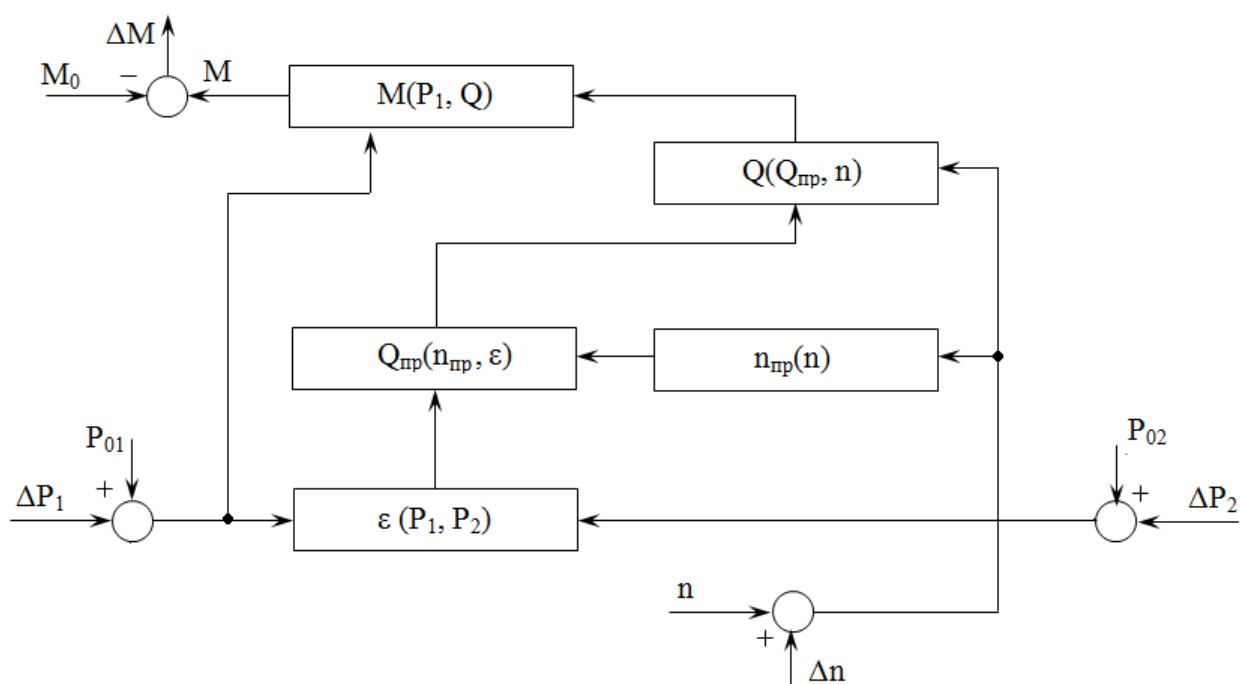


Рис. 2.4. Структурна схема ГПА

Для розрахунку витрати нам потрібно розрахувати приведену частоту обертів валу нагнітача за формулою:

$$n_{np} = \frac{n}{n_o} \cdot \sqrt{\frac{z_{np} \cdot R_{np} \cdot T_{np}}{z \cdot R \cdot T}}, \quad (2.6)$$

де  $z_{np}$ ,  $R_{np}$ ,  $T_{np}$  - приведені характеристики для нагнітача, приймаємо рівні

$$z_{np} = 0,9, \quad R_{np} = 508,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad T_{np} = 288 \text{К};$$

$z$  - степінь стискування газу, приймаємо  $z = 0,918$  [12];

$$R - \text{газова стала } R = \frac{8314}{16,34} = 508,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ [12];}$$

$T$  - температура газу,  $K$ .

Приведена витрата газу є функцією степеня стискування  $\varepsilon$  та приведених обертів нагнітача  $n_{np}$ . Для визначення цієї залежності було проведено апроксимацію реальних даних роботи нагнітача PCL-804-2 [11]:

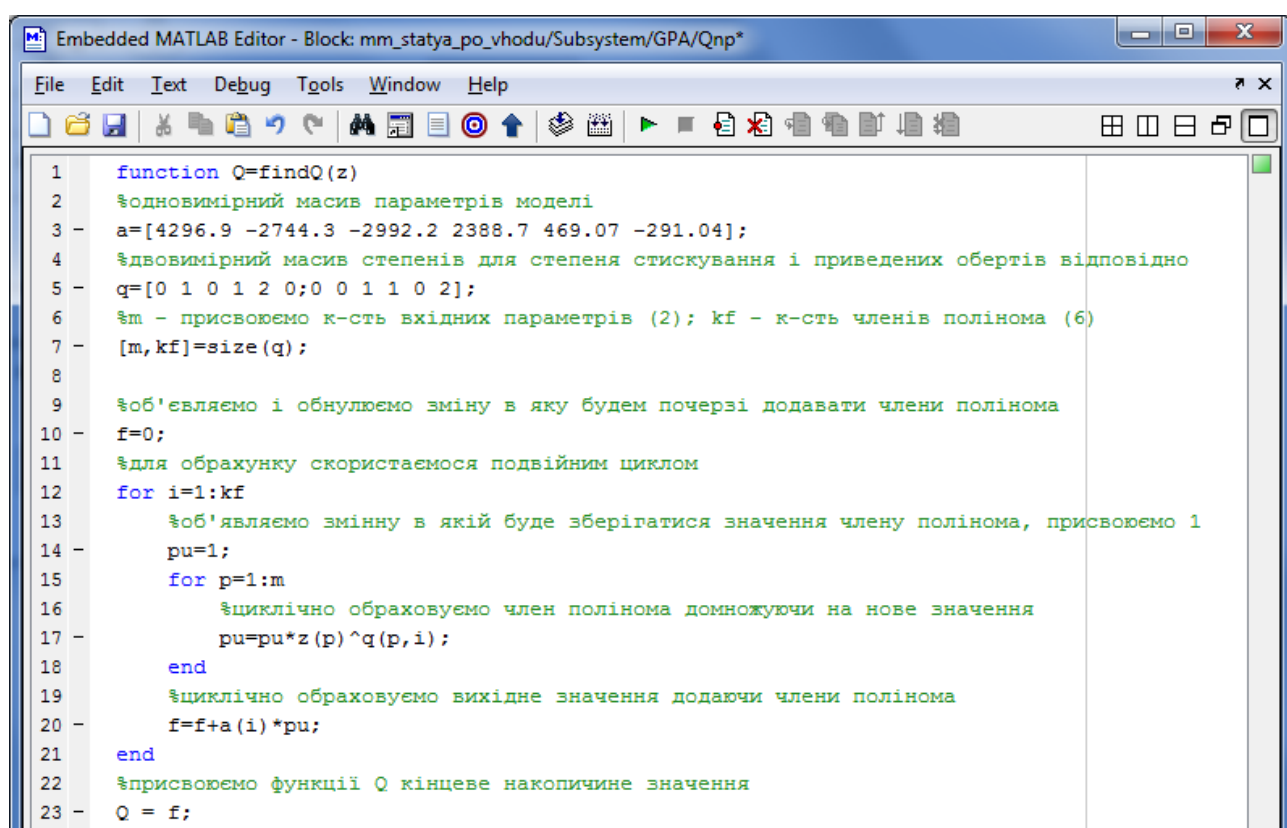
$$Q_{np} = \sum_{i=0}^m a_i \cdot n_{np}^{k_i} \cdot \varepsilon^i, \quad (2.7)$$

де  $Q_{np}$  - приведена витрата;

$a_i$  - параметри моделі;

$m$  - порядок полінома.

Для обрахунку цієї функціональної залежності в середовищі Simulink скористаємося блоком “Embedded MATLAB Function”, який дозволяє вбудувати програмні функції середовища Matlab. Даний блок буде мати вигляд як на рисунку 2.5.



```

1 function Q=findQ(z)
2 %одновимірний масив параметрів моделі
3 a=[4296.9 -2744.3 -2992.2 2388.7 469.07 -291.04];
4 %двовимірний масив степенів для степеня стискування і приведених обертів відповідно
5 q=[0 1 0 1 2 0;0 0 1 1 0 2];
6 %m - присвоюємо k-сть вхідних параметрів (2); kf - k-сть членів полінома (6)
7 [m,kf]=size(q);
8
9 %об'євляємо і обнулюємо змінну в яку будемо почерзі додавати члени полінома
10 f=0;
11 %для обрахунку скористаємося подвійним циклом
12 for i=1:kf
13     %об'євляємо змінну в якій буде зберігатися значення члену полінома, присвоюємо 1
14     pu=1;
15     for p=1:m
16         %циклічно обраховуємо член полінома домножуючи на нове значення
17         pu=pu*z(p)^q(p,i);
18     end
19     %циклічно обраховуємо вихідне значення додаючи члени полінома
20     f=f+a(i)*pu;
21 end
22 %присвоюємо функції Q кінцеве накопичене значення
23 Q = f;

```

Рис. 2.5. Функція для обрахунку полінома приведеної витрати запрограмована на виконання в середовищі Matlab

Об'ємну витрату визначимо виходячи із приведеної витрати і обертів нагнітача, за формулою:

$$Q = \frac{n}{n_0} Q_{np}, \quad (2.7)$$

де  $n_0$  - номінальні оберти відцентрового нагнітача;

$n$  - поточні оберти.

Масова витрата газу, який проходить через КС визначається залежністю:

$$M = \frac{P_1 Q}{RT_H}, \quad (2.8)$$

де  $M$  - масова витрата газу, кг/с;

$P_1$  - тиск на вході КС, МПа;

$Q$  - об'ємна витрата, м<sup>3</sup>/с;

$R$  - газова стала, для газу  $R = 510 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

$T_H$  - температура перед нагнітачем, К.

Скористаємося передавальною функцією, яка зв'язує степінь відкриття газорегулюючого клапану і приріст швидкості обертання відцентрового нагнітача, на основі проведеної ідентифікації. Дані взяті для ідентифікації об'єкта зняті з робочих характеристик турбіни ГТК-10 [13]:

$$W_0(s) = \frac{T_z \cdot s + 1}{s \cdot (T_{p_1} \cdot s + 1) \cdot (T_{p_2} \cdot s + 1) \cdot (T_{p_3} \cdot s + 1)}. \quad (2.9)$$

Підставивши в (2.9) наступні дані  $T_{p_1} = 53,199$ ;  $T_{p_2} = 56,783$ ;  $T_{p_3} = 50,839$ ;  $T_z = -4496,8$ ;  $k = 0.0011115$ , отримаємо:

$$W_0(s) = \frac{-4496,8 \cdot s + 1}{s \cdot (53,199 \cdot s + 1) \cdot (56,783 \cdot s + 1) \cdot (50,839 \cdot s + 1)}. \quad (2.10)$$

Змодельовавши отримані залежності і передавальні функції в програмному пакеті Simulink отримаємо наступний вигляд моделі газоперекачувального агрегату, рисунок 2.6. Так як дана модель є досить складною і час її симуляції триває від декількох хвилин до декількох годин (в залежності від параметрів регулятора), то цілком доцільно проводити моніторинг проміжних значень. Для цього використаємо блоки "Display", які для зручності спостереження підписуємо відповідно до змінних до яких вони прикріплені. По завершенню симуляції необхідно оцінити перехідний процес по основних параметрах моделі, кількість обертів відцентрового нагнітача, тиску на вході та виході з ГПА. Для

цього ці параметри а також величину збурення передамо на вхід блока “Score”, який графічного покаже зміну перехідного процесу.

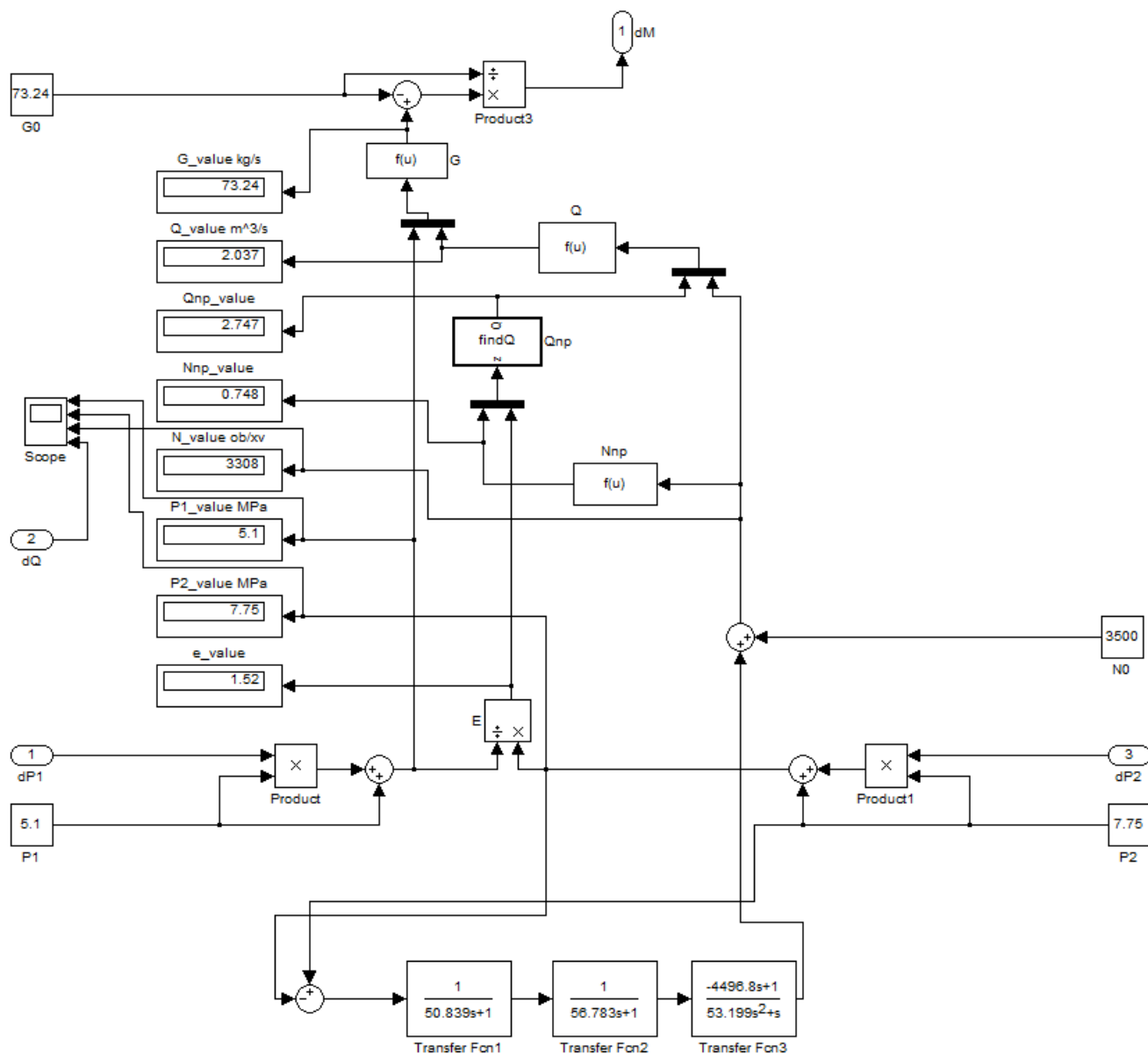


Рис. 2.6. Модель в Simulink ГПА

Загальний вигляд змодельованого об’єкту (вхідний трубопровід + ГПА + вихідний трубопровід) в пакеті Simulink, програмного продукту MATLAB, представлений на рисунку 2.7. Ділянки трубопроводів до та після КС представлені блоками Pipeline In та Pipeline Out відповідно. Блок GPA відображає модель ГПА. Для імітації збурення по витраті на кінцях трубопроводу скористаємося блоком “Signal Builder”, в якому створимо два графіка: із додатнім і від’ємним збуренням рисунок 2.8. Для аналізу моделі додатково проведемо моніторинг величин

збурення по тиску на кінцях трубопроводу і витраті ГПА.

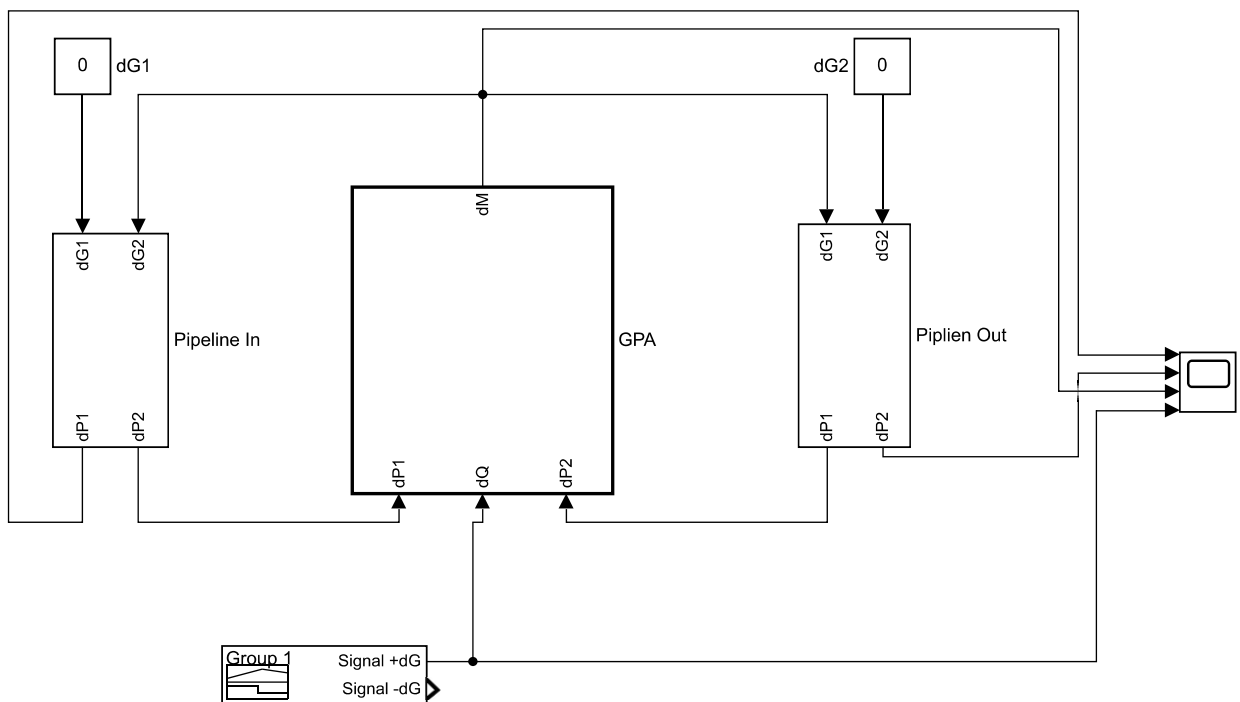


Рис. 2.7. Модель в Simulink компресорної станції з прилеглими трубопроводами

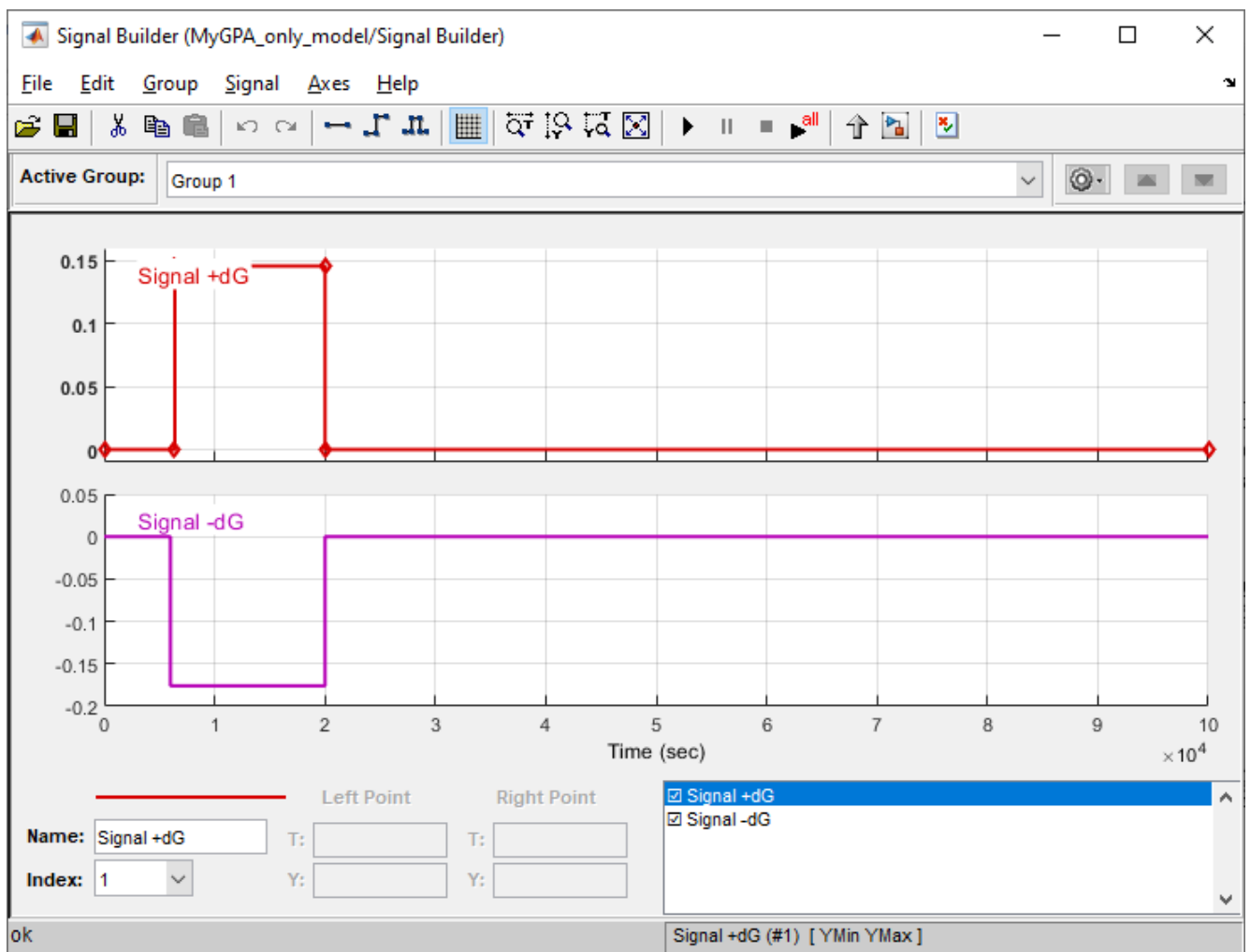


Рис. 2.8. Графіки збурень створені за допомогою Signal Builder

При моделюванні даної САР використали ще такі блоки:

- Constant і step (для створення завдання).
- Sum (для порівняння сигналу завдання і регульованої величини).
- PID Controller (для моделювання ПІД-регулятора).
- Fuzzy Logic Controller (для моделювання нечіткого регулятора системи).
- Transfer Fcn (для моделювання передавальної функції об'єкта).
- Scope і Display (для виводу результату в графічній формі, осцилограф).
- Derivative (для диференціювання сигналу по часу).
- Subsystem (для створення підсистем).
- Product (для множення або ділення входів).
- Embedded MATLAB Function (для запису програм).
- Fcn (для формування математичних функцій).
- Mux (для об'єднання скалярних сигналів у вектор).

## **Висновки до розділу 2**

В даному розділі була синтезована модель газоперекачувального агрегату, що надало змогу здійснити імітаційне моделювання. У процесі створення моделі використано базові блоки підпрограми Simulink. Також при створенні моделі були використані рівняння нерозривності течії, яке виражає закон для збереження маси, а також рівняння руху, котре витікає з закону Ньютона.

