

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

МР.АКПм-56.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-2

**Ілля Савчин**

**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**

Савчин Ілля Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5  
(індекс)

## **МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

Розроблення автоматизованої інтелектуальної системи гідравлічного розриву

(назва роботи)

пласта нафтогазових родовищ на основі методів 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

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### **Здобувач освітнього ступеня**

АКПм-24-2

(шифр групи)

І.В. Савчин

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### **Науковий керівник**

доцент, к.т.н.

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

А.І. Лагойда

### **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**

Савчин Ілля Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої інтелектуальної системи гідравлічного розриву пласта нафтогазових родовищ на основі методів нечіткої логіки

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

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

затверджені 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. Дослідження процесу гідравлічного розриву пласта з точки зору об'єкта автоматизації. 2. Розробка структури системи керування процесом гідравлічного розриву пласта. 3. Синтез ефективної системи автоматичного керування насосним агрегатом. Загальні висновки.

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 30.10.2024

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження процесу гідравлічного розриву пласта з точки зору об'єкта автоматизації	02.12.2025	
2	Розробка структури системи керування процесом гідравлічного розриву пласта	03.12.2025	
3	Синтез ефективної системи автоматичного керування насосним агрегатом	04.12.2025	

**Студент** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Савчин І.В.** \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Лагойда А.І.** \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## 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.

Магістерська робота присвячена розробленню інтелектуальної системи автоматичного керування процесом гідравлічного розриву пласта (ГРП) нафтогазових родовищ із використанням методів нечіткої логіки. У межах дослідження проведено детальний аналіз сучасних інструментальних середовищ, призначених для проектування систем автоматичного керування та моніторингу технологічних процесів із застосуванням нечітких регуляторів.

Розроблено систему керування тиском на виході технологічного агрегату з використанням нечіткої логіки, здійснено її синтез та імітаційне моделювання, що підтвердило ефективність роботи нечіткого регулятора в умовах дії зовнішніх і внутрішніх збурень.

Створено математичну модель насосного агрегату, який застосовується під час проведення процесу ГРП, що забезпечує можливість дослідження динаміки системи за допомогою імітаційного моделювання в умовах, наближених до реальних режимів експлуатації. Проведено порівняльний аналіз ефективності систем автоматичного керування насосним агрегатом на основі як нечітких, так і класичних регуляторів.

Ключові слова: моделювання, гідравлічний розрив пласта, система керування, нечітка логіка, насосний 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 an intelligent system for automatic control of the hydraulic fracturing process (HF) of oil and gas fields using fuzzy logic methods. As part of the study, a detailed analysis of modern tool environments intended for the design of automatic control systems and monitoring of technological processes using fuzzy controllers was conducted.

A pressure control system at the outlet of a technological unit was developed using fuzzy logic, its synthesis and simulation modeling were carried out, which confirmed the effectiveness of the fuzzy controller under the influence of external and internal disturbances.

A mathematical model of the pumping unit used during the hydraulic fracturing process has been created, which provides the opportunity to study the dynamics of the system using simulation modeling in conditions close to real operating conditions. A comparative analysis of the effectiveness of automatic control systems for the pumping unit based on both fuzzy and classical controllers has been carried out.

Key words: modeling, hydraulic fracturing, control system, fuzzy logic, pumping unit.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>9</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>10</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА З ТОЧКИ ЗОРУ ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....</b>	<b>14</b>
1.1. Суть процесу гідравлічного розриву пласта.....	14
1.2. Досвід застосування гідравлічного та потужного гідравлічного розриву пласта.....	20
1.3. Аналіз структурної організації процесу інтенсифікованого гідравлічного розриву пласта.....	23
1.4. Вибір об’єкту керування а також обладнання для ПГРП.....	26
1.5. Дослідження насосного агрегату, як керованого об’єкта.....	29
1.6. Постановка завдання на магістерську роботу.....	34
Висновки до розділу 1.....	35
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА.....</b>	<b>36</b>
2.1. Дослідження динамічних властивостей процесу гідравлічного розриву пласта.....	36
2.2. Особливості систем автоматизованого керування побудованих на основі методів нечіткої логіки.....	37
2.3. Розробка структурної схеми насосного агрегату.....	39
2.4. Проведення експериментального дослідження об’єкта керування.....	40
2.5. Дослідження динамічних властивостей систем автоматичного керування.....	49
2.6. Дослідження тиску на виході з насосного агрегату.....	50

2.6.1. Визначення оціночних характеристик тиску на виході із НА.....	50
2.6.2. Встановлення закону ймовірнісного розподілу тиску на виході насосного агрегату та його статистична перевірка за критерієм узгодженості Пірсона.....	51
2.7. Аналіз тиску на усті свердловини за допомогою методів нечіткої логіки.....	55
2.7.1. Аналіз функції належності для значень тиску на усті свердловини.....	55
2.7.2. Встановлення числа термів для представлення величини тиску на усті свердловини.....	58
Висновки до розділу 2.....	59
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАСОСНИМ АГРЕГАТОМ.....</b>	<b>60</b>
3.1. Розробка системи управління динамічними об'єктами з параметрами, що мають нечітку природу.....	60
3.2. Створення нечіткого регулятора для автоматизованого керування насосним агрегатом.....	61
3.3. Розробка імітаційної моделі з метою керування насосним агрегатом....	67
Висновки до розділу 3.....	69
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>70</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>71</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>73</b>

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

FLT - Fuzzy Logic Toolbox.