## РОЗДІЛ 3

### СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ТРУБОПРОВОДІ

Останнім часом усебільше відбувається розвиток а також практичне застосування нечітких систем з ціллю управління та регулювання багатьох систем, а також технічних об'єктів.

Головними перевагами нечіткої логіки, котрі можна легко побачити у процесі нечіткого управління є те, що нечітка логіка дає можливість вдало представляти мислення людини, тобто методи прийняття рішень людиною, та методи моделювання складних об'єктів керування засобами природної мови.

Використання теорії нечітких множин у процесі проектування регуляторів дає можливість підвищення їхнього “інтелекту”, наблизивши його до людського інтелекту. Інтелектуалізація нечітких регуляторів являється однією із головних проблем сучасної теорії автоматичного керування.

Для реалізації процесу керування на основі теорії нечітких множин та нечіткої логіки потрібен пристрій, який формує керуючі дії (впливи) на об'єкт керування - це нечіткий регулятор (регулятор, який працює на основі нечіткої логіки). В роботі розглядається структура системи керування з нечітким регулятором.

#### **3.1. Теоретичні засади та специфіка керування на основі теорії нечітких множин**

В даному розділі розглянуто основні підходи і основи процесу формування, програмування, налаштування, синтезу та роботи систем автоматичного керування на основі нечіткої логіки (фазі-логіки).

Етапи нечіткого виведення можуть реалізовуватись неоднозначним чином, оскільки вони включають у себе певні окремі параметри, котрі мають бути фіксованими або специфікованими [4]. У такому випадку вибір певних конкретних варіантів параметрів для кожного із етапів визначає деякий алгоритм, котрий у

повному об'ємі реалізує нечіткий вивід в системах правил нечітких продукцій. В наш час запропоновано декілька алгоритмів нечіткого виводу. Певні із них дістали найбільше застосування у нечітких системах керування:

- алгоритм Мамдані (Mamdani) представляє собою один із перших алгоритмів, котрий отримав використання у нечітких системах контролю та керування;

- алгоритм Ларсена (Larsen);

- алгоритм Цукамото (Tsukamoto);

- спрощений алгоритм нечіткого виводу;

- алгоритм Сугено (Sugeno), який запропонували Сугено та Такагі.

Нечітке виведення - це процес формування відображення від заданого входу до виходу, використовуючи нечітку логіку. Відображення забезпечує основу, на базі якої можуть бути прийняті ті чи інші рішення.

Нечіткий процес виведення складається з таких компонентів, як функції належності, нечіткі логічні оператори та правила імплікації. Як зазначено в джерелі [6], у рамках нечіткого логічного середовища можуть бути реалізовані два основні типи систем нечіткого виведення: системи Mamdani та Sugeno. Ці два типи інференц систем в деякій мірі змінюються за способом, яким визначаються виходи систем. Описи цих двох типів нечітких інференц систем можуть бути знайдені в бібліографічних посиланнях.

Нечіткі інференц системи були успішно застосовані в таких галузях, як автоматичне керування, класифікації даних, аналіз рішень, експертні системи, машинне бачення, технічні пристрої та побутові прилади (від систем автомобілів та метрополітену до відеокамер, пральних машинок, персональних комп'ютерів та фотоапаратів). Через їх багатопрофільний характер нечіткі інференц системи пов'язані з безліччю назв, що поширюються – таких як системи засновані на нечітких правилах, нечіткі експертні системи, нечітке моделювання, фазі системи, нечітка асоціативна пам'ять, нечіткі логічні контролери, і просто нечіткі системи.

Нечіткий інференц метод Mamdani являється найбільш звичною нечіткою методологією, яка використовується. Методологія Mamdani була серед перших

сформованих систем для керування, котрі використовували теорію нечітких множин. Запропоновано це було у 1975 Ебрагімом Мамдані як метод керування паровим механізмом шляхом синтезу набору лінгвістичних правил керування, які отримані від досвідчених операторів. Спроби Ебрагіма Мамдані базувалися на документі Лотфі А. Заде (1973) та на нечітких алгоритмах, які призначені для складних систем та вирішальних процесів. Незважаючи на те, що інференц процес, який ми описуємо, відрізняється від описаних у первісному документі методів його основна ідея являється аналогічною.

Mamdani-тип потребує, щоб вихідні функції належності були нечіткими множинами. Sugeno-тип також підтримує цей тип моделі, але також може використовуватися, щоб проводити моделювати будь-якої інференц системи, у якій вихідні функції належності являються тільки лінійними або постійними. Sugeno система надає себе використанню адаптивних методів для того, щоб створити нечіткі моделі, оскільки вона є більш компактніша й в обчислювальному відношенні ефективніше представлена ніж система Mamdani. Ці адаптивні методи можуть використовуватися, щоб настроїти функції належності так, щоб нечіткі системи найкраще моделювали дані.

Переваги Sugeno методу:

- ефективніший в обчислювальному відношенні;
- добре працює з лінійними методами;
- добре працює з оптимізацією й адаптивними методами;
- гарантує безперервність вихідної поверхні;
- добре підходить до математичного аналізу.

Переваги Mamdani методу:

- володіє інтуїцією;
- має широко розповсюджене прийняття;
- добре підходить до людського введення.

Основна ідея цих нейро-адаптивних способів вивчення дуже проста. Ці способи забезпечують метод для нечіткої процедури моделювання, щоб вивчити інформацію про множину даних для того, щоб обчислити параметри функції

належності, які найкраще дозволяють об'єднаний нечіткій інференц системі простежувати вхідні/вихідні дані. Цей метод вивчення працює подібно до нейронних мереж.

### **3.2. Розробка регулятора на основі методів нечіткої логіки**

Перше знайомство з нечіткою логікою було наведене ще в першому розділі магістерської роботи.

Логіка являється найбільш теоретичною і точною наукою. Більшість науковців продовжують притримуватись даної думки про строгість логіки. Водночас класична (булева) логіка має один, але надзвичайно суттєвий недолік, а саме з її допомогою неможливо здійснити опис асоціативного мислення людини. Як відомо класична логіка користується тільки двома поняттями, а саме “Істина” і “Хибність”, водночас виключаючи будь-які проміжні значення. Натомість булева логіка не оперує нічим крім нулів та одиниць. Дані методи добре підходять для обчислювальних машин, але описати увесь оточуючий нас світ тільки у білому чи чорному кольорі, в той самий час виключивши усі можливі відповіді на різні питання, крім відповідей “Так” та “Ні”.

Фазі-логіка якраз займається рішенням цієї проблеми. Термін “лінгвістична змінна” може бути зв'язаний з будь-якою фізичною величиною, для якої нам потрібно мати більше значень ніж тільки значення “так” та “ні”.

#### **3.2.1. Алгоритм формування нечіткого проекту**

Фазі-проект. В процесі проектування системи керування, що побудована на базі теорії фазі-логіки, зазвичай розробляють так званий фазі-проект. У фазі-проекті виділено об'єкти.

Дивлячись з точки зору об'єктно-орієнтованого програмування об'єкт має об'єднувати в пам'яті дані та функції. Дані представляють собою інформацію, а функції є операціями, які відповідно працюють з цими даними.

На рисунку 3.1 представлені потоки даних, що ілюструють тісний зв'язок фазіфікації та дефазіфікації з користувачем. Інформація проходить послідовну логічну обробку від етапу фазіфікації до етапу дефазіфікації. Далі буде розглянуто функціональне призначення кожної з фаз цього процесу.

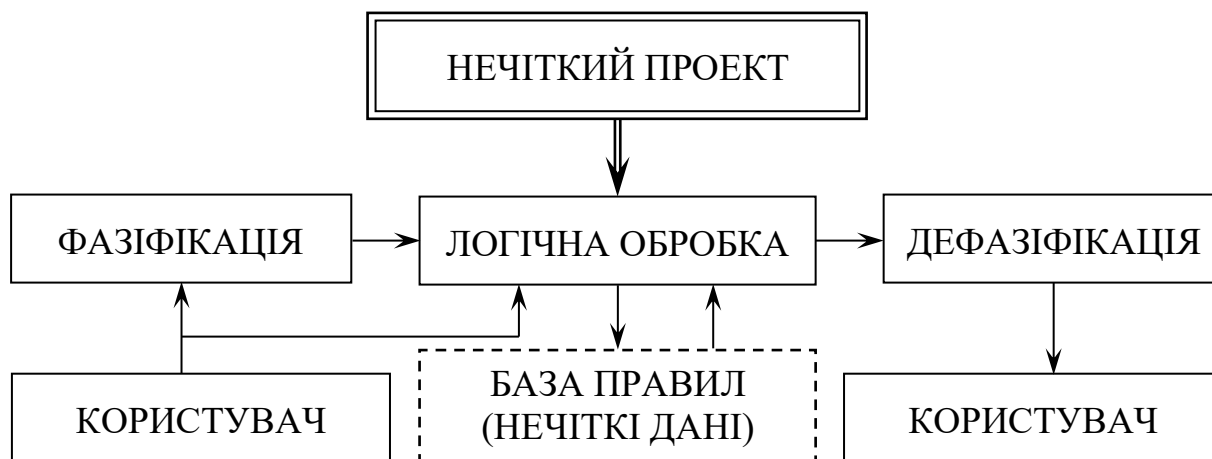


Рис. 3.1. Архітектура системи нечіткого моделювання

Фазіфікація. Як було сказано вище об'єкт представляє собою дані та функції. Розпочнемо з даних. Зробимо припущення, що ми вимірюємо тиск в трубопроводі. Одиниця вимірювання - МПа. Наприклад - 7,75 МПа нечітко відображає на скільки великий тиск в трубопроводі. Дані фазіфікації мають бути більш виразними, а не характеризуватися тільки певною величиною і одиницею вимірювання.

Можна підсумувати, що фазіфікуванню підлягає майже все, що може мати множини станів будь-якої форми.

Якщо говорити яку роль виконують функції то функцією може бути певна перевірка деяких нечітких даних на допустимість. Наявні нечіткі діапазони допускають перетинання або взагалі порожні невизначені інтервали, але це усе являється винятком. Зазвичай якщо проводиться вимірювання, то вимірювана величина має входити хочаб у один із нечітких діапазонів.

На рисунку 3.1 наведено, що потік даних до логічної обробки представляє собою результат фазіфікації.

Логічна обробка. Дані для логічної обробки надходять і від фазіфікації і від користувача. Дані, які надходять від фазіфікації являють собою нечіткі діапазони. Вхідні дані від користувача надходять у формі правил, що мають наступну

структуру:

**Якщо <фазіфікація> справедлива, то <вихідний нечіткий діапазон> активний**

У правилах відображено експертні знання щодо дій, які слід виконати у випадку реалізації певних властивостей, визначених на етапі фазіфікації. Ці правила забезпечують взаємозв'язок між даними фазіфікації та інформацією логічної обробки, представляючи собою нечіткі висловлювання. Операція «Якщо – То – Дія» оперує нечіткими даними, тому навіть у разі застосування чітких правил кінцевий результат завжди має нечіткий характер.

Логічні оператори виконують обчислювальні операції над даними, тоді як логічна обробка реалізує оцінку множини правил. У деяких випадках активними можуть бути декілька правил одночасно, і результати їх застосування необхідно відповідним чином агрегувати. Крім того, частина правила «Якщо» може містити декілька умовних складових, які також потрібно об'єднати перед формуванням активного нечіткого діапазону.

Вхідні дані дефазіфікації являють собою нечіткі діапазони, котрі поступають від логічної обробки та мають таку саму структуру як і дані фазіфікації.

Задача дефазіфікації являється зворотньою задачі фазіфікації. При дефазіфікації перевірка діапазонів не потрібна, оскільки вплив ззовні відсутній, а відповідна логічна обробка надає наперед відомі правильні дані. Отримавши нечіткі діапазони, залишається тільки отримати зрозумілий комп'ютеру і користувачу чіткий результат.

При наявності декількох активних термів у якості вихідного значення приймається проекція центру маси фігури, яка отримана шляхом накладання усіх наявних усічених площин, відповідного результату кожного із активних правил.

### **3.2.2. Методи та підходи до розробки нечітких регуляторів у середовищі MATLAB**

Під формулюванням нечіткого керування (Fuzzy Control (FC)) мається на увазі деяке середовище використання методології теорії нечітких множин а також

нечіткої логіки з метою вирішення практичних завдань автоматичного керування. Нечітке керування появилось як технологія котра повинна бути здатна ефективно розширити можливості автоматизації будь якого виробництва а також призначена для вирішення завдань, які можуть виникати та будуть реалізовані за допомогою використання програмованих контролерів.

Для здійснення процесу нечіткого моделювання в середовищі MATLAB використовується спеціалізований пакет Fuzzy Logic Toolbox. Цей пакет надає користувачу можливість створювати та застосовувати нечіткі моделі у двох основних режимах:

- Інтерактивний режим, який забезпечує розробку та візуалізацію всіх компонентів системи нечіткого виведення за допомогою графічних засобів редагування.

- Режим команд, що дозволяє виконувати необхідні операції шляхом введення відповідних функцій із заданими аргументами безпосередньо у командне вікно MATLAB.

Архітектура а відповідно і модель нечіткого керування реалізується за допомогою заміни класичної системи автоматичного керування іншою системою нечіткого керування, а саме системою нечіткого виведення (Fuzzy Inference System (FIS)).

Для розробки та подальшого використання систем нечіткого виведення в інтерактивному режимі пакет Fuzzy Logic Toolbox (FLT) надає низку графічних інструментів:

- Редактор систем нечіткого виведення FIS (FIS Editor) – забезпечує створення та редагування структур нечіткого регулятора.

- Редактор функцій належності (Membership Function Editor) – дозволяє визначати та модифікувати функції належності в системі нечіткого виведення.

- Редактор правил та програма синтаксичного аналізу (Rule Editor) – призначений для формулювання та перевірки правил нечіткого виведення.

- Переглядач правил і нечітка інференц-діаграма (Rule Viewer) – забезпечує візуалізацію роботи правил та їх впливу на систему.

- Переглядач поверхні вихідних параметрів (Surface Viewer) – надає можливість графічного аналізу залежностей вихідних змінних від вхідних у системі нечіткого виведення.

Окрім зазначених графічних інструментів, пакет Fuzzy Logic Toolbox включає спеціалізовану програму для нечіткої кластеризації методом нечітких с-середніх (fuzzy c-means clustering).

Редактор систем нечіткого виведення FIS (FIS Editor) є ключовим засобом для створення та редагування систем нечіткого виведення у графічному режимі. Він активується командою `{fuzzy}` у командному вікні MATLAB. Цей високорівневий графічний інтерфейс дозволяє користувачу визначати та коригувати властивості інференц-системи нечіткого виведення, включаючи кількість вхідних і вихідних змінних, тип системи нечіткого виведення та метод дефазіфікації.

Графічний інтерфейс цього редактора характеризується високою зручністю та гнучкістю, що забезпечує ефективну інтерактивну роботу з окремими компонентами системи нечіткого виведення [4].

FIS Editor використовується для конфігурування структури фазі-регулятора. Приклад інтерфейсу редактора системи нечіткого виведення наведено на рис. 3.2. У середовищі редактора здійснюється налаштування наступних параметрів системи:

1. Кількість вхідних змінних.
2. Кількість вихідних змінних.
3. Назви вхідних змінних.
4. Назви вихідних змінних.
5. Тип фазі-регулятора (Mamdani або Sugeno).
6. Метод логічного «AND» (and method) (min або prod).
7. Метод логічного «OR» (or method) (max або prod).
8. Метод імплікації (implication) (min або prod).
9. Метод агрегації (aggregation) (max, sum або probor).
10. Метод дефазіфікації (defuzzification) (centroid, bisector, MOM, LOM,

SOM).

Таке налаштування забезпечує гнучку конфігурацію фазі-регулятора та дозволяє адаптувати його поведінку до специфіки конкретної задачі керування.

Інструмент редактора функцій належності у системі нечіткого виведення призначений для призначення функцій належності конкретним вхідним або вихідним змінним, а також для їх редагування. У відповідних полях задаються числові значення робочого діапазону та відображення функцій. Крім того, здійснюється повне налаштування функцій належності робочих величин, включно з їх кількісними та якісними характеристиками. Підтримується 11 типів функцій належності, серед яких трикутна, трапецевидна, узагальнена колоколо-подібна (крива нормального розподілу), одно- та двосторонні криві Гауса, сигмовидна, двосигмовидна, а також  $\pi$ -,  $s$ - та  $z$ -подібні криві.

Для запуску цього інструменту необхідно обрати відповідний пункт у меню Edit або скористатися комбінацією клавіш Ctrl+2. Приклад вікна редактора функцій належності наведено на рис. 3.3.

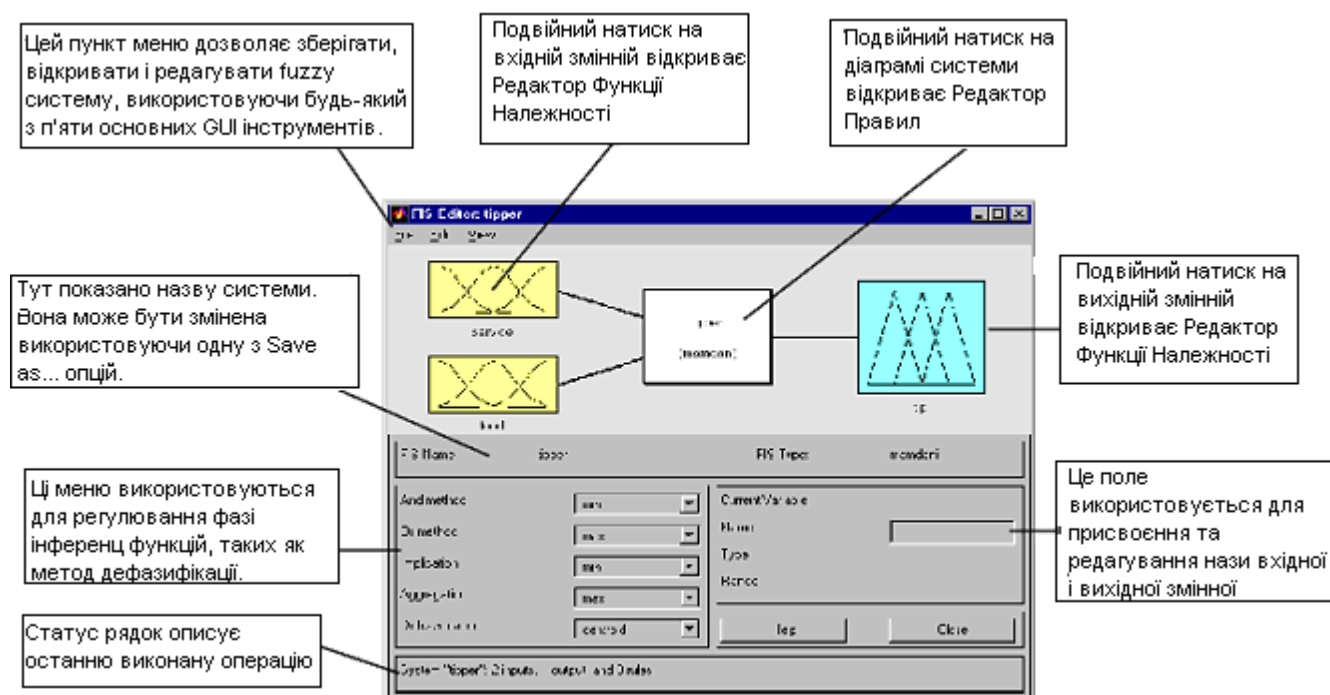


Рис. 3.2. Редактор систем нечіткого виводу

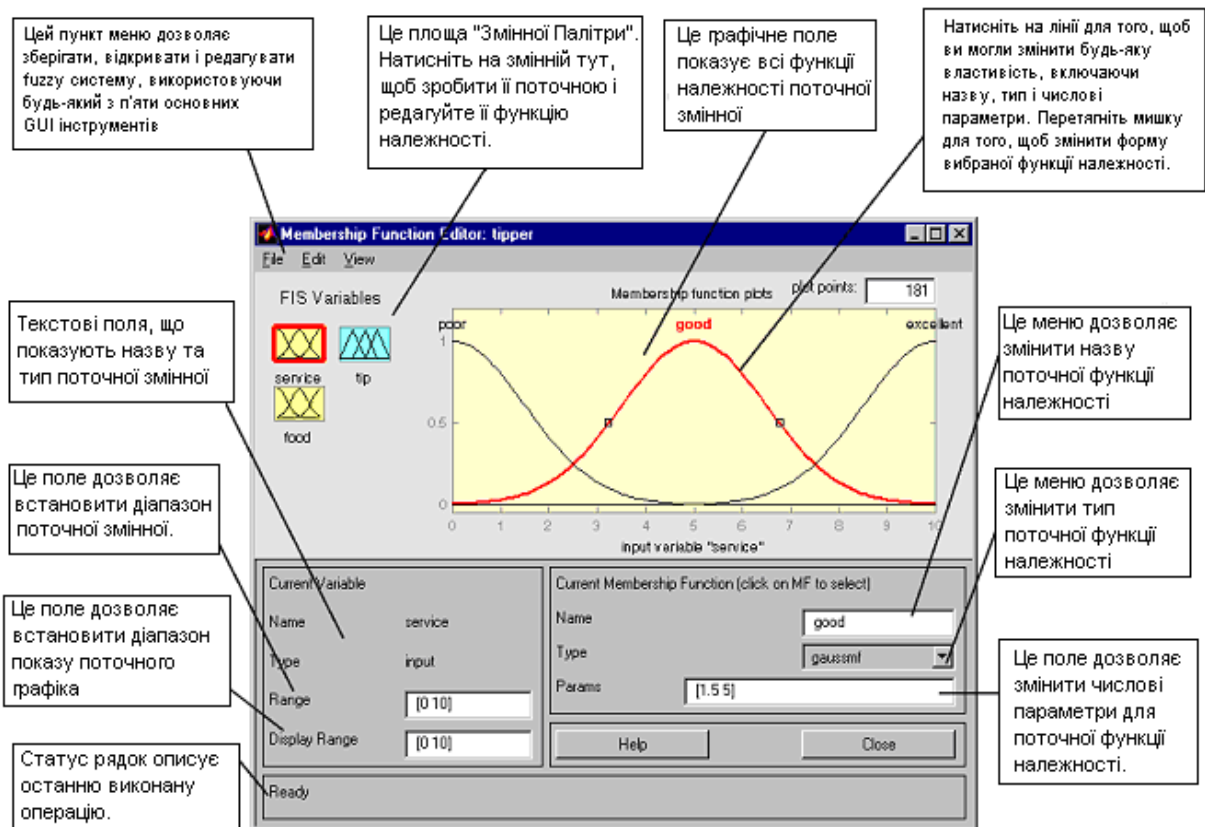


Рис. 3.3. Інструмент для налаштування функцій належності у системі нечіткого виведення

Інструмент редактора правил системи нечіткого виведення разом із програмою синтаксичного аналізу забезпечує створення та модифікацію правил для логічної обробки вхідних та вихідних змінних. Правила формулюються у наступному форматі:

ЯКЩО вхід  $i = \text{терм } l \left\{ \begin{matrix} i \\ \text{або} \end{matrix} \right\}$  вхід  $j = \text{терм } m$  ТОДІ вихід  $k = \text{терм } n$

Запуск цього редактора здійснюється аналогічно попередньому, а його інтерфейс наведено на рис. 3.4.

Інструмент перегляду правил системи нечіткого виведення та нечітка інференц-діаграма (Rule Viewer) призначений для відображення результатів всього процесу нечіткого виведення. Rule Viewer забезпечує інтегровану візуалізацію повного нечіткого процесу та демонструє, як форма функцій належності та сформовані правила впливають на кінцевий результат системи.

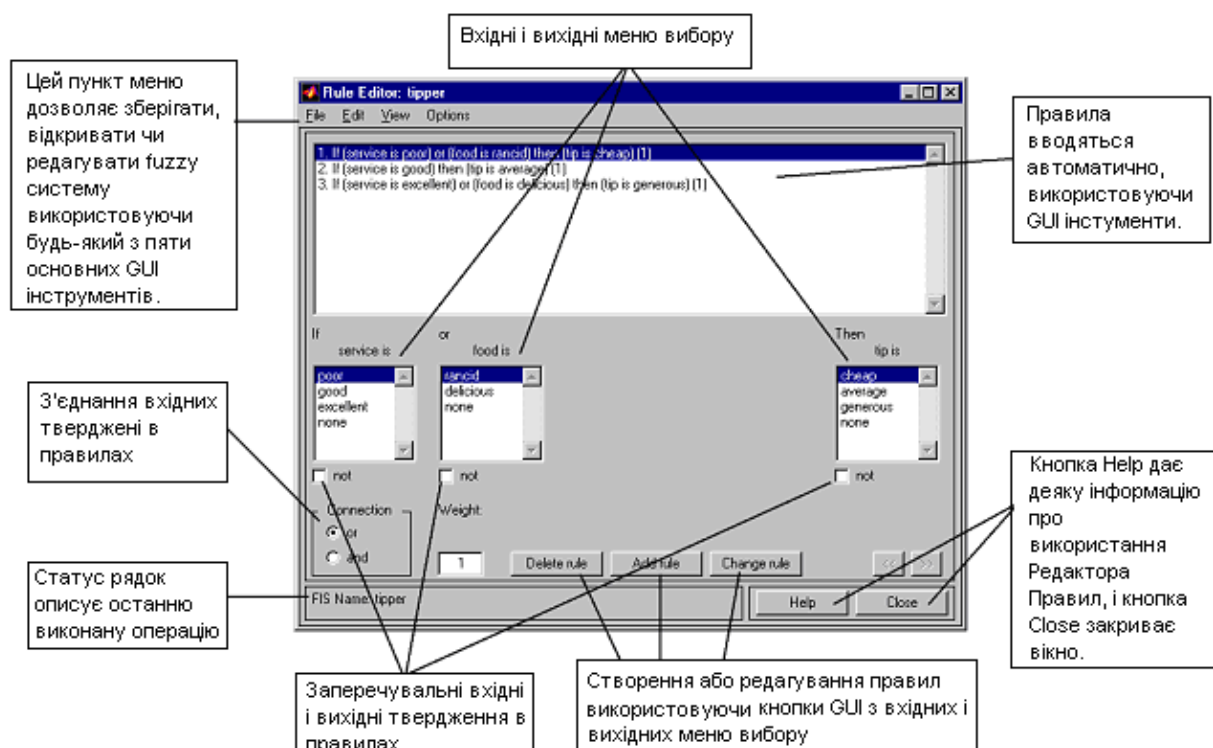


Рис. 3.4. Інструмент для створення та перевірки правил у системі нечіткого виведення

Цей інструмент запускається аналогічно попереднім, а приклад його вікна наведено на рис. 3.5.

У вікні перегляду правил системи нечіткого виведення присутні чотири кнопки управління: left (вліво), right (вправо), down (вниз) та up (вгору), що дозволяють переміщувати побудоване зображення, особливо коли воно виходить за межі видимого поля. Крім того, у вікні передбачено невелике поле "Input", у якому відображаються та можуть задаватися значення вхідних змінних.

Інструмент перегляду правил забезпечує візуалізацію повного процесу нечіткого виведення на основі нечіткої інференц-діаграми. Вікно інструменту містить декілька графіків, де верхні поперечні графіки ілюструють антецедент та результат виконання першого правила. Кожне правило представлено як рядок графіків, а кожен стовпець відповідає окремій змінній: перші два стовпці відображають функції належності вхідних змінних, що відповідають антецеденту або частині «Якщо», тоді як останній стовпець демонструє вихідну діаграму, що відповідає частині «Тоді» кожного правила.

Агрегація результатів усіх правил відбувається в останньому стовпці, а результуючий об'єднаний графік відображається в нижньому правому куті графічного поля. Дефазифіковане вихідне значення представлено товстою лінією, що проходить через об'єднану нечітку множину, наочно демонструючи кінцевий результат нечіткого виведення.

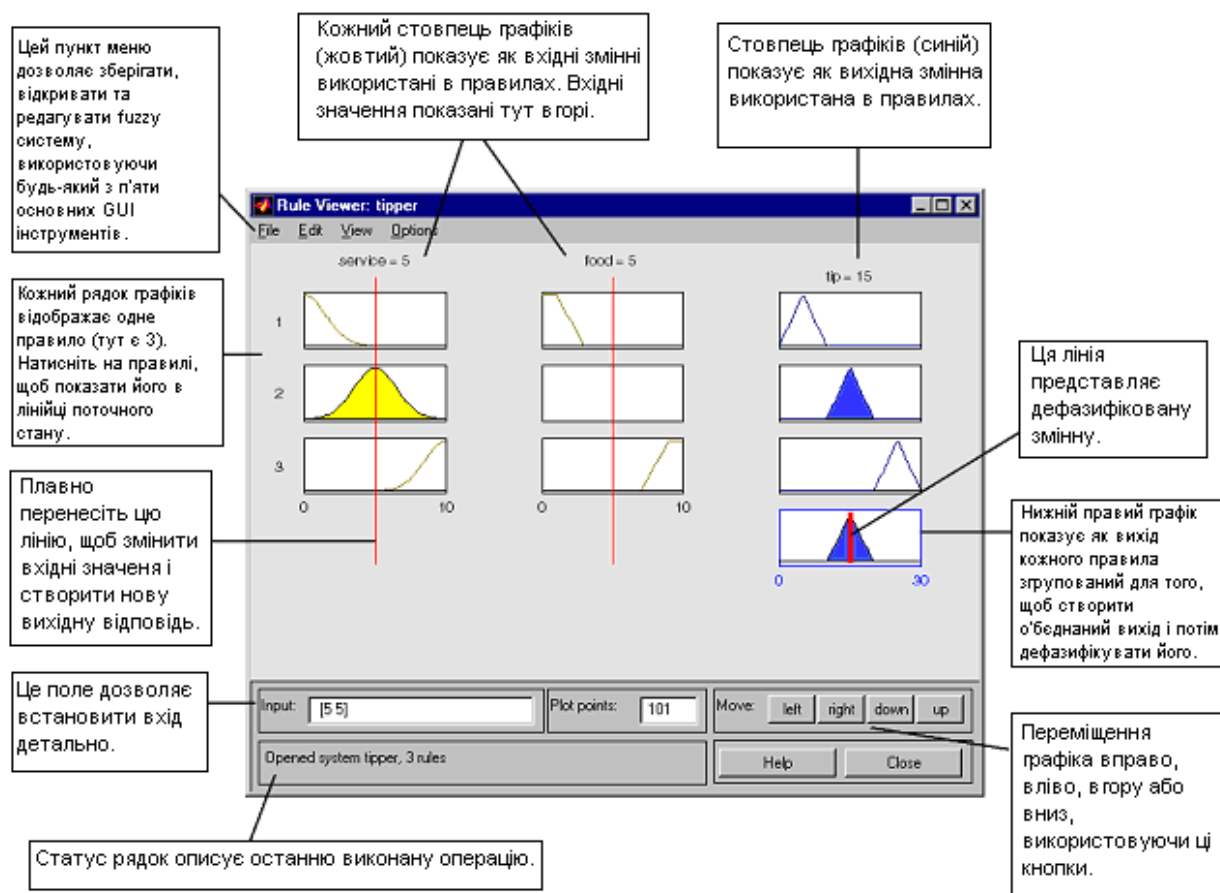


Рис. 3.5. Інструмент для візуалізації правил і нечіткої інференц-діаграми системи виведення

Інструмент перегляду поверхні вихідних параметрів системи нечіткого виведення призначений для тривимірної графічної візуалізації поля керуючого впливу. Його вікно, представлене на рис. 3.6, можна відкрити через меню Edit або за допомогою комбінації клавіш Ctrl+6.

Системи з одним виходом і двома входами демонструють ефективну роботу цього інструменту, оскільки вони формують тривимірні графіки, з якими MATLAB здатен виконувати обробку та візуалізацію на високому рівні точності та якості.

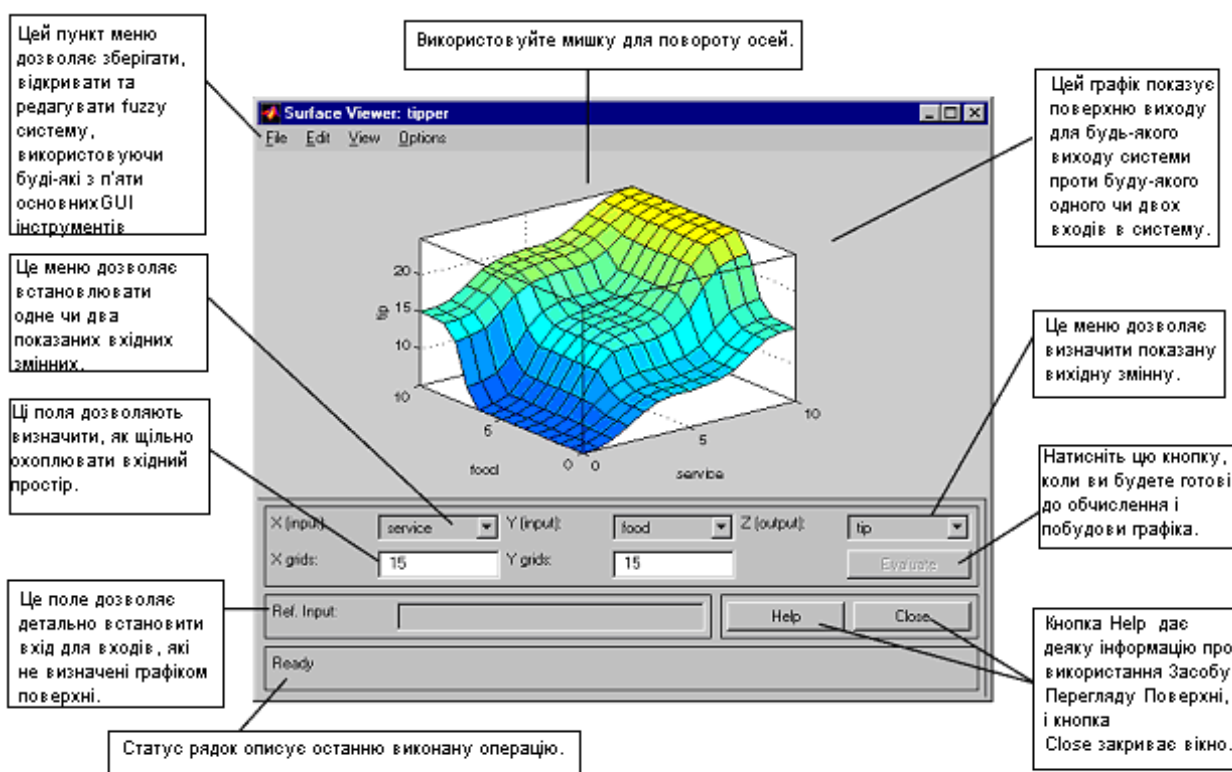


Рис. 3.6. Інструмент для тривимірної візуалізації поверхні вихідних змінних системи нечіткого виведення

Після ознайомлення з основними інструментами розглянемо етап практичної розробки фазі-регулятора.

### 3.3 Методика та процедура конфігурування нечіткого регулятора для контролю тиску в трубопровідній системі

#### 3.3.1 Розробка нечіткого регулятора з П-законом керування

Розробка фазі регулятора являється складним та тривалим процесом. Даний процес потребує особливої уваги а також зосередження зі сторони експертів, та складається із послідовних етапів (кроків проектування). Спочатку проводяться опитування експертів. Наведена вище процедура заключається у задаванні питання експертам, на які вони даватимуть вичерпні відповіді.

## Відповіді технолога на запитання

Запитання	Відповіді
Які входи необхідно взяти для регулятора тиску?	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Сигнал помилки.</li> <li>- Похідну сигналу помилки (швидкість зміни помилки в моменти часу для випереджаючого ефекту).</li> <li>- Інтеграл від сигналу помилки (для більшої точності системи).</li> </ul>
Який вихід необхідно отримати?	Переміщення виконавчого механізму на лінії подачі палива до двигуна (завдання степені відкриття клапану подачі палива).
Оптимальний тиск в трубопроводі?	$P=7,75$ МПа.
Який максимально допустимий тиск в трубопроводі?	$P=8$ МПа.
Який мінімально допустимий тиск в трубопроводі?	$P=7,5$ МПа.
Який максимальний тиск в трубопроводі слід задати для регулятора?	$P=7,81$ МПа.
Який мінімальний тиск в трубопроводі слід задати для регулятора?	$P=7,69$ МПа.
Який тиск вважаємо великим?	$P=7,77$ МПа.
Який тиск вважаємо малим?	$P=7,73$ МПа.
Яке завдання необхідно задати виконавчому механізму, якщо тиск в трубопроводі $P=7,69$ МПа?	Привідкрити клапан на 35%.

Продовження табл. 3.1

Запитання	Відповіді
Яке завдання необхідно задати виконавчому механізму, якщо тиск в трубопроводі $P=7,81$ МПа?	Призакрити клапан на 35%.
Яке завдання необхідно задати виконавчому механізму, якщо тиск в трубопроводі $P=7,73$ МПа?	Привідкрити клапан на 10%.
Яке завдання необхідно задати виконавчому механізму, якщо тиск в трубопроводі $P=7,77$ МПа?	Призакрити клапан на 10%.
Яке завдання необхідно задати виконавчому механізму, якщо тиск в трубопроводі $P=7,75$ МПа?	Залишати положення клапана без змін.
Яке завдання необхідно задати виконавчому механізму, якщо є тенденція до зменшення тиску в трубопроводі (похідна від помилки – від’ємна і дорівнює $-0,0006$ МПа/с) при оптимальному тиску в трубопроводі?	Привідкрити клапан на 10%.
Яке завдання необхідно задати виконавчому механізму, якщо є тенденція до збільшення тиску в трубопроводі (похідна від помилки – додатна і дорівнює $0,0006$ МПа/с) при оптимальному тиску в трубопроводі?	Призакрити клапан на 10%.
Яке номінальне положення ВМ	50% (0).

Продовження табл. 3.1

Запитання	Відповіді
Який робочий діапазон положення виконавчого механізму (повний діапазон степені закриття 0-100%)?	0 – 100% (-0,5 – +0,5).

Перейдемо безпосередньо до розробки регулятора. Першим етапом є формування структури фазі-регулятора.

Відкриваємо вікно інструменту FIS Editor і задаємо наступні параметри системи:

1. Кількість вхідних змінних – 1.
2. Кількість вихідних змінних – 1.
3. Назва входу – Error.
4. Назва виходу – Task.
5. Тип фазі-регулятора – Mamdani.
6. Метод логічного «AND» (and method) – min.
7. Метод логічного «OR» (or method) – max.
8. Метод імплікації (implication) – prod.
9. Метод агрегації (aggregation) – max.
10. Метод дефазифікації (defuzzification) – centroid.

Після налаштування всіх параметрів вікно FIS Editor набуде вигляду, представленого на рис. 3.7.

Другий крок „Створення функцій належності”.

Відкриваємо вікно інструменту Membership Function Editor, в якому будемо присвоювати входу „Delta” і виходу „Task” відповідні функції належності (терми).

Давайте присвоїмо входу „Delta” функції належності. Для цього звернемося до даних, наведених у таблиці 3.1, та на їхній основі сформуємо необхідні терми, використовуючи інструмент Membership Function Editor (рис. 3.8). Діапазон зміни вхідної величини „Delta”  $[-0,1;0,1]$ . Для того, щоб регулятор реагував на найменші відхилення від оптимального значення, звужуємо терму “normal”.

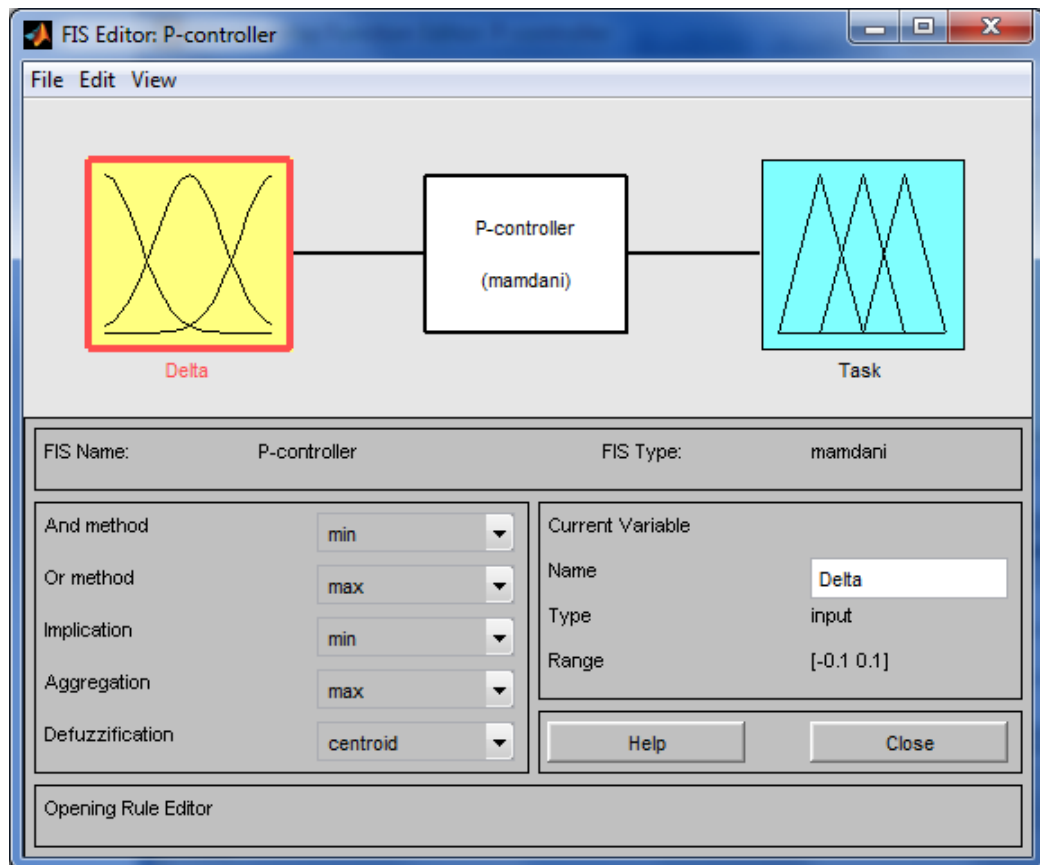


Рис. 3.7. Вікно FIS Editor після налаштування параметрів фази П-регулятора

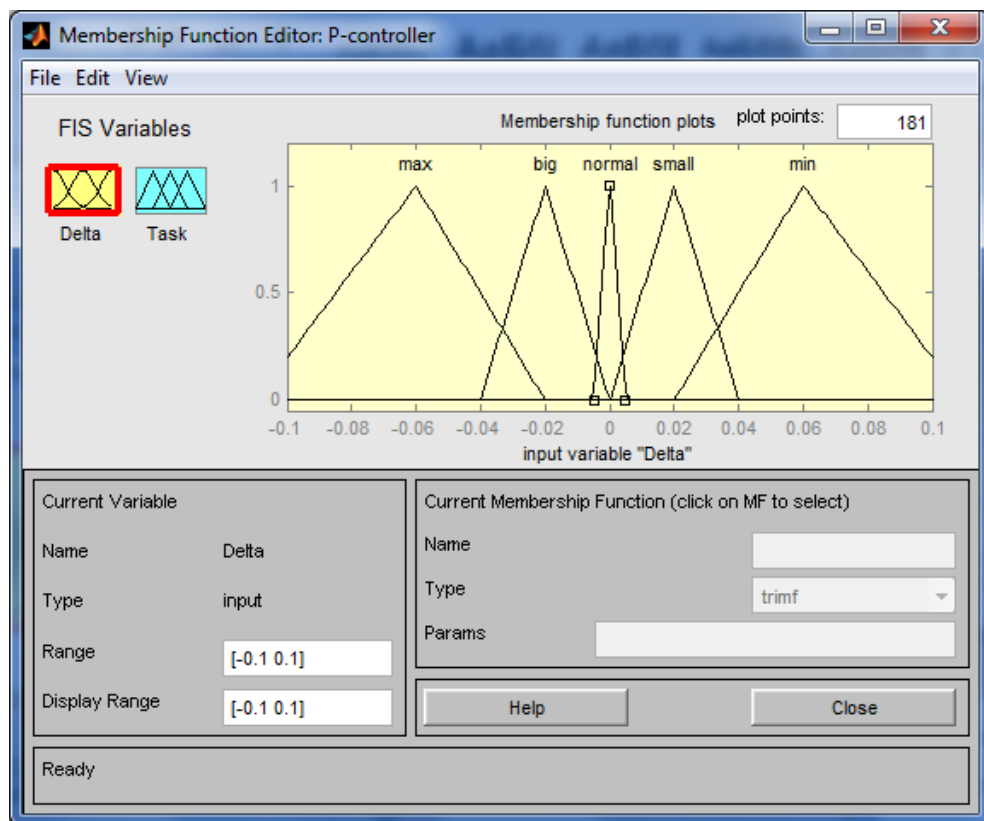


Рис. 3.8. Membership Function Editor: визначення термів для вхідної змінної «Delta»

Назвемо терми так:

1. max - вказує на максимально дозволений тиск в трубопроводі (дельта - 0,06 МПа);
2. big - вказує, що тиск в трубопроводі великий (дельта - 0.02 МПа);
3. normal - вказує на оптимальний тиск в трубопроводі (дельта  $\approx 0$ ).
4. small - вказує, що тиск в трубопроводі малий (дельта 0.02 МПа);
5. min - вказує на мінімально дозволений тиск в трубопроводі (дельта 0,06 МПа).

А тепер побудуємо терми для виходу „Task” за допомогою інструмента Membership Function Editor. (рисунок 3.9). З опитування технолога відомо, що регулятор „ тиску ” необхідно видавати задачу виконавчому механізму (ступінь відкриття клапану). Регулятор тиску може змінювати ступінь відкриття клапану у діапазоні положень паливних засувок  $-0,5 - +0,5$  (або ступінь відкриття клапану 0%-100%).