FIS - Fuzzy Inference System.

ГРП - гідравлічний розрив пласта.

УПП - установка плавного пуску.

НКТ - насосно-компресорна труба.

ГТД - газотурбінний двигун.

НС - насосна станція.

СКУ - станція контролю і управління.

ПГРП - потужний гідророзрив.

УЗ - установка змішувача.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Гідравлічний розрив пласта (ГРП) є одним із найефективніших методів інтенсифікації видобутку нафти й газу зі свердловин. Суть методу полягає у створенні або розширенні тріщин у продуктивному пласті шляхом закачування в нього під високим тиском спеціальної рідини чи піни. Для збереження відкритого стану тріщин у них вводиться закріплювальний агент (пропант), який забезпечує їхню високу проникність і стійкість після зниження тиску. У результаті цього збільшується ефективна фільтраційна поверхня свердловини, а в деяких випадках до розробки залучаються додаткові, раніше неактивні зони пласта.

На сучасному етапі автоматизація процесу гідравлічного розриву пласта перебуває на стадії активного розвитку, що зумовлює потребу вдосконалення її технічної та алгоритмічної основи. Одним із перспективних напрямів еволюції є створення систем автоматичного керування на базі методів нечіткої логіки. Перевага таких систем полягає у використанні лінгвістичних правил для формування регулятора, що дає змогу реалізувати гнучке й адаптивне керування процесом. Ці правила можуть бути сформовані на основі практичного досвіду та інтуїтивних знань експертів, що дозволяє ефективно враховувати невизначеність і нелінійність характеристик реального технологічного об'єкта.

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Гідравлічний розрив пласта (ГРП) є одним із найефективніших методів інтенсифікації видобутку нафти й газу зі свердловин. Суть методу полягає у створенні або розширенні тріщин у продуктивному пласті шляхом закачування в нього під високим тиском спеціальної рідини чи піни. Для збереження відкритого стану тріщин у них вводиться закріплювальний агент (пропант), який забезпечує їхню високу проникність і стійкість після зниження тиску. У результаті цього збільшується ефективна фільтраційна поверхня свердловини, а в деяких випадках до розробки залучаються додаткові, раніше неактивні зони пласта.

На сучасному етапі автоматизація процесу гідравлічного розриву пласта

перебуває на стадії активного розвитку, що зумовлює потребу вдосконалення її технічної та алгоритмічної основи. Одним із перспективних напрямів еволюції є створення систем автоматичного керування на базі методів нечіткої логіки. Перевага таких систем полягає у використанні лінгвістичних правил для формування регулятора, що дає змогу реалізувати гнучке й адаптивне керування процесом. Ці правила можуть бути сформовані на основі практичного досвіду та інтуїтивних знань експертів, що дозволяє ефективно враховувати невизначеність і нелінійність характеристик реального технологічного об'єкта.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної магістерської роботи є розроблення та синтез системи автоматичного керування (САК) насосними агрегатами, що використовуються у процесі гідравлічного розриву пласта, із застосуванням методів нечіткої логіки. Досягнення поставленої мети передбачає виконання таких основних завдань:

- провести аналітичний огляд сучасних підходів до керування технологічними об'єктами та дослідити програмні середовища, призначені для проектування систем автоматичного керування й моніторингу;
- виконати синтез системи керування насосним агрегатом на основі принципів нечіткої логіки, що забезпечують адаптивність до зміни робочих умов;
- здійснити порівняльне дослідження ефективності функціонування САК із використанням нечіткого регулятора та класичного підходу до регулювання, з оцінкою динамічних характеристик і стабільності системи.

*Об'єктом дослідження* виступає технологічний процес здійснення гідравлічного розриву пласта в умовах нафтогазових родовищ.

*Предметом дослідження* є методи та алгоритмічні підходи до автоматизованого управління роботою насосного агрегату, побудовані з використанням принципів нечіткої логіки.

**Методи дослідження.** Використано методи математичної статистики та теорії ймовірностей, спрямовані на оцінювання стану об'єкта керування та прогнозування його параметрів. Крім того, застосовано математичні засоби теорії автоматичного керування для аналізу реалізованості розробленої системи

моніторингу й проведення ідентифікації технологічних параметрів, що визначають стан досліджуваного об'єкта.

**Новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- у середовищі MATLAB розроблено та випробувано імітаційну модель насосного агрегату для проведення гідравлічного розриву пласта, побудовану на основі його реальних робочих характеристик. Створена модель надає оперативно-диспетчерському персоналу можливість ефективно розв'язувати ключові технологічні завдання, що визначають результативність процесу ГРП;

- виконано синтез і реалізовано імітаційне моделювання автоматизованої системи керування насосним агрегатом із застосуванням нечіткого регулятора, що забезпечує гнучкий вибір відповідної локальної бази знань для розв'язання конкретних технологічних ситуацій;

- удосконалено систему автоматичного керування основними параметрами процесу гідророзриву пласта та обґрунтовано доцільність її використання для автоматизованого управління замість традиційних складних нелінійних математичних моделей.