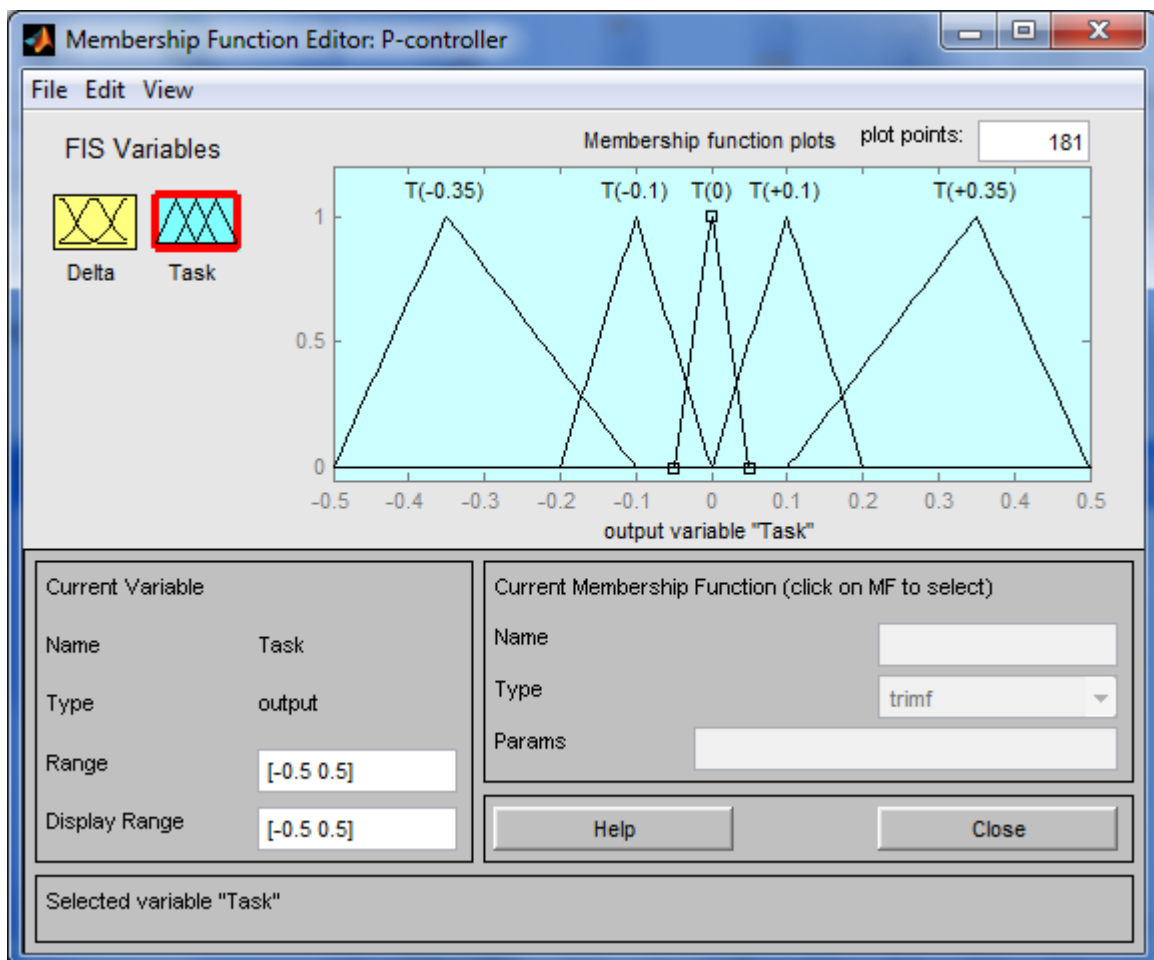


Рис. 3.9. Membership Function Editor, терми для виходу „Task”

Отож кількість термів - 5, функція терму - трикутник.

Назвемо терми так:

1.  $T(-0.35)$  - що відповідає положенню - 0,35 (ступінь відкриття 15%);
2.  $T(-0.1)$  - відповідає положенню - 0,1 (ступінь відкриття 40%);
3.  $T(0)$  - відповідає положенню 0 (ступінь відкриття 50%);
4.  $T(+0.1)$  - відповідає положенню 0,1 (ступінь відкриття 60%);
5.  $T(+0.35)$  - відповідає положенню 0,35 (ступінь відкриття 85%).

Слід відзначити, що форма термів вихідної змінної має менший вплив на роботу системи, ніж форма термів вхідних змінних. Для виходу ключове значення має положення піку відповідного терму.

Третій крок „Створення правил”.

Так як у нас є один вхід, який ми розбили на п'ять терм і є один вихід, який ми також розбили на п'ять терм, то не важко визначити, що і кількість правил теж буде рівна п'ятьом:

1. Якщо „Delta” = max то „Task” =  $T(-0.35)$ ;
2. Якщо „Delta” = big то „Task” =  $T(-0.1)$ ;
3. Якщо „Delta” = normal то „Task” =  $T(0)$ ;
4. Якщо „Delta” = small то „Task” =  $T(+0.1)$ ;
5. Якщо „Delta” = min то „Task” =  $T(+0.35)$ .

У інструменті Rule Editor правила формуються таким чином: спочатку вибирається відповідний терм у полі “Delta”, потім – відповідний терм у полі “Task”, після чого натискається кнопка “Add rule” для додавання правила. У разі помилки правило можна видалити за допомогою кнопки “Delete rule” або відредагувати та підтвердити зміни кнопкою “Change rule”, при цьому редаговане правило має бути попередньо виділене.

Після введення всіх правил вікно Rule Editor набуває вигляду, представленого на рис. 3.10.

Четвертий етап – інтерпретація нечіткого процесу.

Відкривається вікно Rule Viewer, яке тепер заповнене та відображає всі терми, задіяні в правилах. У цьому вікні можна наочно спостерігати, які правила

активуються, а які – ні, оцінити результат виконання кожного правила та отримати кінцевий вихідний сигнал регулятора.

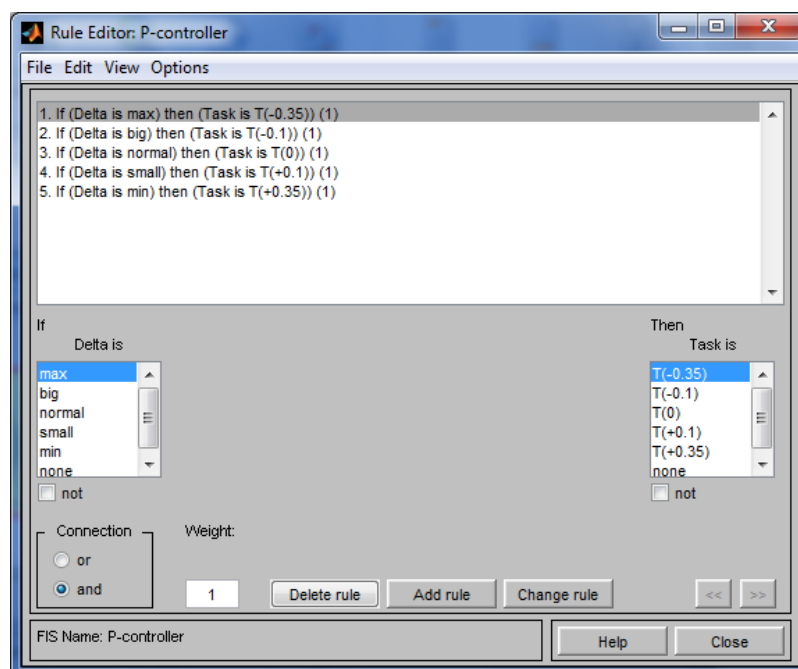


Рис. 3.10. Rule Editor: формування та управління правилами керування

У цьому вікні користувач має можливість змінювати значення вхідної змінної “Delta” та спостерігати відповідні зміни вихідної змінної “Task”. На даному етапі можна виявити та виправити помилки, допущені під час формування правил на попередньому кроці. Інтерфейс вікна Rule Viewer наведено на рис. 3.11.

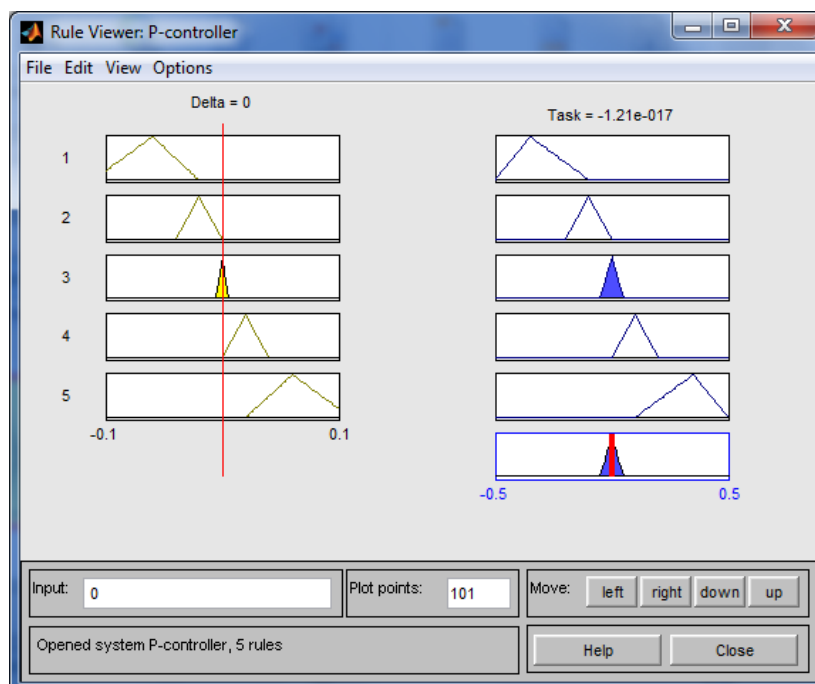


Рис. 3.11. Інтерфейс інструменту Rule Viewer для візуалізації правил

П'ятий етап – візуалізація керуючого простору.

Відкриваємо вікно Surface Viewer, у якому відображається графік залежності вихідної змінної від вхідної. Оскільки регулятор має лише одну вхідну змінну, результатом є одновимірна крива, представлена на рис. 3.12.

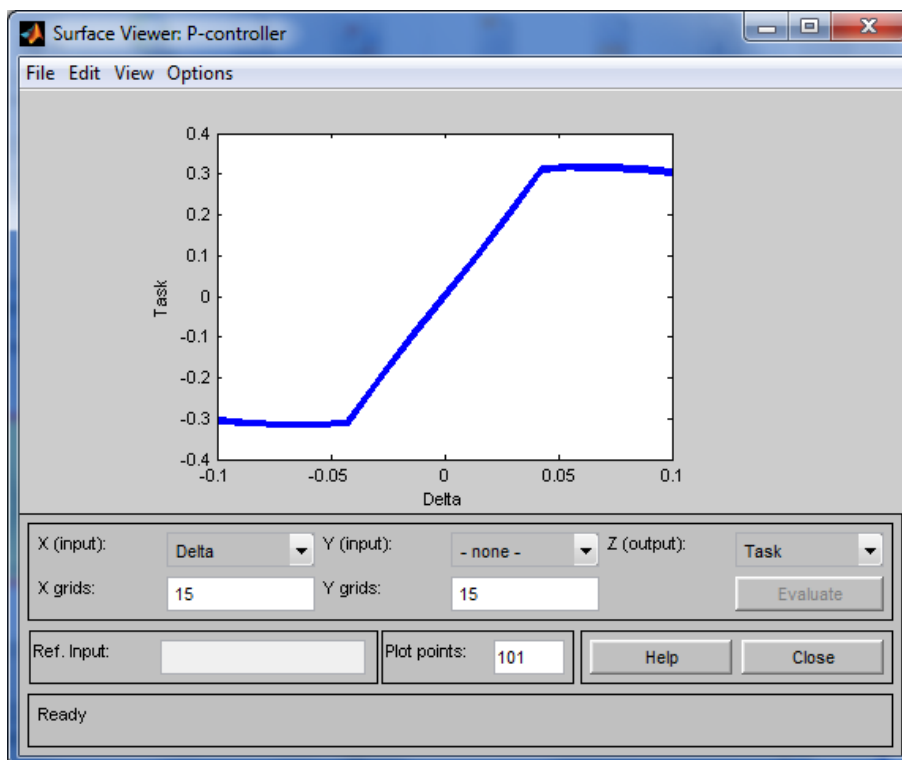


Рис. 3.12. Surface Viewer: візуалізація залежності вихідної змінної від вхідної

Шостий етап – збереження розробленого регулятора.

Створений регулятор можна експортувати на диск через File → Export → To disk або зберегти у робочому просторі MATLAB за допомогою File → Export → To Workspace.

### 3.3.2. Розробка нечіткого регулятора з ПД-законом керування

Перший етап: формування структури фазі-регулятора.

Відкриваємо розроблений нами П-фазі регулятор. Це робиться так: File – Import – From Disk... або клавішами Ctrl+O.

Появляється вікно відкриття fis - файлів. Знаходимо файл і відкриваємо його. Щоб зробити з П-фазі регулятора ПД-фазі регулятор необхідно додати ще один

вхід - похідну від часу по відхиленню керованої величини. Для цього необхідно у вікні FIS Editor увійти в меню Edit і додати ще один вхід (Add Input). Після цього з'явиться ще один вхід, який назовемо "Tendency" (тенденція зміни тиску нагнітання).

Після пророблених операцій вид вікна FIS Editor буде наступний: (рисунок 3.13).

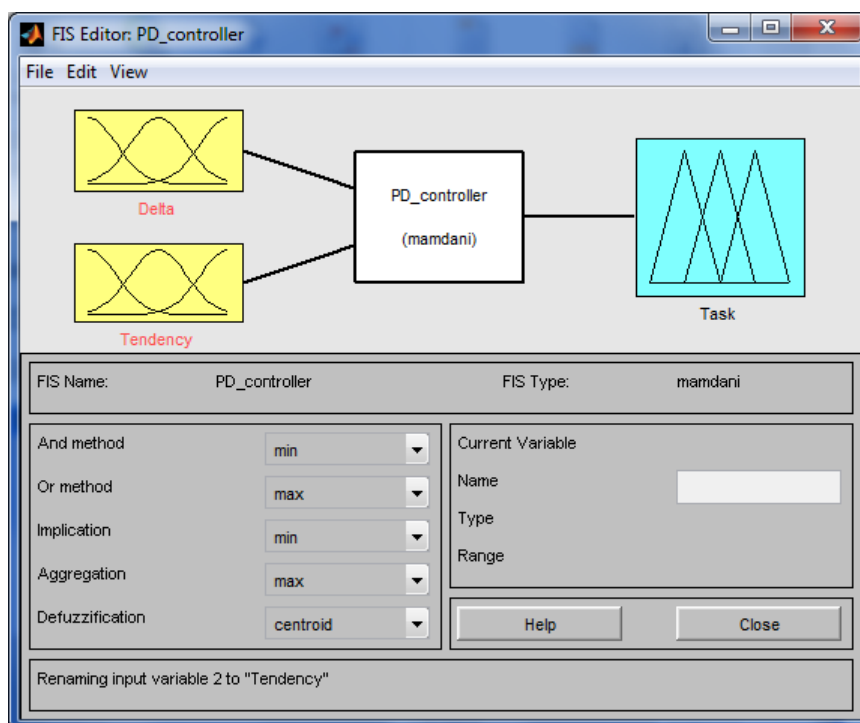


Рис. 3.13. Вид вікна FIS Editor при розробці ПД-фазі регулятора

Другий крок "Побудова функцій належності".

Відкриваємо вікно інструменту Membership Function Editor, в якому ми вже присвоїли входу „Delta” і виходу „Task” відповідні функції належності (терми). Так як для входу „Delta” і виходу „Task” функції належності уже побудовані, то одразу приступимо до побудови функцій належності для входу "Tendency", результат якого зображений на рисунку 3.14.

Третій крок "Побудова правил".

Вже до побудованих, у інструменті Rule Editor, правил для П-фазі регулятора ми ще додаммо правила, які будуть включати вхід "Tendency". Коли необхідно використати цей сигнал? А тоді, коли параметр стабілізувався, а випадкова

збурююча величина дестабілізує керовану величину. І для того, щоб випередити цю подію і не дати їй ще більше відхилити тиск нагнітання, необхідно мати похідну від помилки в часі. Тому, вже до побудованих правил додамо ще два правила:

1. Якщо „Delta” = normal і “Tendency”=tandancy+ то „Task” = big.
2. Якщо „Delta” = normal і “Tendency”=tandancy- то „Task” = small.

Після такого редагування вигляд вікна Rule Editor буде наступний як на рисунку 3.15.

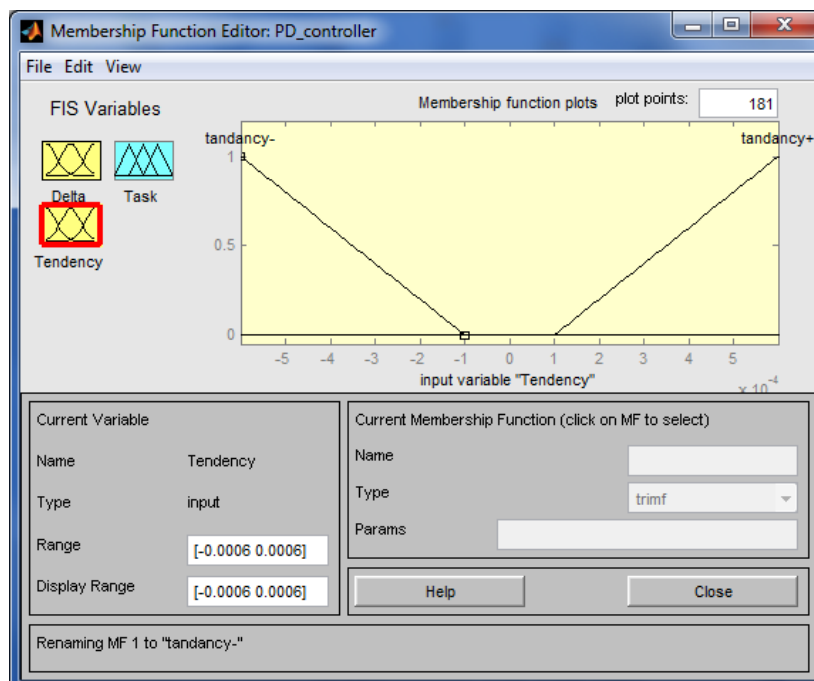


Рис. 3.14. Вікно Membership Function Editor, терми для входу “Tendency”

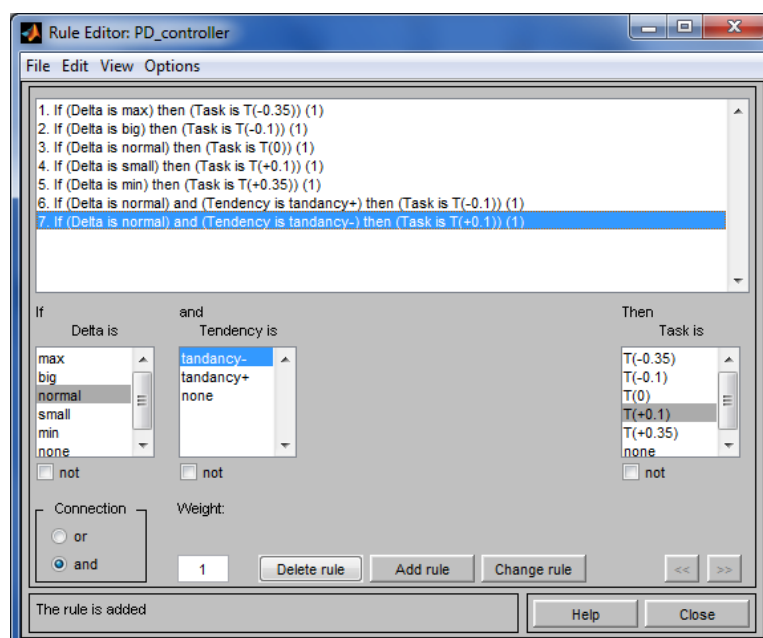


Рис. 3.15. Rule Editor, правила для ПД-фазі регулятора

Четвертий крок “Інтерпретація нечіткого процесу”. У вікні Rule Viewer змінюючи значення вхідних величин „Delta” і “Tendency”ми можемо спостерігати за зміною вихідного керуючого сигналу „Task”. Для ПД-фазі регулятора вікно інструменту Rule Viewer приведене на рисунку 3.16.

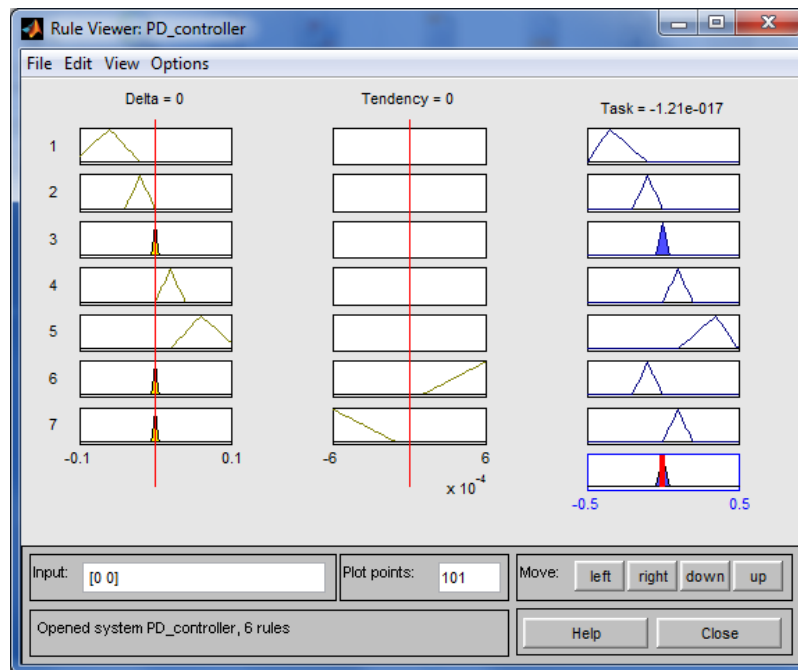


Рис. 3.16. Вікно Rule Viewer для ПД-фазі регулятора

П’ятий крок “зображення керуючого простору”. У вікні інструменту Surface Viewer (рисунок 3.17) ми бачимо керуючу площину, або просторову залежність керуючого сигналу „Task” від двох вхідних сигналів „Delta” і “Tendency”.

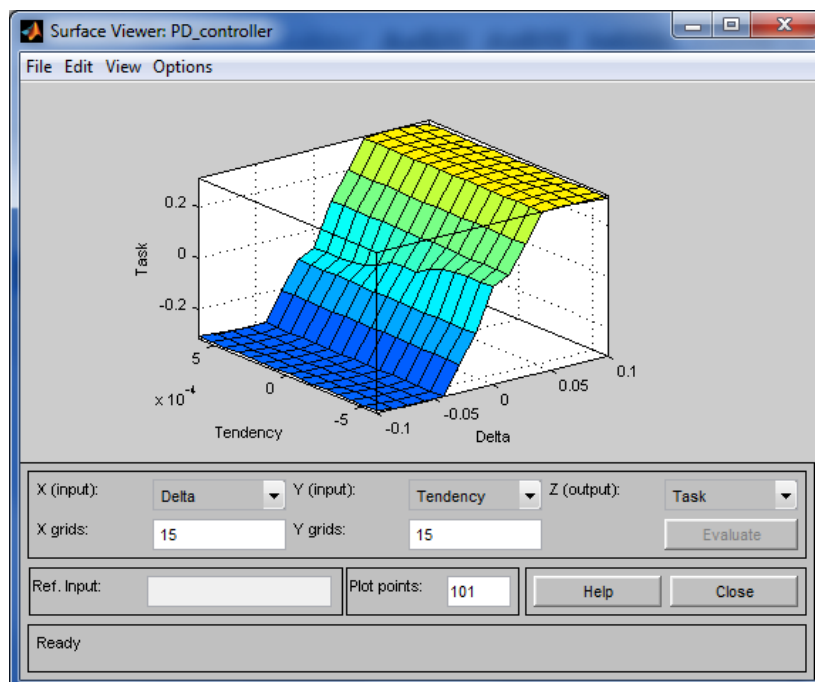


Рис. 3.17. Surface Viewer, графічна залежність вихідної (керуючої) величини

Шостий крок “Запис розробленого ПД-фазі регулятора”. Розроблений регулятор треба записати на диск (File – Export – To disk) під іншою назвою, бо інакше ми витремо розроблений нами попередній П-фазі регулятор.

### 3.3.3 Розробка нечіткого регулятора з ПД-законом керування

Перший крок: “структура фазі регулятора”.

Структура ПД-фазі регулятора дещо відрізняється від структури ПД-фазі регулятора. У ПД - фазі регулятора додається ще один вхід - інтегруюча складова сигналу помилки. Ця складова повинна забезпечувати більшу точність системи.

Для цього необхідно відкрити файл ПД регулятора і в інструменті FIS Editor увійти в меню Edit і вибрати опцію Add Input. Після цього появиться третій вхід, який назовемо “Integrate” (інтегруюча складова). Всі інші параметри цього інструменту аналогічні ПД - фазі регулятору.

Після проведених операцій вікно інструменту FIS Editor буде наступний: (рисунок 3.18).

Другий крок “Побудова функцій належності”.

Так як входи „Delta”, “Tendency” і вихід „Task” вже мають присвоєні функції належності, то нам у цьому кроці залишається побудувати функції належності (терми) для входу “Integrate”. Результат побудови зображений на рисунку 3.19.

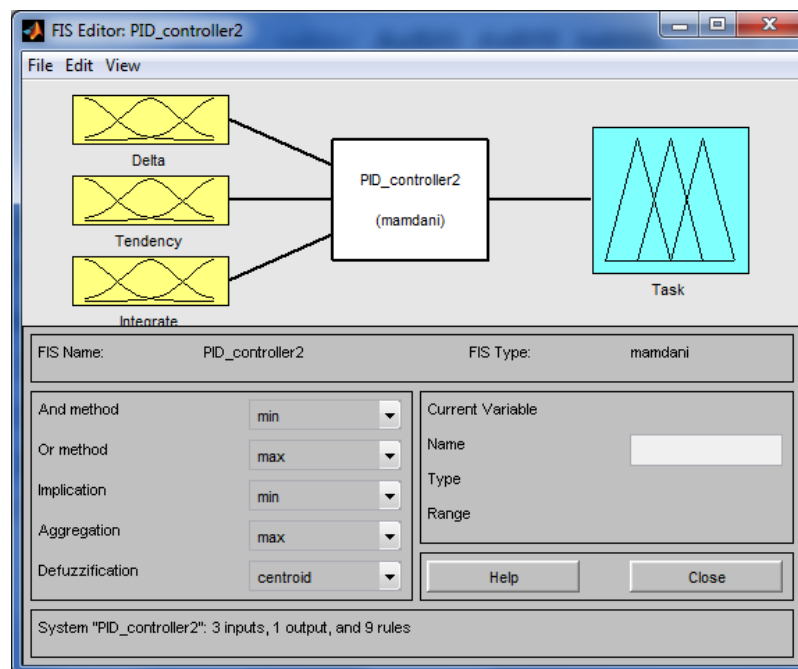


Рис. 3.18. Вид вікна FIS Editor при розробці ПД-фазі регулятора

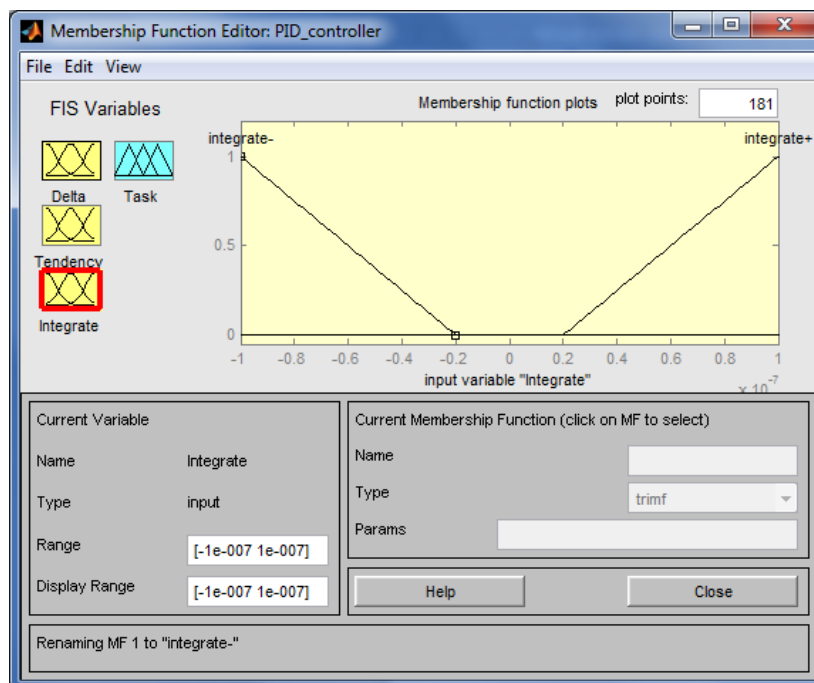


Рис. 3.19. Вид вікна Membership Function Editor, терми для входу “Integrate”

Третій крок “Побудова правил”.

Вже до побудованих правил для ПД-фазі регулятора ми ще додаємо правила, які будуть ще включати вхід “Integral”.

Коли необхідно використати цей сигнал?

А тоді, коли вихідний сигнал довго не стабілізується. Тоді регулятор дає сигнал, який зростає з тривалістю помилки, і стабілізує регульовану величину.

Правила, які ми дописуємо, такі:

1. Якщо „Delta” = normal і “ Integrate ”= integrate+, тоді „Task” = big.
2. Якщо „Delta” = normal і “ Integrate”= integrate–, тоді „Task” = small.

Вікно Rule Editor з повним набором правил для ПД - фазі регулятора зображене на рисунку 3.20.

Четвертий крок “Інтерпретація нечіткого процесу”.

Для інтерпретації нечіткого процесу використовується глядач правил Rule Viewer. У ньому ми можемо спостерігати спрацювання правил, результат кожного правила і загальний результат, який є виходом ПД-фазі регулятора. Для ПД-фазі регулятора вікно інструменту Rule Viewer приведене на рисунку 3.21.

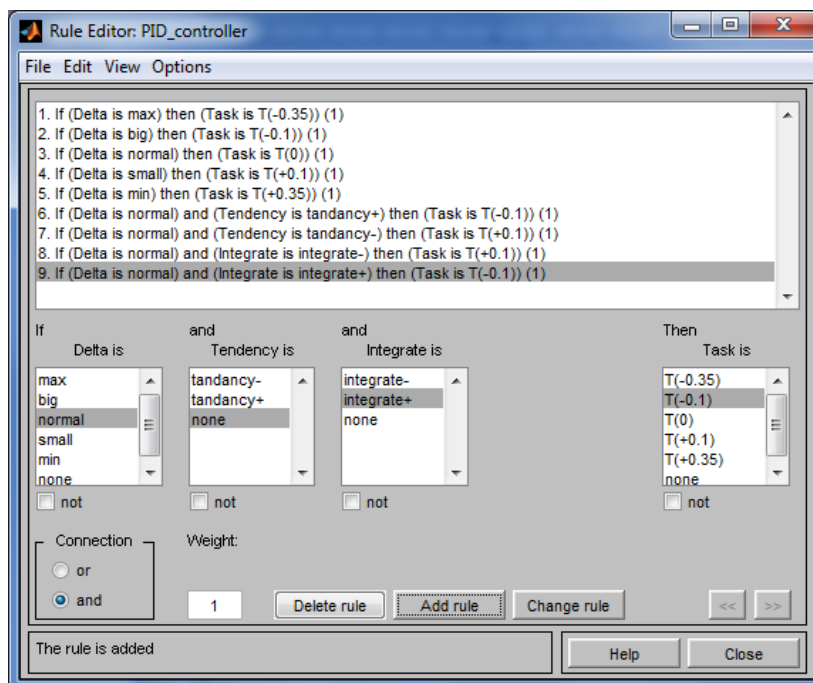


Рис. 3.20. Rule Editor, набір правил для ПІД-фазі регулятора

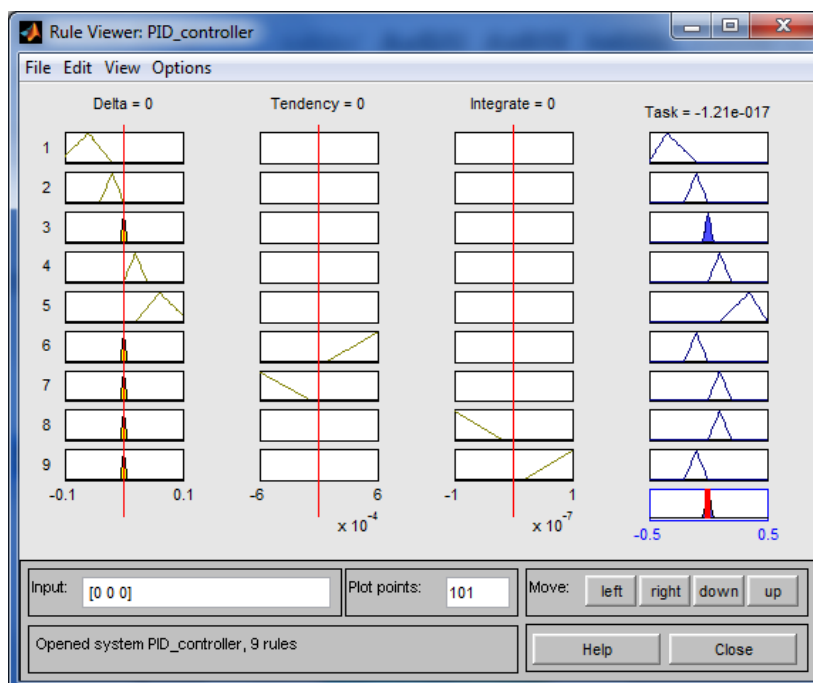


Рис. 3.21. Вікно Rule Viewer для ПІД-фазі регулятора

П'ятий крок “Зображення керуючого простору”.

У ПІД регулятора є три входи. Отже у інструменті Surface ми можемо побачити два простори керування:

Перший - відношення вихідного сигналу „Task” від вхідних „Delta” і

“Tendency”, зображений на рисунку 3.17.

Другий - відношення вихідного сигналу „Task” від вхідних „Delta” і “Integrate”, зображений на рисунку 3.22.

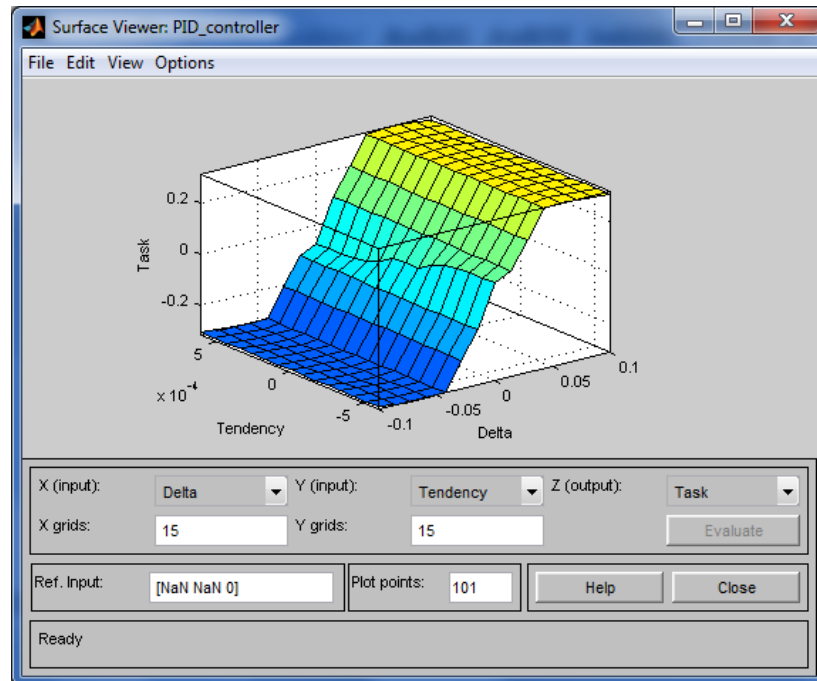


Рис. 3.22. Surface Viewer, графічна залежність керуючого сигналу від сигналів „Delta” і “Integrate”

### Висновки до розділу 3

В даному розділі з метою проведення досліджень системи автоматичного регулювання тиску у трубопроводі виконано проектування а також налаштування фази регуляторів, котрі в подальшому будуть використовуватись для імітаційного моделювання.

## РОЗДІЛ 4

## ДОСЛІДЖЕННЯ САР З ВИКОРИСТАННЯМ РЕГУЛЯТОРІВ ТА БЕЗ НИХ

## 4.1. Дослідження САР без використання регулятора тиску

Для запуску моделі, створеної у 2 розділі, необхідно відкрити її у робочій області MATLAB. Збурення задаємо по каналу споживача газу: споживання газу зменшується на 0,03 % (рисунок 4.1).

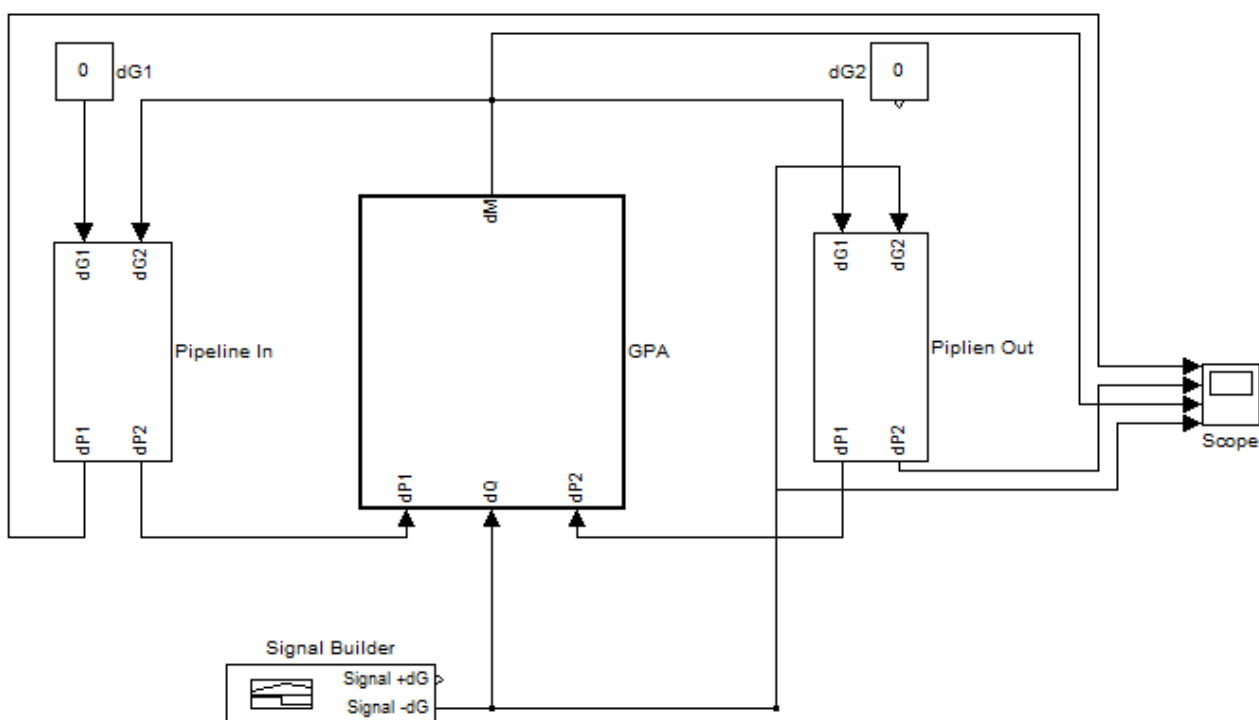


Рис. 4.1. Модель компресорної станції із збуренням по каналу споживача газу

Модель запускається натисканням кнопки Start. Для перегляду кривих перехідного процесу необхідно двічі клацнути на блоці Scope, після чого відкриється вікно, що відображає графічні залежності зміни тиску в часі. При цьому керуюча змінна відповідає впливу на виконавчий механізм, а керована змінна – тиску в трубопроводі після компресорної станції. Ці криві зображені на рис. 4.2.

На графіку показані:

- тиск після КС, який потрібно регулювати;

- тиск до КС;
- оберти нагнітача;
- збурення.

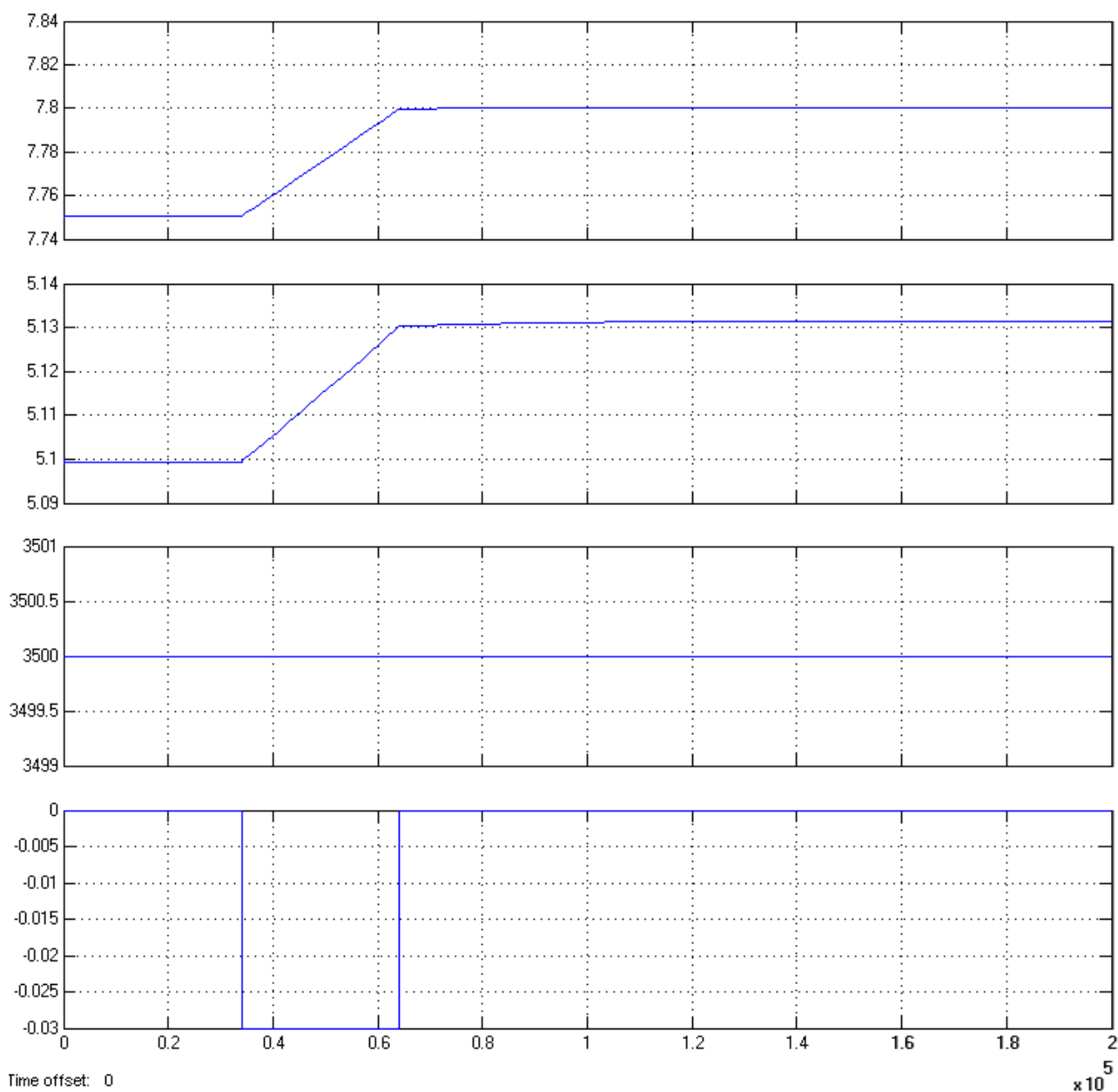


Рис. 4.2. Динаміка роботи системи без використання регулятора тиску (збурення по каналу споживача газу)

Тепер задаємо збурення по каналу компресорної станції: надходження газу до КС зменшується на 0,03 % (рисунок 4.3). Тепер запускаємо модель. Перехідні характеристики зображені на рис. 4.4.