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

Тематика магістерської роботи відповідає напрямку держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ІФНТУНГ «Автоматизоване управління багатовимірними об'єктами на засадах гібридних систем обчислювального інтелекту» відповідно до основного напрямку наукової школи (2007 р. заснування) «Автоматизоване управління технологічними процесами на основі методів нечіткої логіки і штучних нейромереж» (сертифікат № 3 від 2007 р.). Науковою базою роботи стали результати, отримані в процесі виконання науково-дослідних робіт, що здійснювалися за планом 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).

**Практичне значення отриманих результатів.** У середовищі MATLAB розроблено нечіткий регулятор, який забезпечує високоефективне керування роботою насосного агрегату.

**Структура та обсяг магістерської роботи.** Магістерська робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Повний обсяг магістерської роботи становить 79 сторінок: обсяг основного тексту - 70 сторінок, 40 рисунків, 8 таблиць; список використаних джерел, що включає 23 найменування та займає 2 сторінки; 2 додатки на 7 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА З ТОЧКИ ЗОРУ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 1.1. Суть процесу гідравлічного розриву пласта

Одним найефективніших методів підвищення нафтовіддачі та інтенсифікації припливу є гідравлічний розрив пласта (ГРП). Цей метод підвищення нафтовіддачі має ряд технологічних модифікацій, які обумовлені відмінностями в геологічних умовах і типах покладів. [1]

У технічній літературі описується, що суть процесу ГРП полягає в нагнітанні у свердловину по спеціальних насосно-компресорних трубах (НКТ) високов'язкої рідини (або гелю), приготованої на основі води або вуглеводневої рідини (нафта, дизельне паливо). Тиск, що створюється рідиною, розриває породу пласта по площинах мінімальної напруги гірського тиску. В результаті в пласті утворюється тріщина. Після розриву пласта, за рахунок закачування рідини, тріщина, що утворилася, збільшується в розмірах. При досягненні тріщиною певних розмірів в рідину розриву починає подаватися розклинюючий агент, який називається пропантом (штучний пісок виготовлений на основі бокситів). Розклинюючий агент транспортується рідиною розриву в тріщину. Його завдання утримувати тріщину в розкритому стані після припинення подачі рідини розриву у свердловину і зняття надлишкового тиску. [1]

Отже, утворення тріщини, заповненої пропантом, сприяє розширенню активної зони пласта та залученню до розробки раніше непрацюючих його ділянок (рис. 1.1). Такий підхід забезпечує багаторазове підвищення продуктивності свердловини - у середньому в три рази - та зростання коефіцієнта вилучення газу з пласта [2].

Процес формування штучних тріщин супроводжується зниженням тиску за умови сталого темпу закачування робочої рідини, тоді як при розкритті природних тріщин спостерігається непропорційне збільшення витрати рідини

розриву відносно зростання тиску [2].

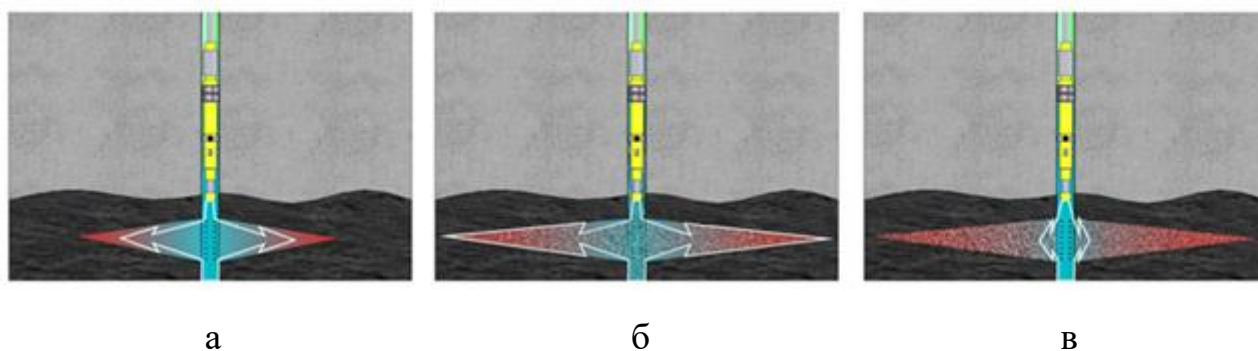


Рис. 1.1. Послідовність етапів гідророзриву пласта включає: а - нагнітання гелеутворювальної рідини з метою ініціювання та розкриття тріщини в поріді; б - заповнення сформованої тріщини пропантом для її стабілізації; в - продавлювання пропанту в товщу пласта з метою забезпечення стійкості та провідності створеного каналу

Гідравлічний розрив пласта (ГРП) виконується з метою підтримання та підвищення продуктивності свердловин. Результати численних досліджень підтверджують, що застосування технології ГРП є більш доцільним та економічно ефективним порівняно з бурінням нових свердловин. Такий підхід виправданий як з точки зору економічної ефективності, так і з позицій раціональної розробки родовища. Реалізація процесу гідророзриву потребує всебічного аналізу термодинамічних умов і стану призабійної зони свердловини, а також узагальнення та використання наявного промислового досвіду, накопиченого під час експлуатації даного родовища. Застосування технології гідравлічного розриву пласта доцільно рекомендувати для таких категорій свердловин [1]:

- із незначним припливом флюїду під час випробувань;
- за умов високого пластового тиску при низькій проникності колекторних порід;
- із забрудненою або ущільненою призабійною зоною;
- зі зниженою продуктивністю;
- нагнітальних свердловин із недостатньою прийомистістю;
- нагнітальних свердловин, у яких необхідно розширити інтервал

поглинання робочого середовища.