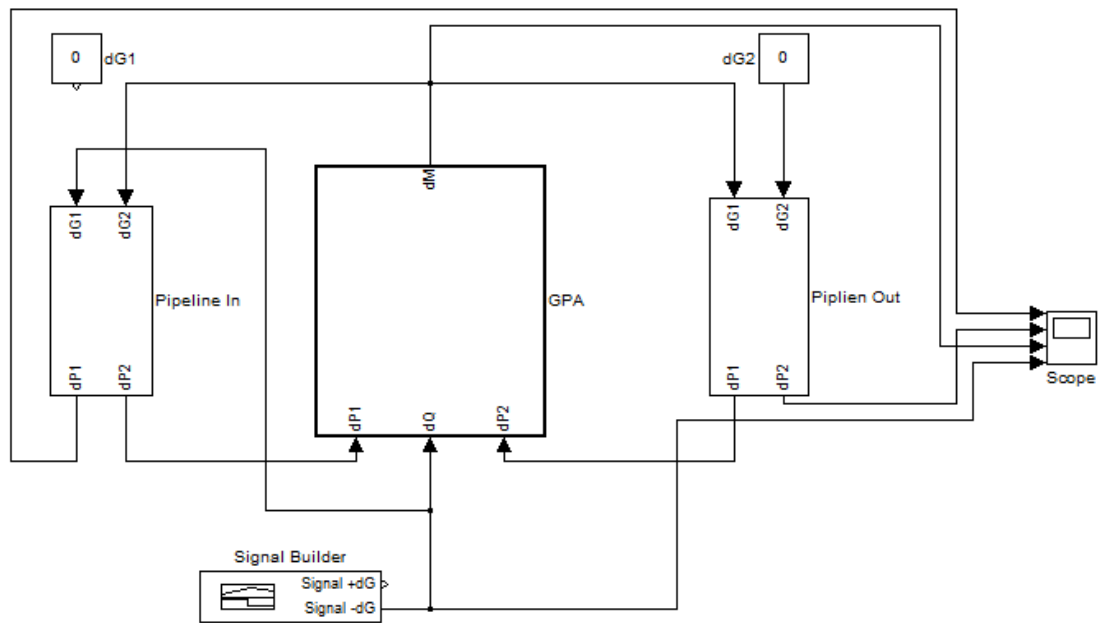


Рис. 4.3. Модель компресорної станції із збуренням по каналу КС

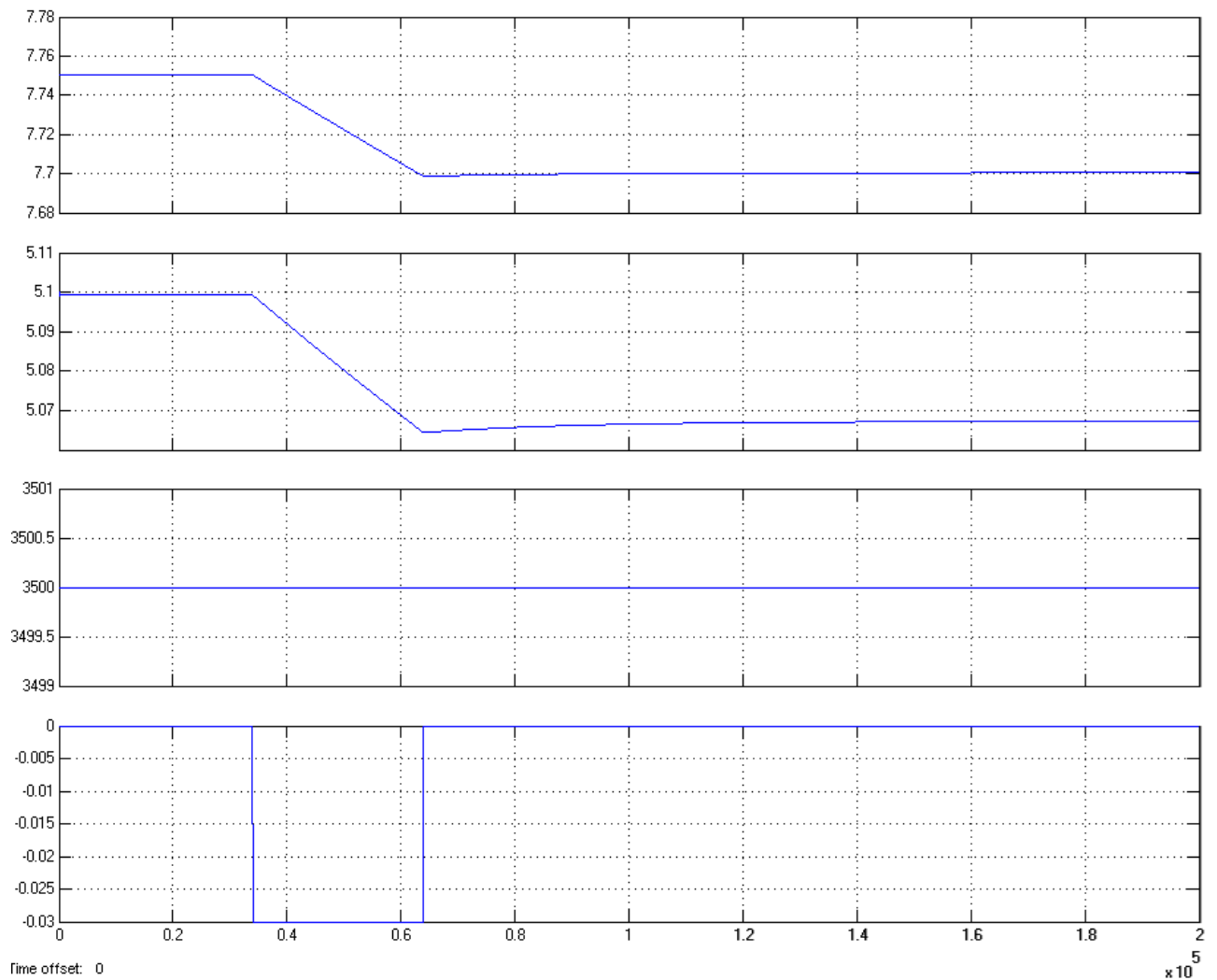


Рис. 4.4. Динаміка роботи системи без використання регулятора тиску (збурення по каналу компресорної станції)

Аналізуючи отримані результати бачимо, що дія невеликого збурення (0,03 % складає 2,2 кг/с від початкової масової витрати) викликає відхилення керованої величини від оптимального значення на 0,05 МПа, що становить 0,65% від оптимального значення.

#### 4.2. Дослідження САР з використанням нечіткого регулятора з П-законом регулювання

Для того, щоб дослідити САР ми до отриманої моделі під'єднуємо блок Fuzzy Logic Controller. З'єднавши цей блок лініями зв'язку, отримуємо модель САР (рис. 4.5).

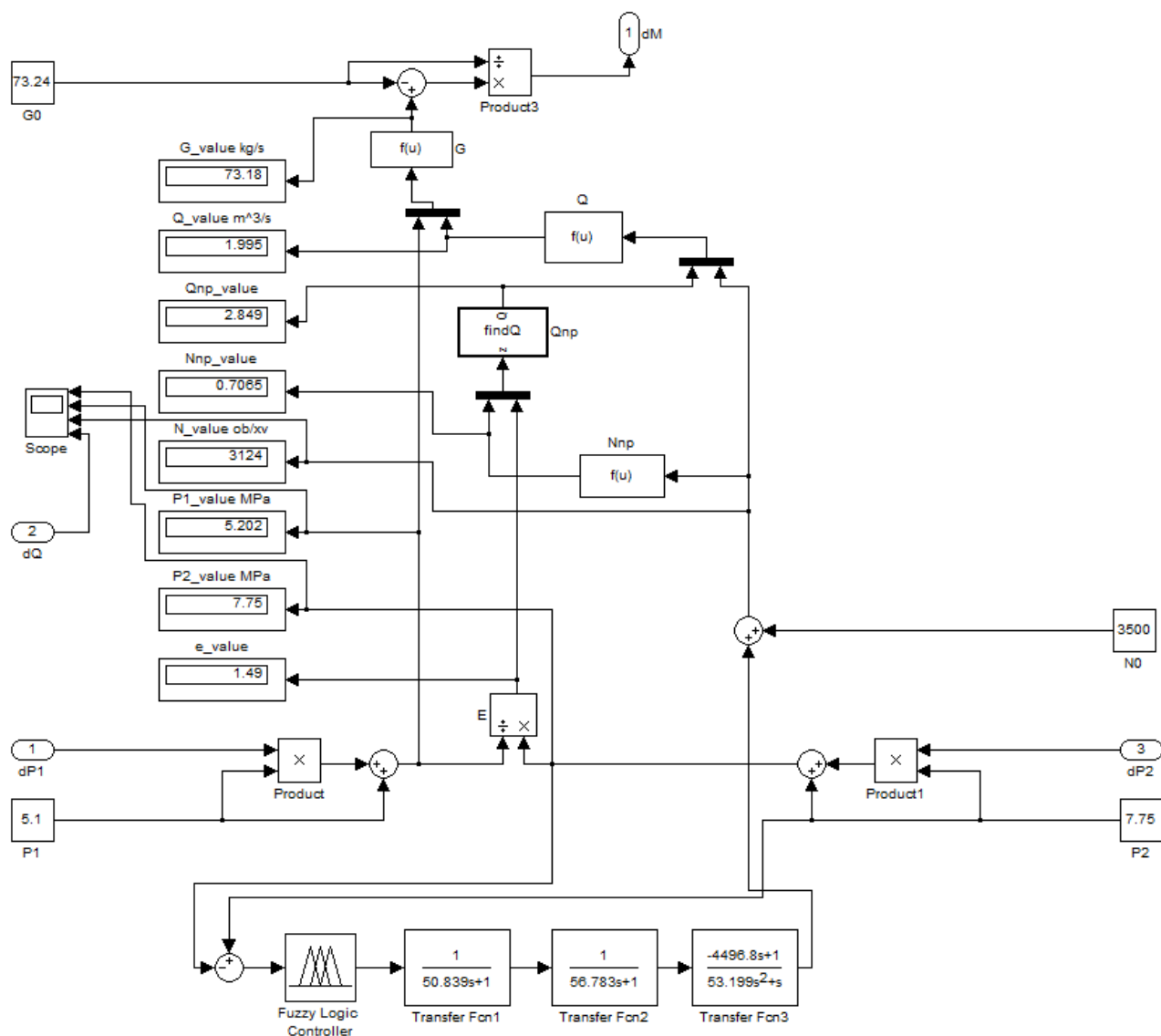


Рис. 4.5. Модель ГПА з нечітким регулятором

Перед запуском необхідно ввести в робочий простір MATLAB розроблений нами файл у програмі FIS Editor Viewer. Це робиться одним з двох шляхів: в редакторі нечіткої інференц системи вибираємо File – Export – To workspace, чи у командному рядку вводимо команду: `P = readfis('P')`. Ця команда зв'язує блок “Fuzzy Logic Controller” з файлом `P.fis`, в якому міститься вся інформація і дані, що були розроблені, а також основні функціональні можливості нечіткого регулятора. Після такої дії в командному вікні MATLAB побачимо:

```
P =
      name: 'P'
      type: 'mamdani'
  andMethod: 'min'
  orMethod: 'max'
 defuzzMethod: 'centroid'
  impMethod: 'prod'
  aggMethod: 'max'
   input: [1x2 struct]
  output: [1x1 struct]
   rule: [1x7 struct]
```

Розглядаємо два випадки (аналогічно пункту 4.1.) збурення по каналу споживача газу та каналу компресорної станції.

І лише тепер можна запусити модель кнопкою “Start”.

Щоб побачити криві процесу регулювання слід двічі клацнути “мишкою” по блоку Score, після чого відкривається вікно, в якому будуть графічні залежності (зміна тиску в часі, де керуюча величина – вплив на виконавчий механізм, керована величина – тиск в трубопроводі після компресорної станції) від часу. Ці криві процесу регулювання зображені на рис. 4.6. та 4.7.

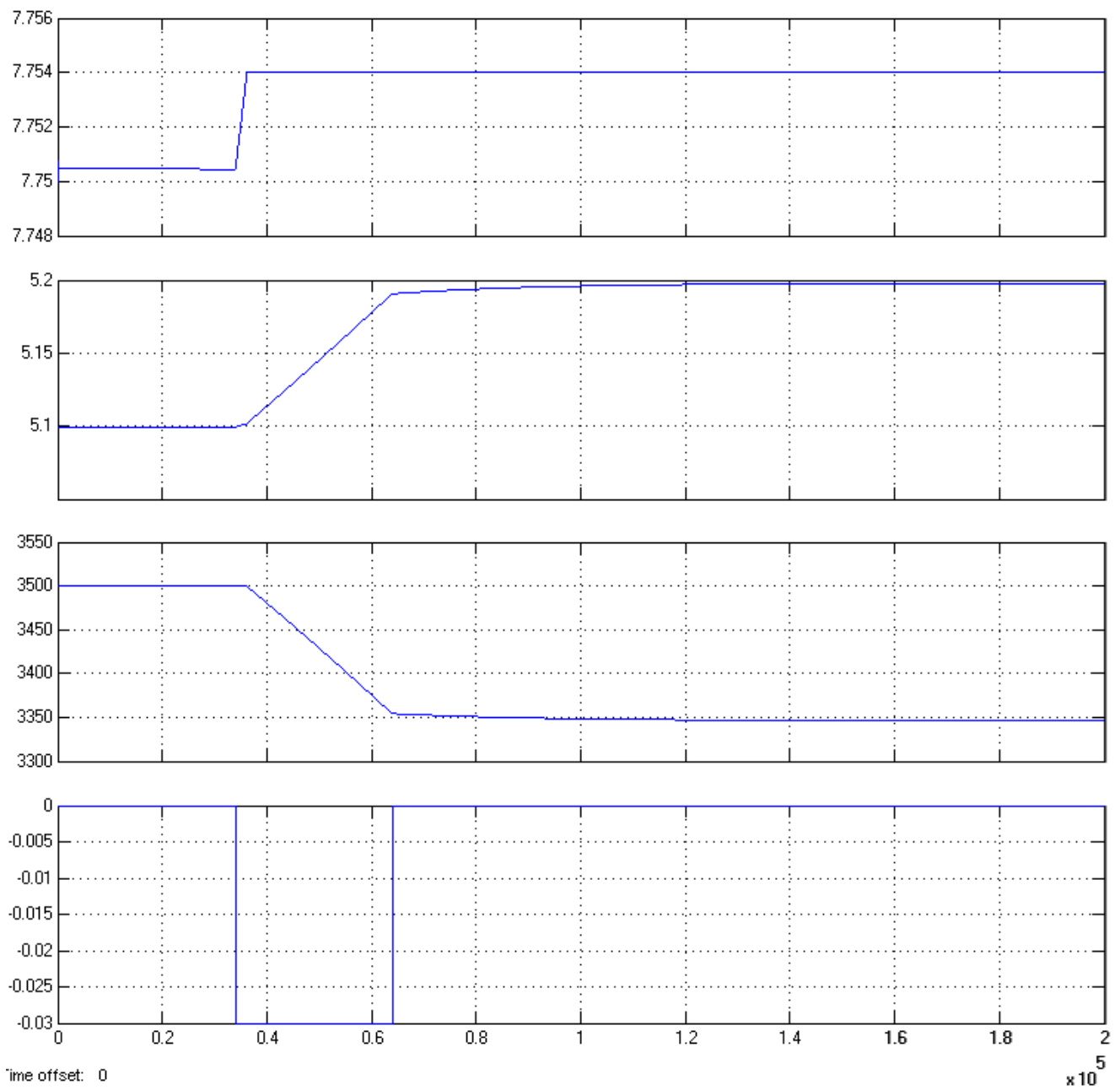


Рис. 4.6. Динаміка роботи системи з нечітким регулятором з П-законом керування (збурення по каналу споживача газу)

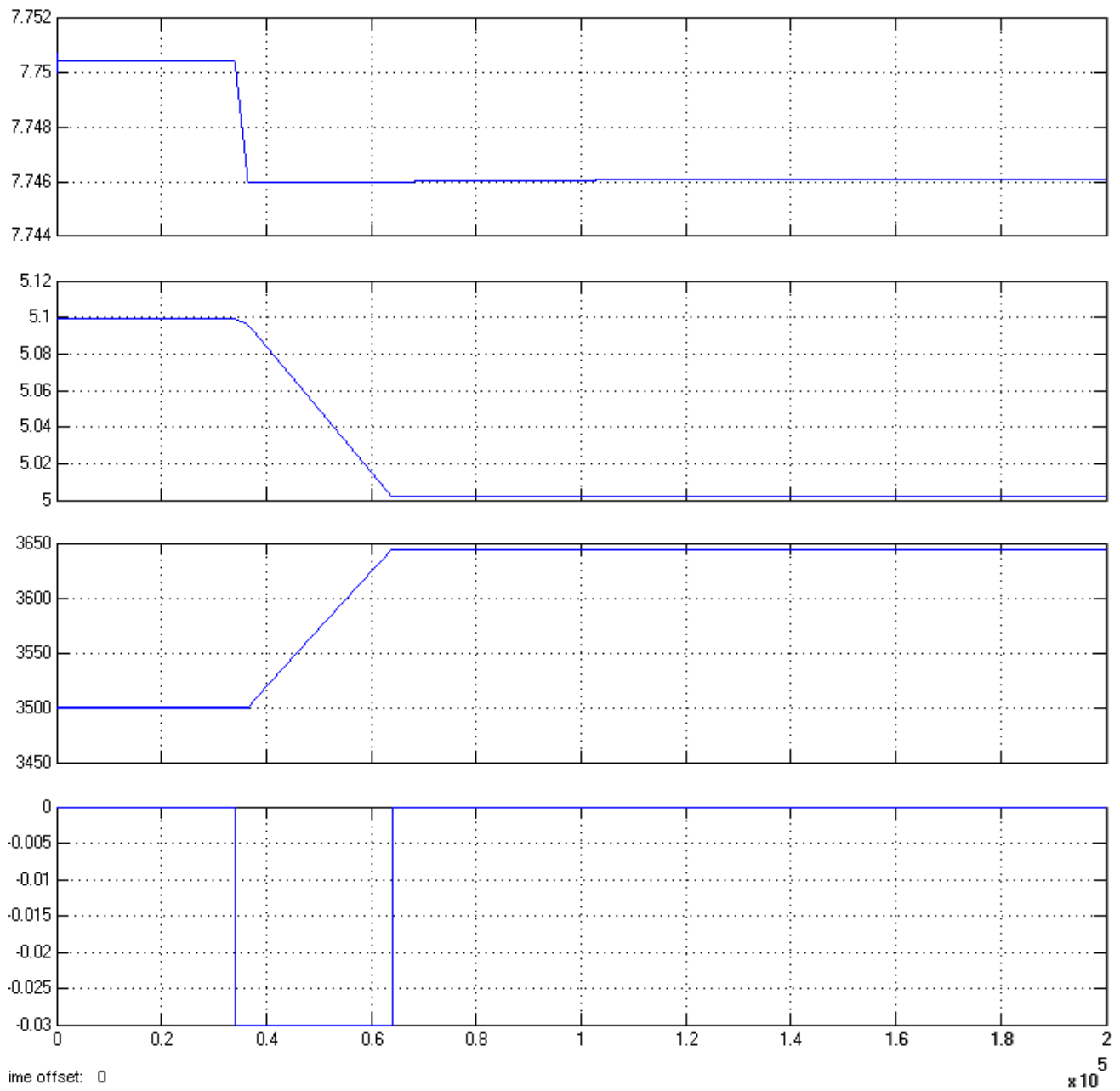


Рис. 4.7. Динаміка роботи системи з нечітким регулятором з П-законом керування (збурення по каналу компресорної станції)

Аналізуючи отримані результати бачимо, що дія збурення викликає відхилення керованої величини від оптимального значення на 0,004 МПа, що становить 0,05% від оптимального значення.

### 4.3. Дослідження САР з використанням нечіткого регулятора з ПД-законом регулювання

Робимо все аналогічно пункту 4.2. Але в робочий простір MATLAB вводимо розроблений нами файл “PD”, щоб зв’язати блок “Fuzzy Logic Controller” з файлом PD.fis, в якому міститься вся інформація і дані, що були розроблені, а також основні функціональні можливості нечіткого регулятора з ПД-законом керування. Криві процесу регулювання зображені на рис. 4.8. та 4.9.

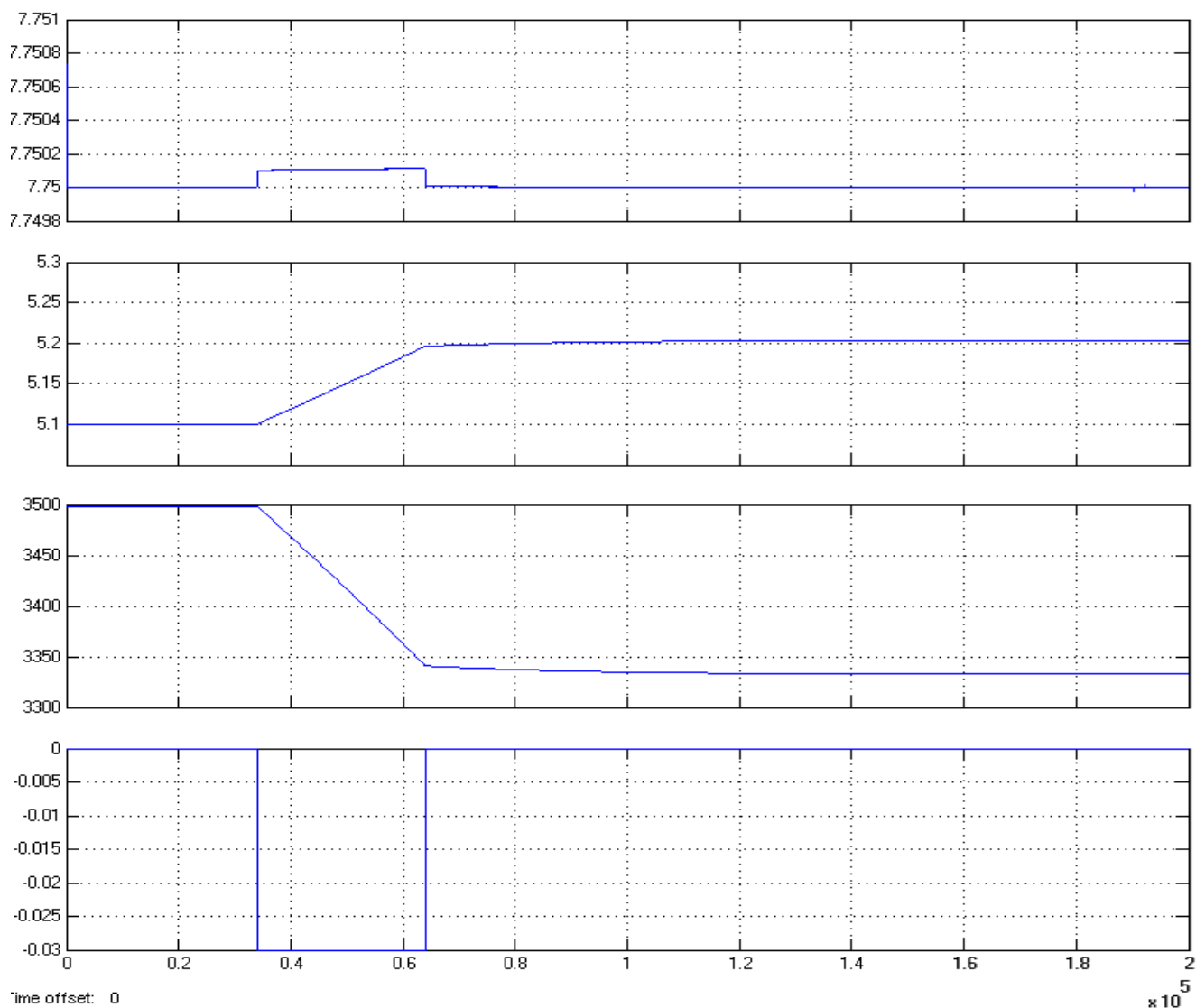


Рис. 4.8. Динаміка роботи системи з нечітким регулятором з ПД-законом керування (збурення по каналу споживача газу)

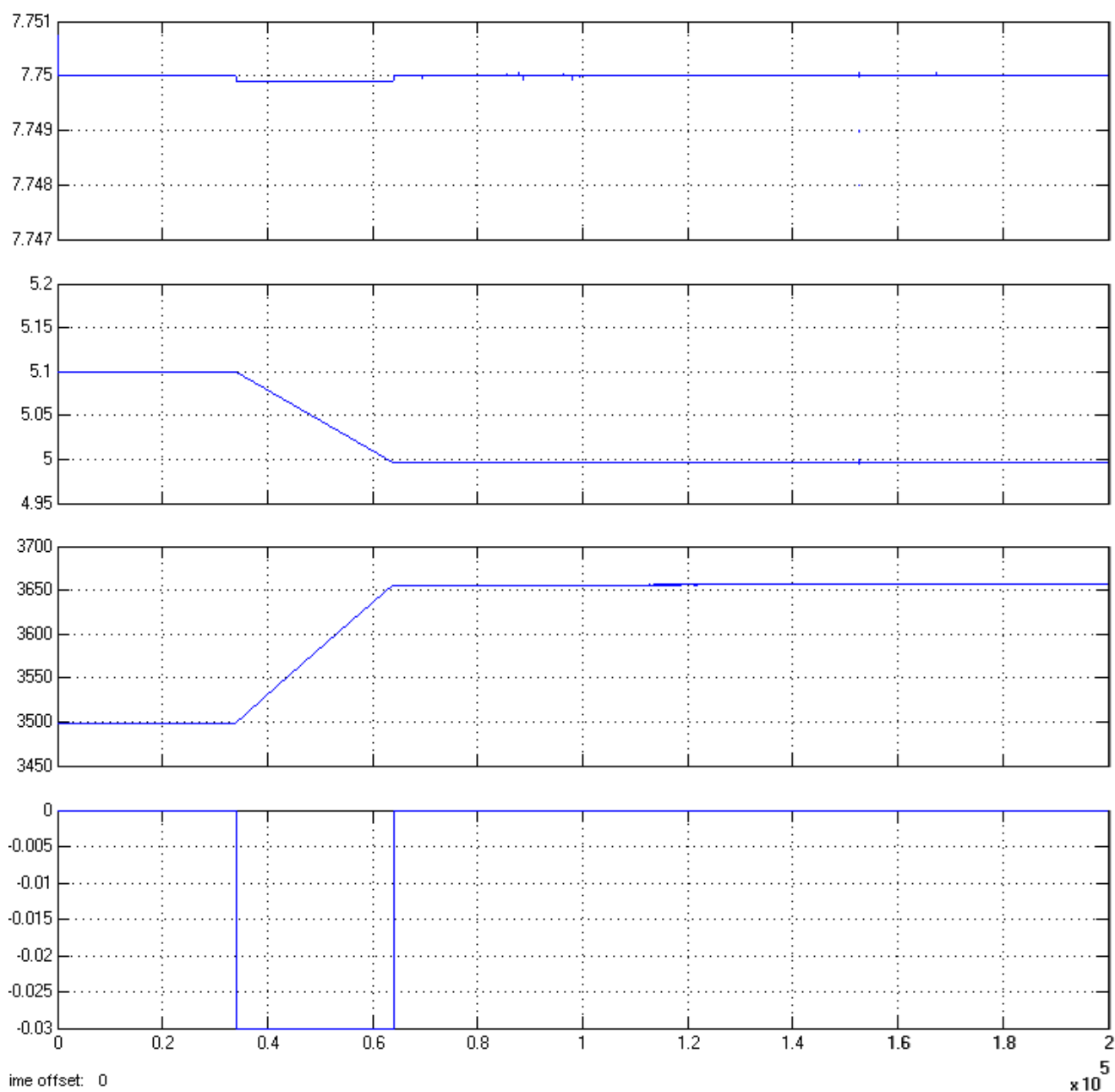


Рис. 4.9. Динаміка роботи системи з нечітким регулятором з ПД-законом керування (збурення по каналу компресорної станції)

Аналізуючи отримані результати бачимо, що дія збурення призводить до невеликого відхилення керованої величини від оптимального значення у вигляді стрибка, тривалість якого дорівнює тривалості дії збурення, а величина стрибка 0,0001 МПа, що становить 0,001% від оптимального значення.

#### 4.4. Дослідження САР з використанням нечіткого регулятора з ПД-законом регулювання

Робимо все аналогічно пункту 4.2. Але в робочий простір MATLAB вводим розроблений нами файл “PID”, щоб зв’язати блок “Fuzzy Logic Controller” з файлом PID.fis, в якому міститься вся інформація і дані, що були розроблені, а також основні функціональні можливості нечіткого регулятора з ПД-законом керування. Криві процесу регулювання зображені на рис. 4.10. та 4.11.

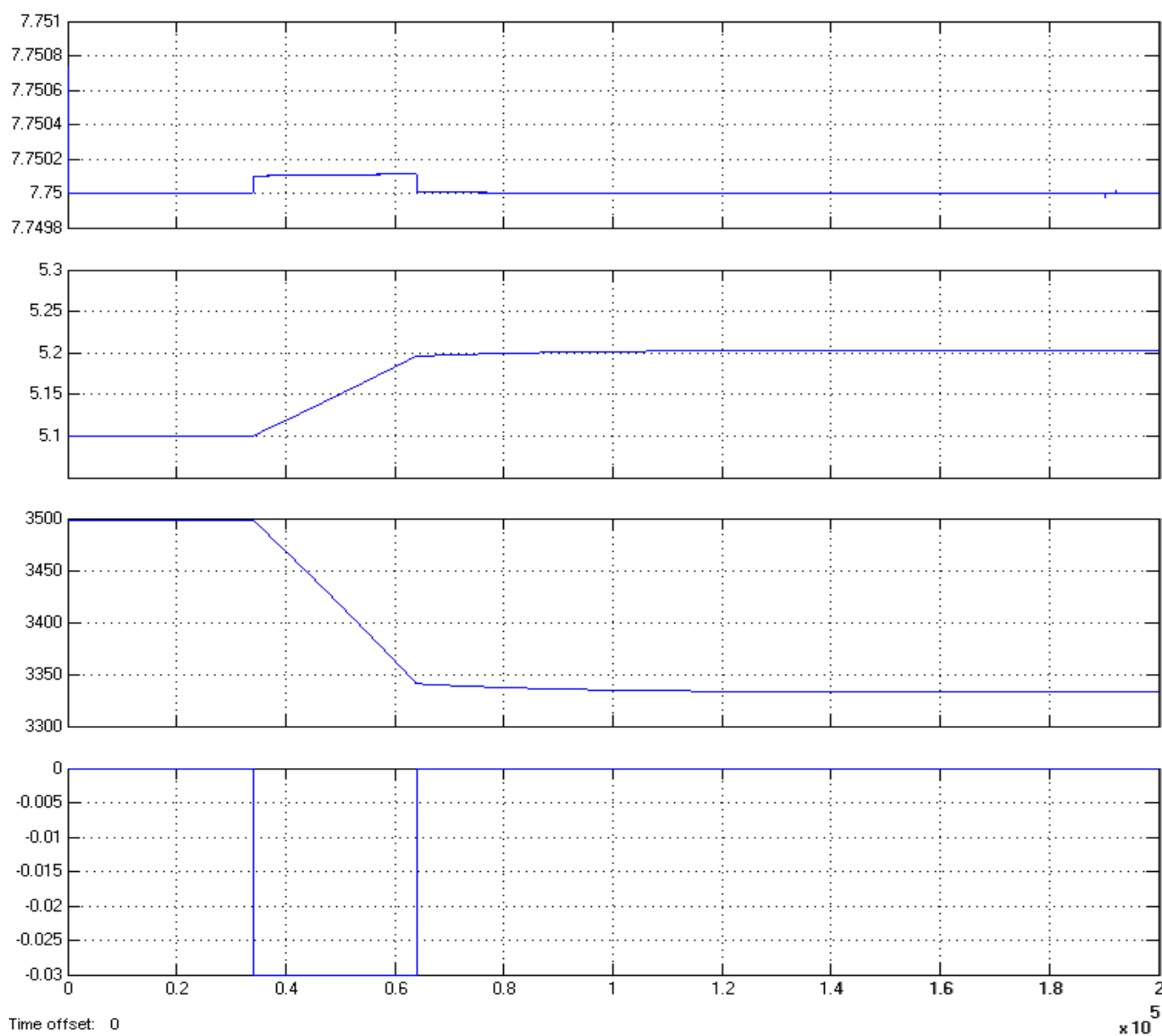


Рис. 4.10. Динаміка роботи системи з нечітким регулятором з ПД-законом керування (збурення по каналу споживача газу)

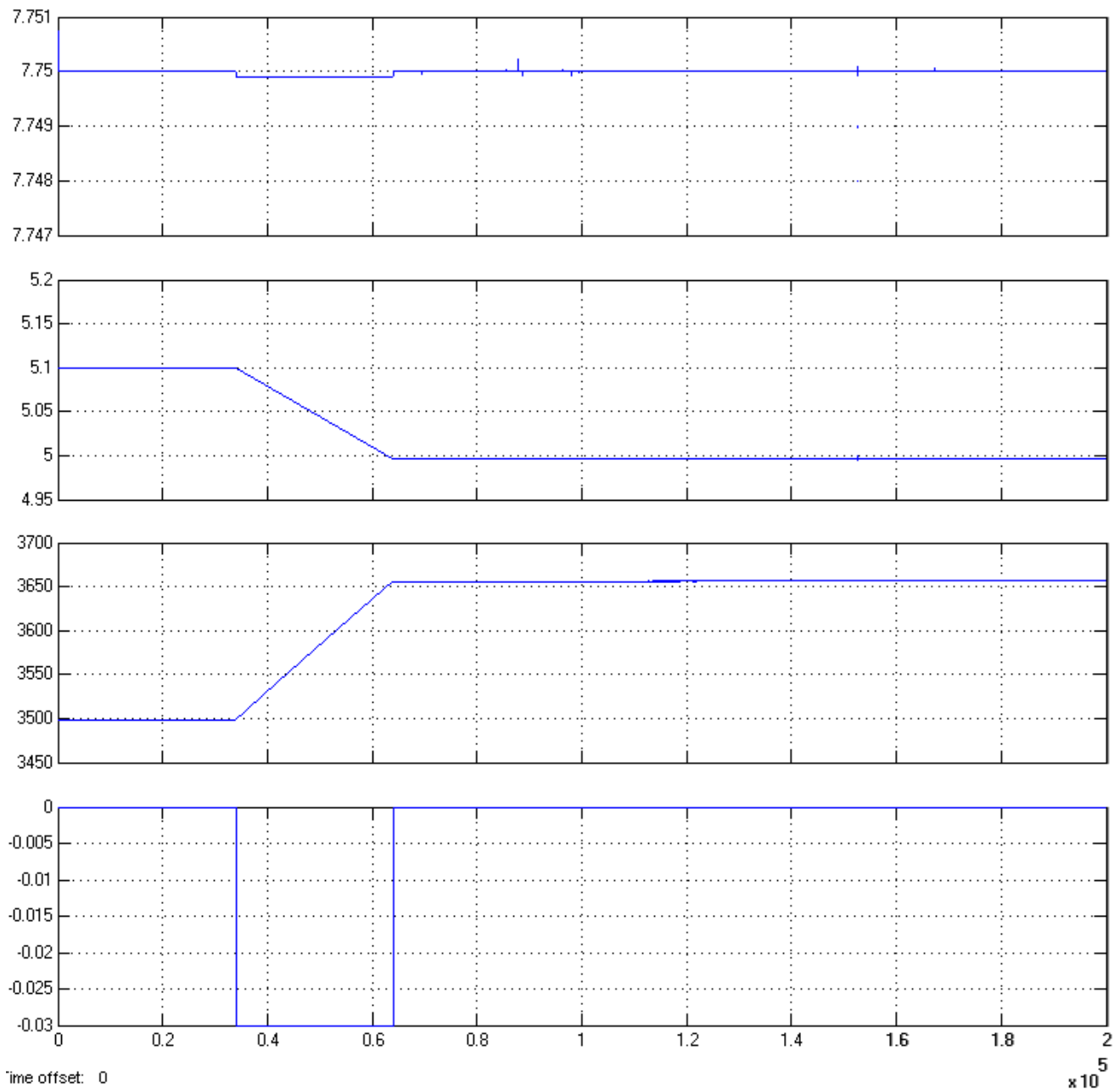


Рис. 4.11. Динаміка роботи системи з нечітким регулятором з ПІД-законом керування (збурення по каналу компресорної станції)

Аналізуючи отримані результати бачимо, що ПІД-регулятор дає результат, аналогічний ПД-регулятору. Отже, використання ПІД-регулятора в даному випадку є не раціональним.

#### 4.5. Дослідження САР з використанням звичайного регулятора

Для того, щоб дослідити САР з використанням звичайного регулятора ми до

електродинамічної моделі ГПА під'єднуємо блок PID Controller. З'єднавши цей блок лініями зв'язку, отримаємо модель САР (рис. 4.12).

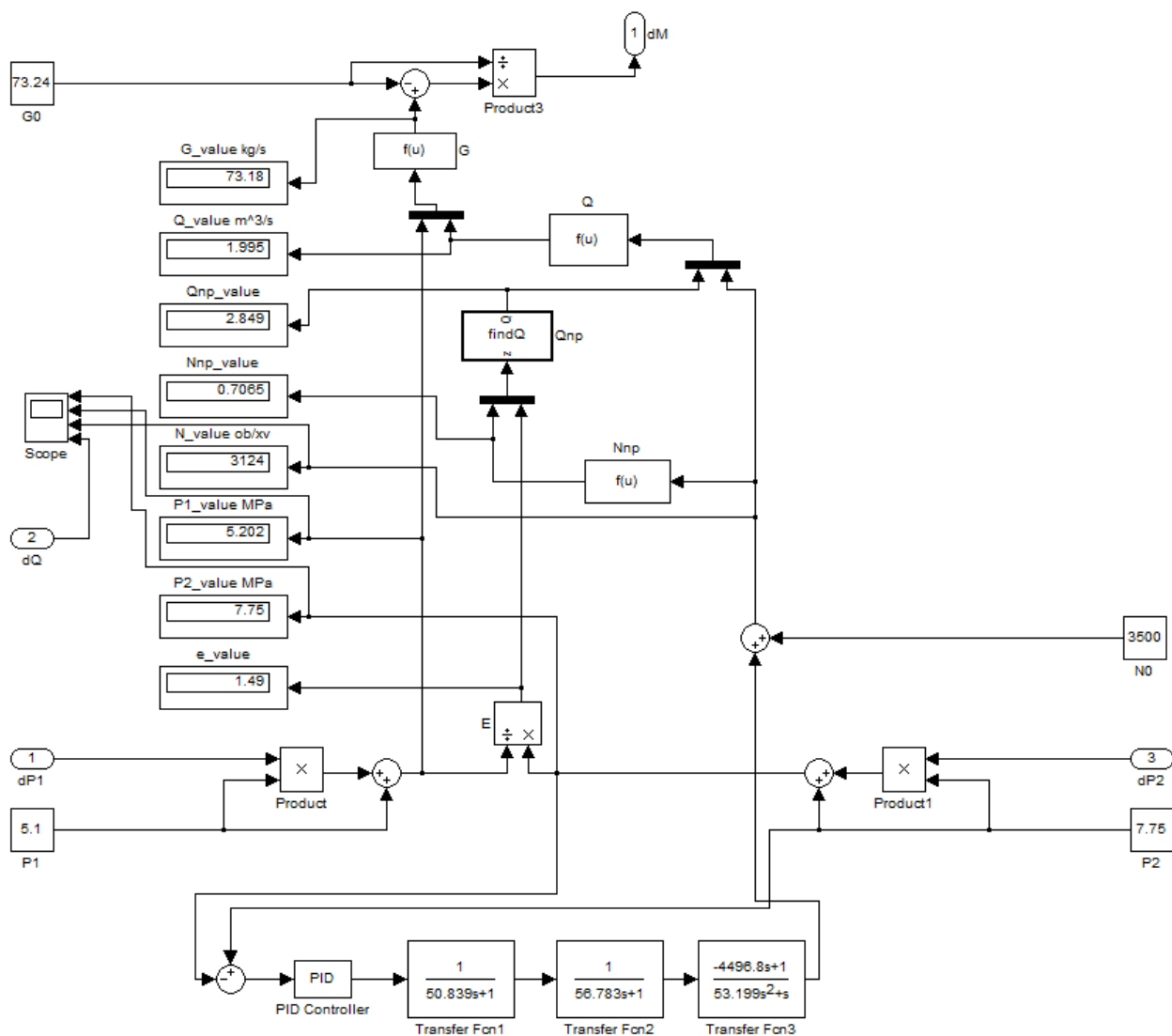


Рис. 4.12. Електродинамічна модель ГПА зі звичайним регулятором

Параметри налаштування регулятора знаходимо за допомогою MATLAB. В отриману модель вводимо блок Signal Constraint, який визначає оптимальні параметри регулятора. Після цього модель має вигляд:

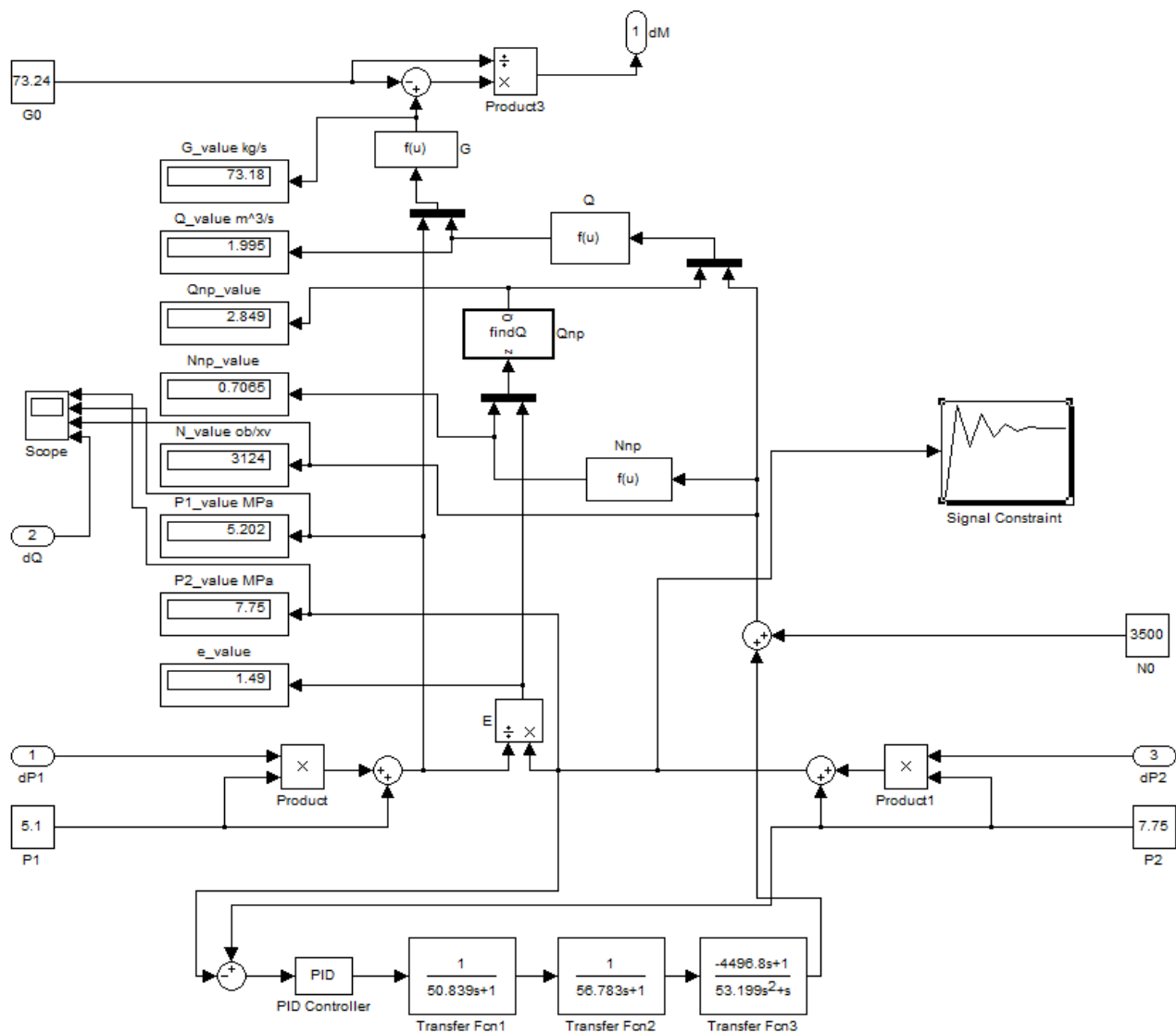


Рис. 4.13. Електродинамічна модель ГПА зі звичайним регулятором та з блоком Signal Constraint

У вікні введеного блоку задаємо межі, за які не повинна виходити потрібна характеристика:

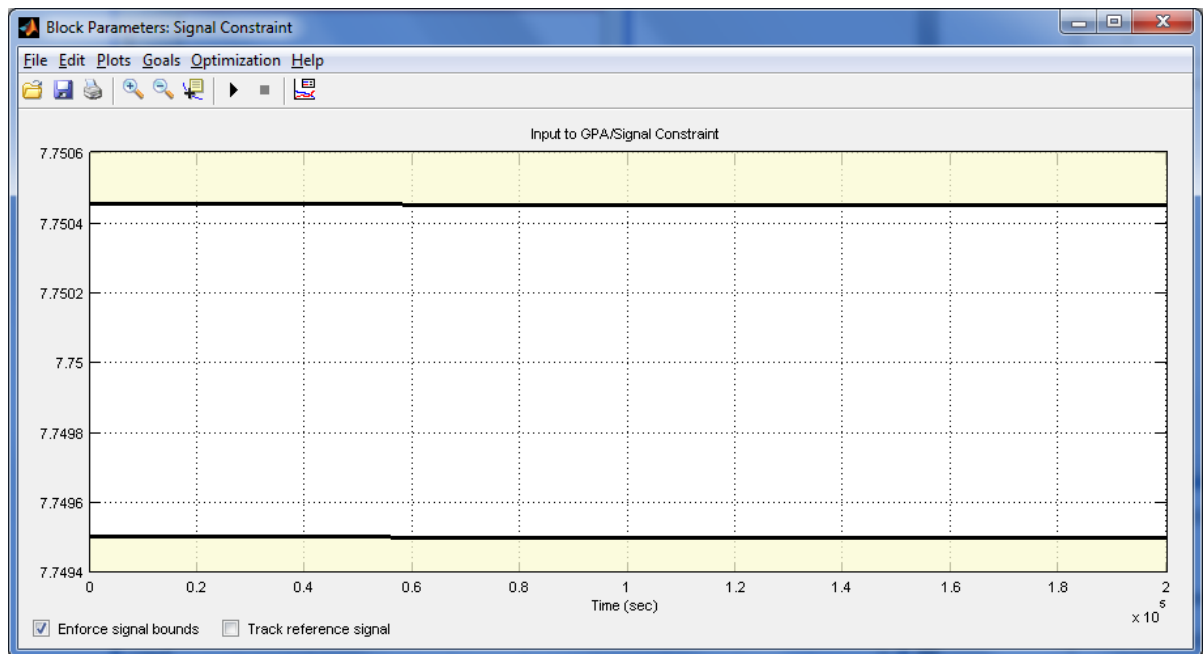


Рис. 4.14. Вікно блоку Signal Constraint

В робочій області MATLAB вводимо початкові параметри регулятора, які були знайдені методом параметричної оптимізації [10]:  $K_p=0,02$ ,  $K_d=0,36$ ,  $K_i=0$ . Після цього в блок PID Controller вводимо позначення  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ . Після цього у вікні блоку Signal Constraint вибираємо параметри, які необхідно оптимізувати. Потім запускаємо модель. Отримуємо такі результати (рис. 4.15).