Підвищення продуктивності свердловини після проведення гідравлічного розриву пласта [3] може бути обумовлене сукупністю таких факторів:

- формуванням розширеної фільтраційної поверхні, площа якої значно перевищує поверхню стовбура свердловини в межах продуктивного горизонту;
- інтенсивним очищенням каналів перфорації під час руху робочої пульпи, що сприяє зменшенню гідравлічного опору;
- залученням до розробки всіх прошарків продуктивного пласта, перетнутих утвореною вертикальною тріщиною [3].

Основною метою проведення гідравлічного розриву пласта є підвищення продуктивності свердловин шляхом цілеспрямованого впливу на привибійну зону, що полягає у зміні властивостей пористого середовища та флюїду внаслідок формування системи штучних тріщин. Ефективність процесу гідророзриву визначається сукупністю чинників, серед яких ключову роль відіграють тиск закачуваної рідини, швидкість її нагнітання та концентрація пропанту в робочій суміші [1].

Розкриття природних або утворення нових тріщин відбувається за умови, коли тиск нагнітання перевищує внутрішній пластовий тиск. Типову структурну схему процесу гідравлічного розриву пласта подано на рис. 1.2 [3].

Як свідчать результати досліджень, розкриття існуючих тріщин відбувається здебільшого після підвищення тиску до деякої межі та супроводжується несуттєвою його зміною. У випадку розкриття нових тріщин відбувається стрибкоподібне зниження тиску (зазвичай на 3 і 7 МПа) на усті свердловини, яке спостерігається при постійній витраті під час помпування рідини у свердловину.

З метою забезпечення високої проникності тріщин уже після виконання гідророзриву а відповідно і зниження тиску всередині пласта до пластового або вибійного, їх закріплюють за допомогою кварцового піску чи пропанту. За допомогою технології гідравлічного розриву забезпечується висока проникність тріщин, яка заповнена закріплювачем.

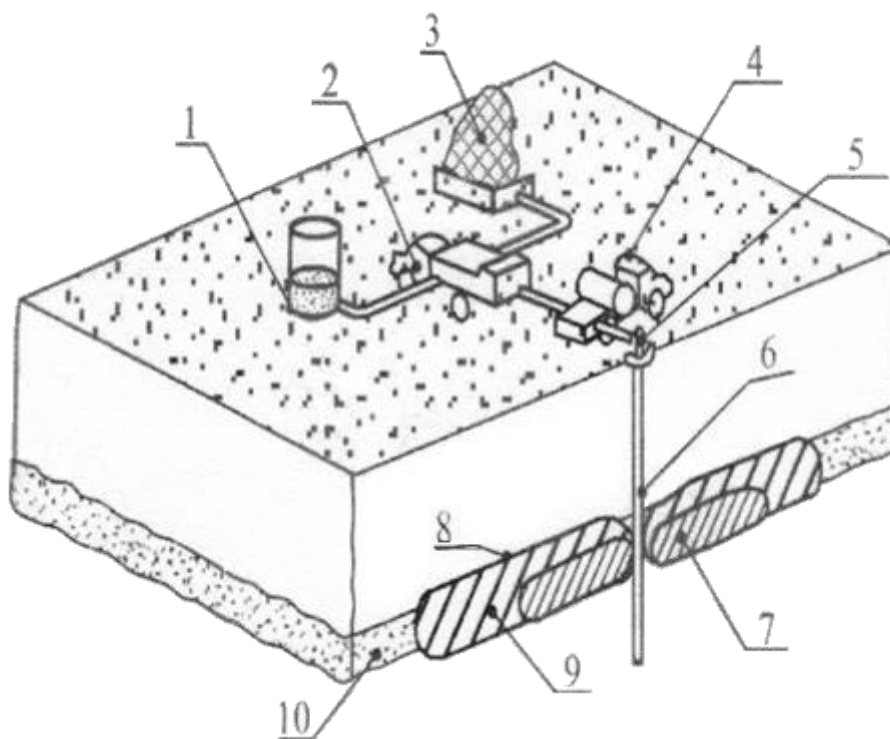


Рис. 1.2. Типова технологічна схема процесу гідравлічного розриву пласта включає такі основні елементи: 1 - резервуар для зберігання технологічних рідин; 2 - змішувальний вузол; 3 - контейнер із пропантом (матеріалом для закріплення тріщин); 4 - насосний агрегат; 5 - обладнання устя свердловини; 6 - свердловинний стовбур; 7 - пропант, що фіксує тріщини; 8 - утворена тріщина в породі; 9 - робоча рідина, яка забезпечує розрив пласта; 10 - продуктивний пласт, у межах якого здійснюється гідророзрив

Технологію гідравлічного розриву пласта застосовують у породах різного літологічного складу, за винятком пластичних сланців і глинистих утворень, у яких процес утворення тріщин ускладнений через їхню низьку крихкість та високу деформаційну здатність. Зазначений метод здатен не тільки відновити природну продуктивність свердловин, а також суттєво її збільшити. [4]

У практичній реалізації гідравлічний розрив пласта може здійснюватися за різними технологічними схемами, які, у загальному випадку, класифікують залежно від об'єму пропанту (закріплювача тріщин) та його концентрації в робочій рідині [3].

Технологія гідророзриву без використання закріплювача тріщин базується

на припущенні, що утворені або промиті в пласті тріщини після зниження тиску до рівня пластового чи вибійного певний час залишаються частково відкритими. У такому разі їх стінки не змикаються повністю, що дозволяє зберегти підвищену проникність у привибійній зоні.

Підвищення продуктивності свердловин після проведення гідророзриву без закріплення тріщин може бути зумовлене: високошвидкісним очищенням каналів перфорації під час руху робочої рідини; утворенням зон підвищеної проникності внаслідок переміщення твердих частинок, що потрапили у тріщини під час їх розкриття; зміною мікрорельєфу поверхні тріщин; а також ерозійним розмиванням їхніх стінок [5].

Процес гідравлічного розриву пласта без застосування закріплювача тріщин є доцільним переважно для нових свердловин, які характеризуються високим пластовим тиском, що дорівнює або перевищує гідростатичний, мають низькопроникні колектори та забруднену привибійну зону.

Технологія гідророзриву із використанням закріплювача тріщин реалізується із застосуванням ньютонівських або слабо неньютонівських робочих рідин, у результаті чого формуються тріщини порівняно малої висоти та ширини, спрямовані в глибину продуктивного пласта. Закріплення утворених тріщин здійснюється за допомогою кварцового піску, що вводиться в розчин у невисоких концентраціях [4].

Потужний гідравлічний розрив пласта (ПГРП) із застосуванням закріплювача являє собою процес формування високопровідних тріщин і їх подальшого закріплення за допомогою високих концентрацій пропанту.

Така технологія отримала свою назву через послідовність виконання операцій: спочатку здійснюється попередній етап - міні-ГРП, під час якого у пласт закачують 20–30 м<sup>3</sup> малов'язкої рідини або гелю. Цей етап дає змогу визначити тиск розриву, оцінити проникність колектора, спрогнозувати розвиток тріщин, уточнити параметри подальшого ПГРП та оцінити доцільність і потенційну ефективність його проведення.

Основний етап ПГРП передбачає закачування рідини розриву (гелю) зі

швидкістю 2,0–3,6 м<sup>3</sup>/хв, після чого у пласт подається 20–40 м<sup>3</sup> пульпи у вигляді гелю з 6–10 тоннами пропанту, а завершальним етапом є введення протискуючої рідини [6].

Під час відбору свердловин для проведення ПГРП необхідно враховувати якість цементного кільця в інтервалі розриву, відстань до водонафтового контакту, технічний стан експлуатаційної колони та гирлового обладнання.

Під час підготовчих робіт до проведення потужного гідравлічного розриву пласта (ПГРП) особливу увагу приділяють технічному стану свердловини, її підземного та наземного обладнання, а також спеціалізованої техніки, задіяної у виконанні операцій.

Перед початком ПГРП зі свердловини вилучають насосно-компресорні труби (НКТ) та інше глибинне обладнання. Далі на колоні НКТ спускають пакер, який забезпечує ізоляцію інтервалу обробки та захист верхньої частини експлуатаційної колони від дії високих тисків. Гирло свердловини оснащується спеціальною арматурою, розрахованою на робочий тиск до 70 МПа.

Насосні агрегати, призначені для нагнітання технологічних рідин, під'єднують до гирлової арматури через блок маніфольдів. Підготовка робочих рідин здійснюється у спеціалізованих ємностях загальним об'ємом від 100 до 300 м<sup>3</sup>.

ПГРП здійснюється опресування всіх нагнітальних комунікацій, включно з блоком маніфольдів та гирловою арматурою, до тиску, що у півтора раза перевищує робочий.

Під час виконання операції змішувальний пристрій подає технологічні рідини з ємностей під надлишковим тиском 0,3–0,6 МПа через колектор низького тиску до насосних агрегатів, які забезпечують закачування цих рідин у свердловину. Введення піску або пропанту у технологічну рідину здійснюється за допомогою шнекових подавачів змішувача, у який матеріал надходить із піскового. У деяких випадках для зменшення гідродинамічного навантаження на насосно-компресорні труби (НКТ) у затрубному просторі свердловини створюють додатковий тиск за допомогою агрегату типу ЦА.

Процес ПГРП розпочинається з перевірки приймальності пласта шляхом нагнітання буферної рідини розриву з мінімальною витратою, яку поступово підвищують до значення, що забезпечує утворення і фіксацію тріщин. Після цього в пласт закачують рідину-пісконосій із концентрацією твердих частинок у межах 100–300 кг/м<sup>3</sup>. Завершується процес протискуванням робочої суміші у пласт за допомогою спеціально підготовленої рідини. Після чого зупиняють подачу рідини і закривають НКТ поки рівень тиску в свердловині не понизиться до рівня атмосферного з метою уникнення зворотного винесення закріпобвача з тріщини. Далі піднімають НКТ з пакером та виконують спускання глибинного обладнання для освоєння і експлуатації свердловини.