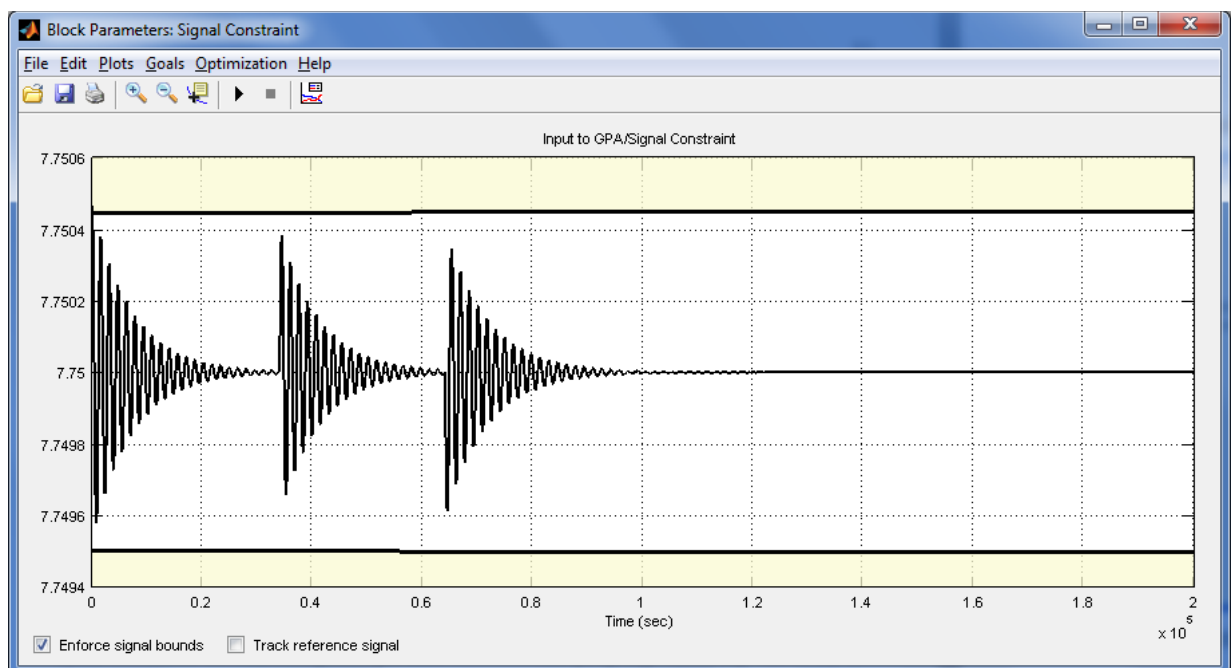
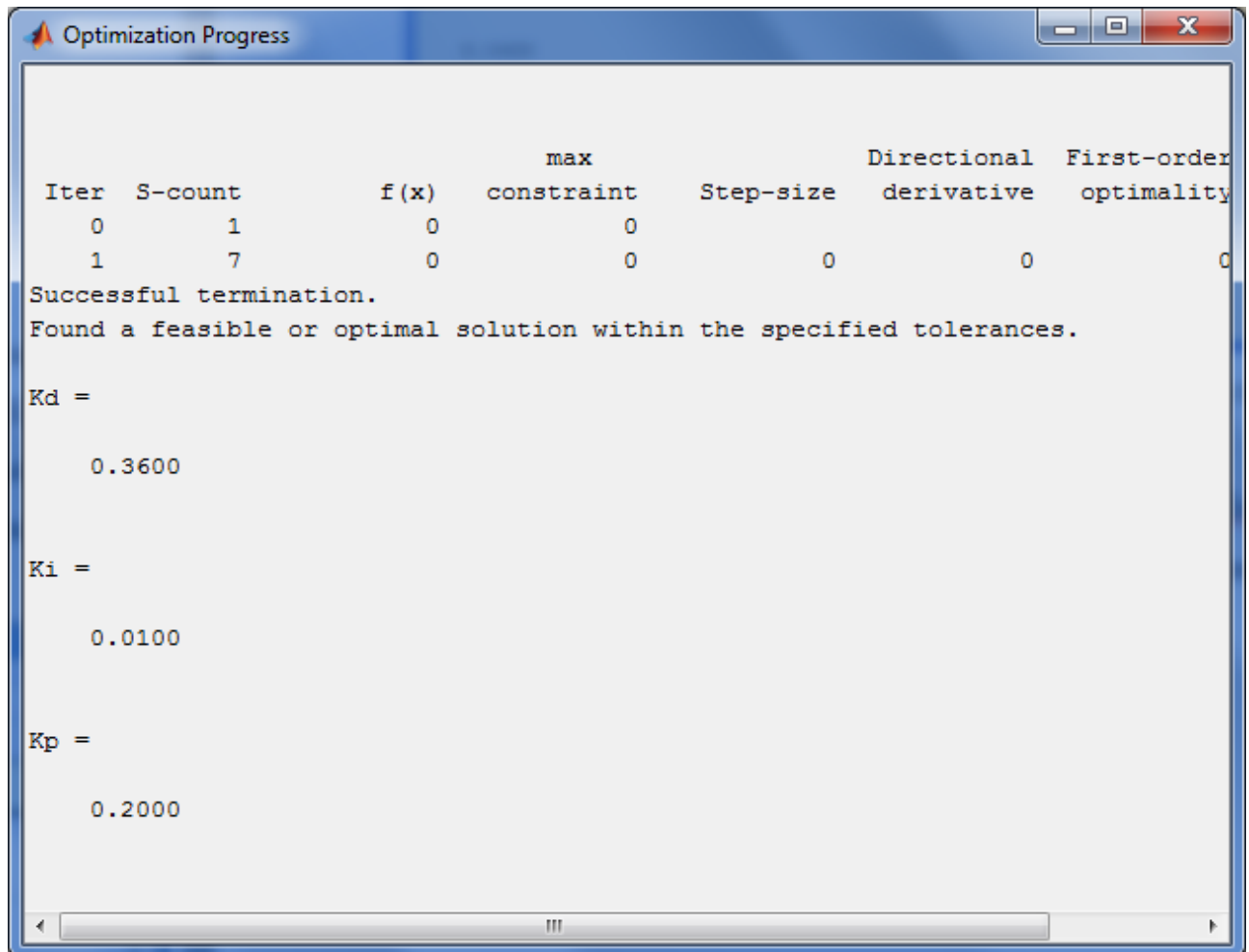


Рис. 4.15. Результат дії блоку Signal Constraint

В робочій області MATLAB з'являється вікно з параметрами регулятора (рис. 4.16).



```
Optimization Progress

Iter  S-count  f(x)  max constraint  Step-size  Directional derivative  First-order optimality
0      1         0         0             0             0             0
1      7         0         0             0             0             0

Successful termination.
Found a feasible or optimal solution within the specified tolerances.

Kd =
    0.3600

Ki =
    0.0100

Kp =
    0.2000
```

Рис. 4.16. Оптимальні параметри налаштування регулятора

Після введення цих параметрів у блок PID Controller можемо запуснути процес імітаційного моделювання. Криві процесу регулювання зображені на рис. 4.17. та 4.18.

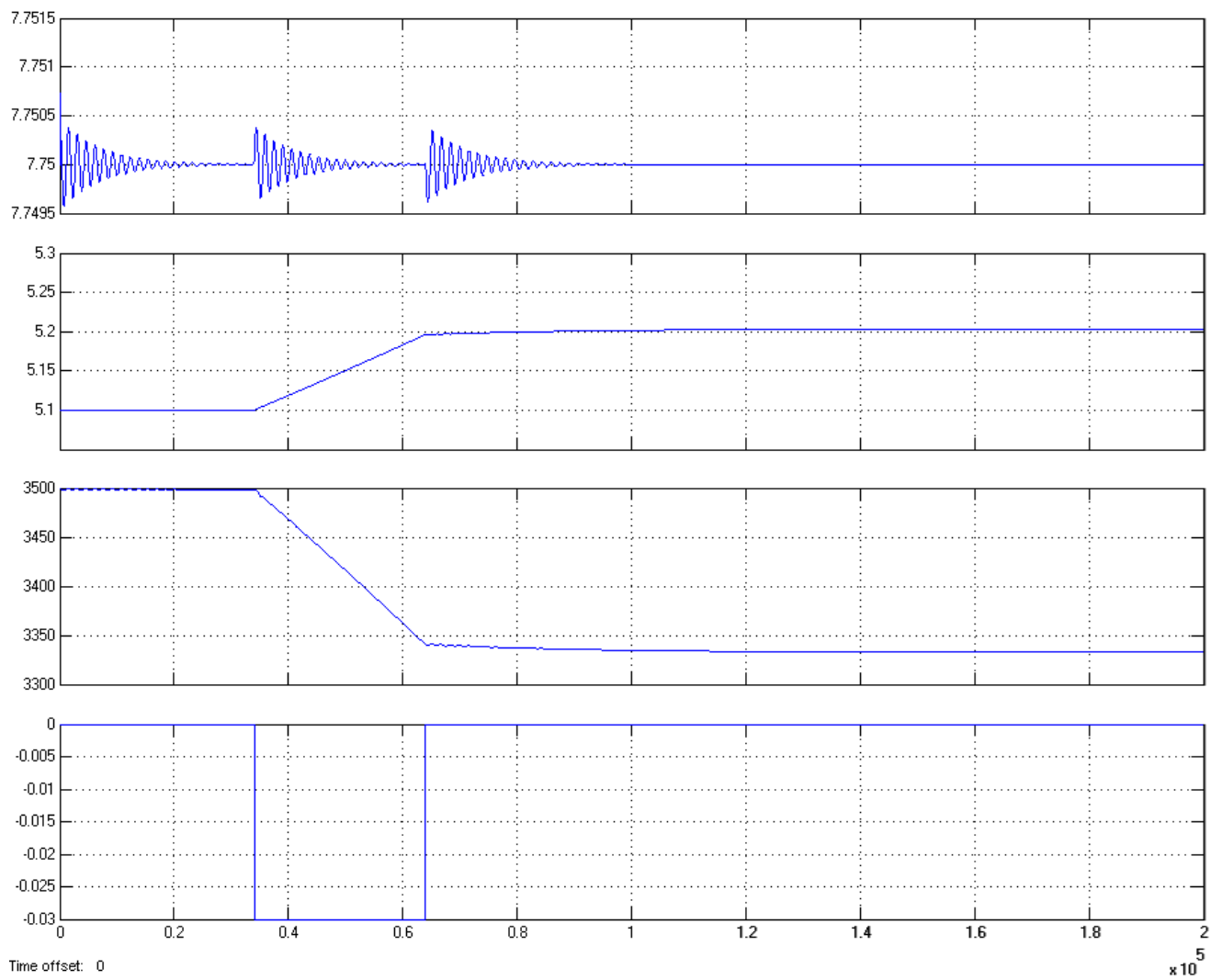


Рис. 4.17. Динаміка роботи системи зі звичайним регулятором (збурення по каналу споживача газу)

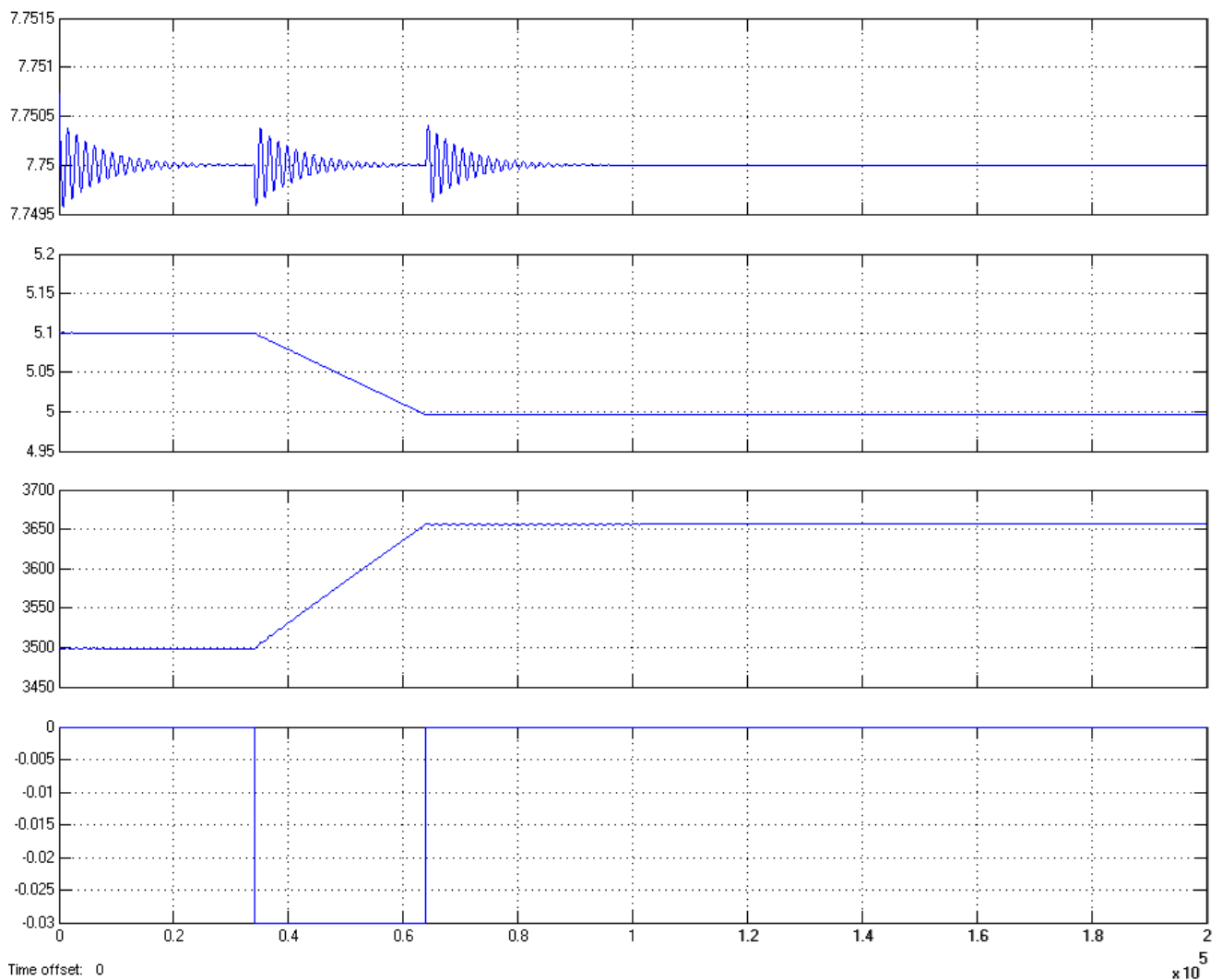


Рис. 4.18. Динаміка роботи системи зі звичайним регулятором (збурення по каналу компресорної станції)

Аналізуючи отримані результати бачимо, що дія збурення призводить до невеликих коливань керованої величини, амплітуда яких становить 0,0004 МПа, показник затухання яких 0,125. Через те, що коливання є дуже малими (їх амплітуда становить 0,005% від оптимального значення) можемо вважати, що пере регулювання відсутнє.

#### Висновки до розділу 4

Проведено дослідження моделі газоперекачувального агрегату із різними видами регуляторів в середовищі Simulink.

Проаналізувавши результати виявлено, що:

- найбільш ефективним в даному випадку є нечіткий регулятор з ПД-законом керування;

- при застосуванні ПД-фазі регулятора якісні показники роботи нечіткої автоматичної системи керування не змінилися суттєво у порівнянні із традиційною системою керування, перерегулювання являється відсутнім, але присутня певна перевага у якості а також динаміці керувальних сигналів, котрі надходять на ВМ у порівнянні із класичним ПД-регулятором, при використанні котрого були присутні незначні коливання;

- при використанні нечіткого контролера гарантується досить висока точність автоматичного регулювання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано огляд та аналіз сучасних середовищ для проектування систем автоматичного керування і контролю як з використанням класичних так і нечітких регуляторів, що дало можливість розробити ефективні способи керування газоперекачувальними агрегатами із застосуванням цих регуляторів.

Виконано розроблена моделі газоперекачувального агрегату із прилеглими до неї ділянками трубопроводів, що представило можливість здійснення досліджень за допомогою імітаційного моделювання за допомогою реальних експлуатаційних режимів.

Синтезована АСК регулювання тиском на виході нагнітача із застосуванням нечіткого регулятора а також виконано імітаційне моделювання САК, котре дало можливість підтвердити ефективність роботи контролерів з нечітким виводом при різних видах збурень на об'єкті.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Семенцов, Г. Н. Теорія автоматичного керування [Текст] : підручник / Г. Н. Семенцов. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 1999. – 610 с.
2. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. [Текст]: конспект лекцій / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024. – 159 с.
3. Горбійчук, М. І. Математичні методи оптимізації [Текст]: навч. посіб. / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2018. – 302 с.
4. Семенцов, Г. Н. Теорія автоматичного управління (нелінійні та дискретні системи) [Текст]: навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. – 96 с.
5. Семенцов, Г. Н. Штучні нейромережі та фаззі логіка [Текст]: лабораторний практикум / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, П. О. Івасишин. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2006. – 70 с.
6. Фазі-логіка в системах керування [Текст]: навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, М. В. Шавранський, В. С. Борин. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2002. – 84 с.
7. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування [Текст]: метод. вказівки до виконання курс. роботи / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. – 57 с.
8. Семенцов, Г. Н. Теорія автоматичного управління спеціалізованими системами [Текст]: навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, А. І. Лагойда. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 74 с.
9. Інтегровані та адаптивні системи керування [Текст] : конспект лекцій / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, Я. Р. Когуч, М. М. Дранчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 65 с.
10. Автоматизація виробничих процесів в енергетиці [Текст]: навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, Я. Р. Когуч, М. В. Шавранський, М. М. Дранчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2003. – 372 с.

## ДОДАТКИ

## Додаток А

Тези на тему: «Розробка автоматизованої системи керування газоперекачувальним агрегатом із застосуванням нечіткого регулятора»

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ, ТЕХНІЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ

МАТЕРІАЛИ  
НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ  
КОНФЕРЕНЦІЇ

Івано-Франківськ

2025

<i>М. І. Горбійчук, І. С. Єднак, Ю. В. Пилипчук</i>	Синтез оптимальної системи автоматичного керування процесом низькотемпературної сепарації природного газу	73
<i>В. О. Лось, О. В. Кучмистенко</i>	Моделювання та дослідження системи регулювання температурних режимів установки гідроочищення гасу в середовищі Aspen Hysys	75
<i>Є. Т. Боднарук, О. В. Кучмистенко</i>	Дослідження автоматизованої системи керування установки атмосферної перегонки нафти	77
<i>Н. М. Паньків, О. В. Кучмистенко</i>	Опис структурних зв'язків системи автоматичного регулювання барабанного котла	79
<i>Д. О. Бабенко, А. І. Лагойда</i>	Інтелектуалізація системи керування процесом хлорування бензолу з використанням цифрового двійника	81
<i>В. К. Калініченко, А. І. Лагойда</i>	Створення системи керування технологічним процесом виробництва технічного вуглецю шляхом термічного розкладання	83
<i>А. І. Яблонський, А. І. Лагойда</i>	Розроблення системи керування реактором у технології каталітичного крекінгу з псевдозрідженим шаром	85
<i>І. В. Савчин, А. І. Лагойда</i>	Модернізація системи автоматизованого керування процесом гідравлічного розриву пласта на нафтових і газових родовищах із використанням нечіткої логіки	87
<i>В. О. Ткаченко, А. І. Лагойда</i>	Синтез автоматизованої нейромережевої системи керування скруббером для депарафінації дизельного палива	90
<i>М. К. Калініченко, А. І. Лагойда</i>	Оптимізація багаторівневої системи автоматизованого керування процесом переробки вторинного нафтового дистилляту	92
<i>М. О. Дідоха, Л. І. Лагойда</i>	Розробка автоматизованої системи керування газоперекачувальним агрегатом із застосуванням нечіткого регулятора	94
<i>Н. С. Шеремета, Л. І. Лагойда</i>	Автоматизоване визначення та ідентифікація реальних приведених характеристик відцентрових нагнітачів	96

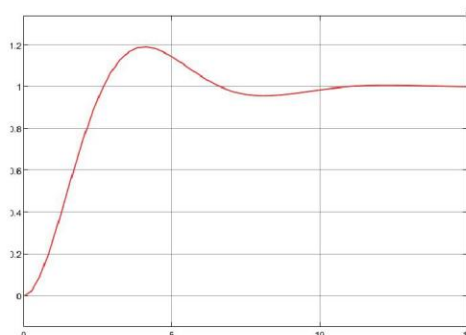


Рисунок 2 - Графік витрати холодної води

Літературні джерела

1 Горбійчук, М. І. Математичні методи оптимізації [Текст] : лаб. практикум / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016. – 79 с.

2 Семенцов Г.Н. Автоматизація процесів переробки нафти і газу. Львів, 1992. 268 с.

УДК 681.51

### **РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА**

*М. О. Дідоха, Л. І. Лагойда*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(0342)727167,  
e-mail: liudmyla.lahoida@nung.edu.ua*

Сучасна газова промисловість України є одним із ключових секторів паливно-енергетичного комплексу країни. Надійність функціонування цієї галузі безпосередньо впливає на стабільність національної економіки та на постачання природного газу до країн Західної Європи.

Основним елементом компресорних станцій, відповідальних за транспортування газу, є газоперекачувальні агрегати. Тому розробка та впровадження нечітких регуляторів для типового газоперекачувального агрегату має велике практичне значення для забезпечення високої ефективності та якості газопостачання.

У ході досліджень була створена модель газоперекачувального агрегату (рисунок 1) разом із суміжними ділянками трубопроводів, що дозволило здійснити імітаційне моделювання реальних експлуатаційних режимів об'єкта.

Процес розробки нечіткого регулятора є комплексним і потребує високого рівня концентрації та експертних знань. Він включає декілька взаємопов'язаних етапів проектування. На початковому етапі було проведено опитування фахівців, які надали детальні та ґрунтовні відповіді на поставлені питання.



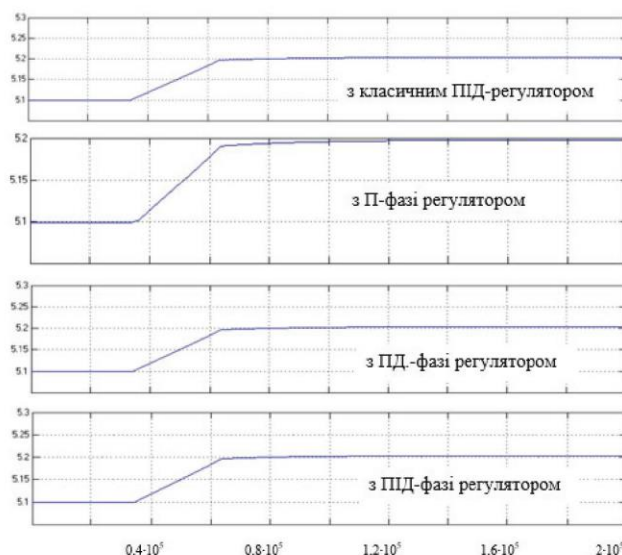


Рисунок 2 - Динаміка зміни тиску перед газоперекачувальним агрегатом з різними регуляторами

#### Літературні джерела

1 Семенцов, Г. Н. Теорія автоматичного управління (нелінійні та дискретні системи) [Текст] : навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2014. – 96 с.

2 Горбійчук, М. І. Математичне моделювання на ЕОМ технологічних об'єктів [Текст] : навч. посіб. / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ : Факел, 2001. – 240 с.

УДК 681.5

### АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ РЕАЛЬНИХ ПРИВЕДЕНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ

*Н. С. Шеремета, Л. І. Лагойда*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(0342)727167,  
e-mail: liudmyla.lahoida@nung.edu.ua*

У вітчизняній технічній літературі термін «нагнітач» традиційно використовується для позначення лопатевих компресорних машин, що забезпечують відношення тиску понад 1,1 та не оснащені пристроями для охолодження робочого середовища під час процесу стискання. У зарубіжних джерелах, зокрема англомовних, подібні машини здебільшого класифікують як компресори, а іноді застосовують термін бустери.

У ході проведених досліджень було визначено приведені характеристики



ІТЕТІІ20250172

# СЕРТИФІКАТ

## УЧАСНИКА КОНФЕРЕНЦІЇ

0,15 кредити ECTS

### ДІДОХА М. О.

Всеукраїнська Інтернет-конференція молодих учених і студентів  
«Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»



09 жовтня 2025  
Голова організаційного комітету

Сергій ЗІКРАГИЙ

Івано-Франківськ