## **1.2. Досвід застосування гідравлічного та потужного гідравлічного розриву пласта**

Однією з найдавніших теорій ГРП є теорія утворення горизонтальних тріщин при тиску, рівному повному гірському тиску плюс його додаткові величини, необхідні для розриву породи [7, 8]. У книзі Юстера і Калуна [7] приведені фактичні дані про тиск розриву неглибоко залягаючих пластів, з яких видно, що він в середньому дорівнює повному дійсному гірському тиску в цих пластах.

Слід додати, що в неглибоко залягаючих пластах і при повному гірському тиску в цих пластах ніякого ГРП бути не може, а можуть утворюватись тільки безліч радіально спрямованих канавок навколо перфорованої ділянки свердловини. Якщо в пласті зустрічаються природні тріщини, то останні є «шляхами найменшого опору» [9]. Порогові канавки спільно з природними тріщинами і забезпечують витрату рідини такою, що щомиті поступає з поверхні в результаті роботи нагнітального насоса.

Автор роботи [9] приводить: «згідно однієї з теорій отримання горизонтальних тріщин взагалі заперечується. Так в статті Гарісона, Кишника і Макс-Гвайра [10], що являє собою коротке повідомлення про проведені

експериментальні і теоретичні дослідження, вказується, що оскільки більшість промислових даних показують набагато менші значення тиску розриву в порівнянні з повним гірським тиском, то горизонтальні тріщини при ГРП виникають дуже рідко; отже, тріщини переважно є вертикальними». У роботі [10] також висловлюється думка, що «при мінімальному значенні ефективного гірського тиску утворюються вертикальні тріщини».

Гіпотеза утворення горизонтальної тріщини, висловлена акад. С. А. Христиановичем, згідно якої «вертикальний гірський тиск виявляється зменшеним поблизу свердловини зважаючи на пластичну деформацію маломіцних глин і глинистих сланців під час буріння свердловин, що залягають в покрівлі пласта, або схожих з ними порід, що знаходяться в самому пласті». Ці висловлювання по гіпотезі академіка можуть виконуватися тільки в «дезінтеграційній зоні», де дійсно відбувається розвантаження порід. За «дезінтеграційною зоною» горизонтальні тріщини утворитися не можуть.

З висновків авторів [9, 11] можна висловити твердження, що «рідина під час закачування йде «по шляхах найменшого опору», тобто, на думку авторів «подовжує і сполучає між собою наявні в пласті природні тріщини». Подовження тріщини пов'язане з тривалістю роботи насоса. Якщо ствол свердловини не перетинає жодної тріщини, то закачування рідини у свердловину відбувається при підвищеному тиску, оскільки міжфлюїдні тверді каркасні структури руйнуються при продавлюванні тріщин під значним тиском.

Дослідження, присвячені механізму при гідравлічному розриві пласта і математичному моделюванню цього процесу, обговорюються також в оглядах В.А. Реутова, I.S. Abou – Sayed, M.J. Economides, C.D. Parker, Z.A. Moschovidis, K.G. Nolte, N.R. Warpinski, R.W. Veatch, J.L. Gidley, D.E. Nierode, S.A. Holditch. У цих роботах вивчається вплив тріщин гідророзриву на фільтраційні процеси в пласті і на ефективність розробки родовищ нафти і газу. [12]

В Україні технологія гідравлічного розриву (гідравлічного розриву вугільного пласту) була вперше використана в 1954 році в рамках проекту з підземної дегазифікації вугілля, що передбачав видобування горючих газів -

продуктів підземного окиснення вугілля.

В 1958-1962 роках метод гідравлічного розриву активно розвивався і використовувався на родовищах в Україні. Гідророзрив пласта в основному проводився для освоєння нагнітальних свердловин. Надалі, після появи більш потужної техніки для закачування рідини в нагнітальні свердловини та відкриття потужних родовищ Західного Сибіру використання гідравлічного розриву значно обмежалося і відновилося лише наприкінці 80-х – в 90-х років 20 сторіччя внаслідок істотної зміни структури запасів [13].

Саме для того, щоб вдихнути у свердловини з тривалим періодом експлуатації друге життя, в почали знову застосовувати ГРП, але вже в удосконаленому його варіанті. Було взято курс на широке впровадження та модернізацію тих методів, які дозволяють максимально інтенсифікувати видобуток нафти і газу, а серед них найефективнішим є потужний гідравлічний розрив пласта. У такий спосіб розкриваються і збільшуються існуючі або нові тріщини в пласті під дією технологічної рідини, яку напompовується під високим тиском і закріплюється їх доставленим у пласті технологічною рідиною кварцевим піском або керамічним пропантом, що дозволяє забезпечити високу залишкову провідність тріщин після зниження тиску в пласті. [14, 15]

Ще з 1997 року у свердловинах родовищ Битків-Бабченського, Луквинського, Довбушансько-Бистрицького та Микуличинського впроваджують потужний гідравлічний розрив пласта з використанням спецтехніки фірми Stewart&Stivenson. На сьогодні здійснено вже 46 таких свердловино-операцій. Для закріплення тріщин закачували в пласт під час проведення одного такого ПГРП в середньому 6-10 тонн кварцевого піску або керамічного пропанту. Щоби приготувати технологічні рідини для проведення ПГРП, використовуються вітчизняні та імпорتنі хімреагенти. Після проведення потужного гідророзриву пласта додатковий видобуток становить 1100-1800 тонн нафти та 1000-1600 тис. кубометрів попутного газу на одну свердловину. А окупність ПГРП забезпечують уже додатково видобуті 900 тонн нафти. Нинішнього року на родовищах почали вдосконалювати цей процес – збільшують об'єми закачування керамічного

пропанту в пласт для закріплення тріщин. Саме за такою вдосконаленою технологією і провели нещодавно ПГРП в одній з свердловин Луквинського родовища, запомпувавши в пласт 94 кубометри технологічної рідини та 16,2 тонни керамічного пропанту. Після цього свердловину освоюватимуть та визначатимуть оптимальний режим її роботи. [16]

Технологія ПГРП успішно застосовується на території України. Протягом шести років на родовищах Прикарпаття та Дніпрово-Донецької западини було виконано понад 100 ПГРП у свердловинах глибиною від 1400 до 5900 м (Ю. Качмар, В. Цьомко, В. Григораш, А. Андрусак, В. Савчка) [15].

Спецтехніка фірми «Stewart & Stivenson» розрахована на роботу при тисках до 105 МПа з можливістю комп'ютерного контролю та керування та використанням неньютонівської високов'язкої рідини (водний гель на основі WGA-1 і вуглеводневий гель на основі HGA) та закріплювача тріщин – гідравлічного пропанту IPP 16/30. [15]

За допомогою зусиль іноземних а також українських учених розв'язано велику кількість задач, котрі пов'язаних із застосуванням нечіткої логіки з метою вирішення завдань пов'язаних із контролем та управлінням об'єктів нафтогазової промисловості.

Удосконалення потребують алгоритми для пристроїв, які виконують обробку нечіткої інформації, для покращення точності а також швидкодії, що відповідно покращить можливість виконання управління а відповідно і прийняття рішень у реальному масштабі часу.

### **1.3. Аналіз структурної організації процесу інтенсифікованого гідравлічного розриву пласта**

Геологічна будова та фізико-колекторні характеристики нафтогазових пластів зумовлюють доцільність застосування свердловинних гідродинамічних технологій для здійснення їх розкриття [16].

Технологія ГРП включає наведені нище операції: обв'язування (рис.1.3);

промивка свердловини; спускання в свердловину високоміцних НКТ із якорем та пакером на нижньому кінці; опресовування на робочий тиск наземного устаткування а також устя; дослідження прийомистості свердловини шляхом закачування рідини; прокачування у пласт рідини для розриву; продавочної рідини; рідини пісконосія. [17]

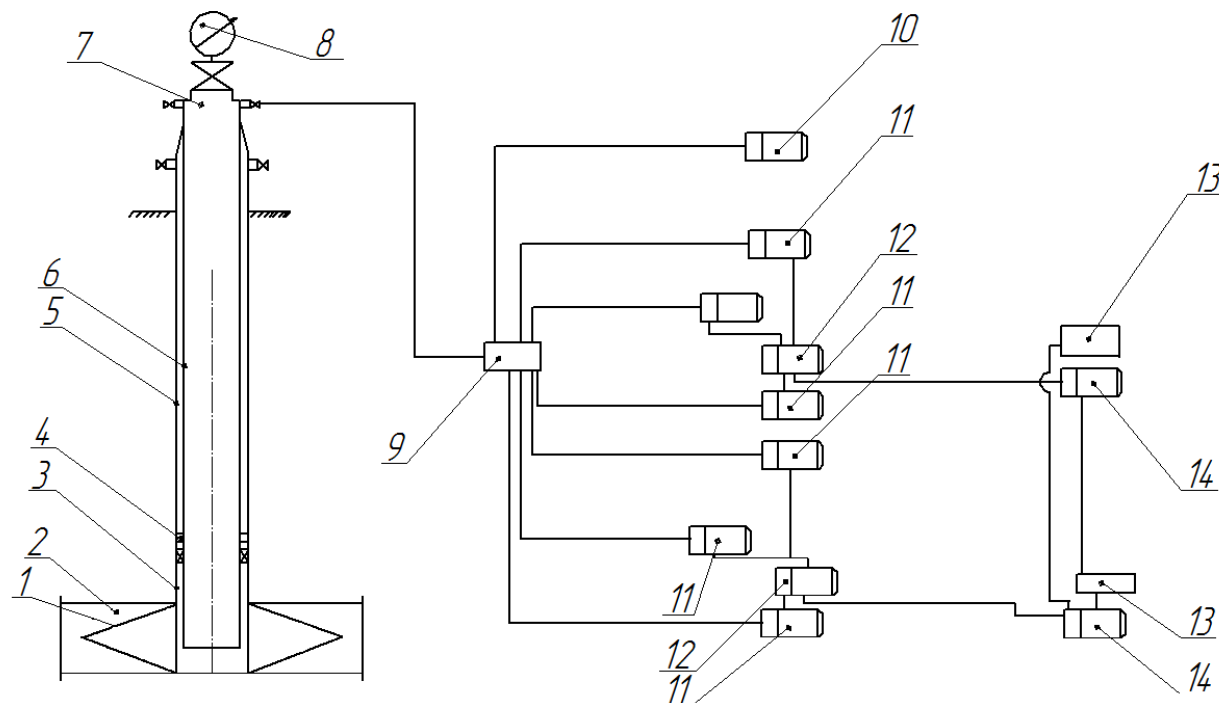


Рис. 1.3. Принципова схема реалізації процесу гідравлічного розриву пласта:  
 1 - утворена тріщина; 2 - продуктивний пласт; 3 - пакерний елемент; 4 - якір;  
 5 - обсадна колона; 6 - насосно-компресорні труби; 7 - фонтанна арматура;  
 8 - технологічний манометр; 9 - блок маніфольдів; 10 - станція моніторингу та керування технологічним процесом; 11 - насосні агрегати високого тиску;  
 12 - піскозмішувальні установки; 13 - технологічні ємності для робочих рідин;  
 14 - допоміжні насосні агрегати

Процес гідравлічного розриву пласта здійснюється за тисків, що можуть досягати 100 МПа, часто перевищуючи гранично допустимі значення для обсадних колон. З метою запобігання їх руйнуванню у нижній частині колони насосно-компресорних труб у свердловину спускають пакер, оснащений якірним пристроєм, який встановлюють безпосередньо над покрівлею продуктивного пласта.

Пакер обладнано еластичним ущільнювальним елементом, що забезпечує герметизацію затрубного простору внаслідок його стиснення під дією ваги НКТ. Фіксація пакера може здійснюватися шляхом опори на вибій за допомогою перфорованого хвостовика або за рахунок зчеплення з обсадною колоною через плашки. Якір виконує функцію стабілізатора положення пакера, запобігаючи його зсуву під впливом перепаду тиску між верхньою та нижньою частинами свердловини.

Конструктивно пакери та якірні пристрої розраховані на перепади тиску в межах 30–50 МПа і мають прохідний діаметр 36–72 мм залежно від типу пакера та внутрішнього діаметра обсадної колони. Перед спуском пакера необхідно виконати шаблонування стовбура свердловини для запобігання можливому заклинюванню або пошкодженню еластичного елемента під час монтажу.

За загальноприйнятою технологією проведення ГРП спочатку виконують шаблонування підйомних труби та виконують відбивання вибою. Далі виконують випробовування свердловини на її прийомистість у випадку сталих режимів закачування робочої рідини при тисках у допустимих межах, що дає змогу визначити значення критичного тиску розкриття тріщин  $P_p$ , встановити потрібний об'єм робочої рідини та прийняти рішення щодо здійснення ГРП із використанням пакера або без нього.

Користуючись отриманими результатами виконується побудова залежностей рівня прийомистості свердловини від наявного тиску при нагнітанні. У випадку коли графік отриманої залежності є увігнутим до осі дебіту а коефіцієнт рівня прийомистості на максимальних режимах закачування здійснює зростання не менше як у 2 чи 3 рази порівняно із даним коефіцієнтом на мінімальних режимах закачування. А це значить, що на цій свердловині можна проводити процес ГРП без пакера.

Альтернативно, для запобігання дії надмірних тисків на обсадну колону, що виникають у процесі гідравлічного розриву пласта та закачування пропанту в утворені тріщини, безпосередньо над інтервалом перфорації встановлюють пакер. З метою усунення осьових зміщень пакера під час пульсуючого нагнітання

технологічних рідин плунжерними насосами над ним додатково монтують гідравлічний якір. Устя свердловини оснащують системою трубопроводів високого тиску зі швидкорознімними з'єднаннями, що забезпечують оперативне та герметичне під'єднання насосного обладнання.

#### **1.4. Вибір об'єкту керування а також обладнання для ПГРП**

Увесь комплект технологічного обладнання здійснює автоматизоване управління технологічним процесом ПГРП під пильним спостереженням технолога а також оператора насосної станції (НС), котра розташовується безпосередньо у станції для контролю та управління (СКУ). Відбувається також візуальне спостереження за параметрами ПГРП за допомогою трьох моніторів а також пульта СКУ та монітору установки змішувача (УЗ).

Комплектом ПГРП забезпечується:

- транспортування а також доставка технологічного обладнання, котре необхідне для забезпечення процесу;
- підготовка а також короткотривале зберігання рідких а також сипучих витратних матеріалів;
- приготування необхідних для процесу рідин та сумішей;
- закачування під тиском в свердловину робочих рідин а також сумішей рідин із необхідними для процесу сипкими компонентами з необхідною продуктивністю для гідророзриву пласта. [19]

Логічна схема розташування обладнання в процесі здійснення ПГРП.

Для виконання процесу ПГРП використовуються: блок-маніфольда (модель ІС-320); насосні агрегати (модель FC-2251); станція контролю а також управління технологічним процесом (модель FC-320); змішувач (модель МС-60).

Блендер (змішувач) дає змогу виконувати перемішування компонентів рідин із продуктивністю не більшою  $9,5 \text{ м}^3/\text{хв}$ , та підтримувати необхідний тиск на вході до насосних агрегатів. У змішувачі наявна система для автоматичного контролю а також управління об'єму витрати та загального об'єму.

Насосні агрегати типу FC-2251 комплектуються дизельними двигунами виробництва компанії «Detroit Diesel», що характеризуються номінальною потужністю 2250 к.с. за частоти обертання 2050 об/хв. У їхню конструкцію інтегровано насос ТУ8-2000, який забезпечує робочий тиск до 105 МПа, що відповідає вимогам високонапірних технологічних процесів.

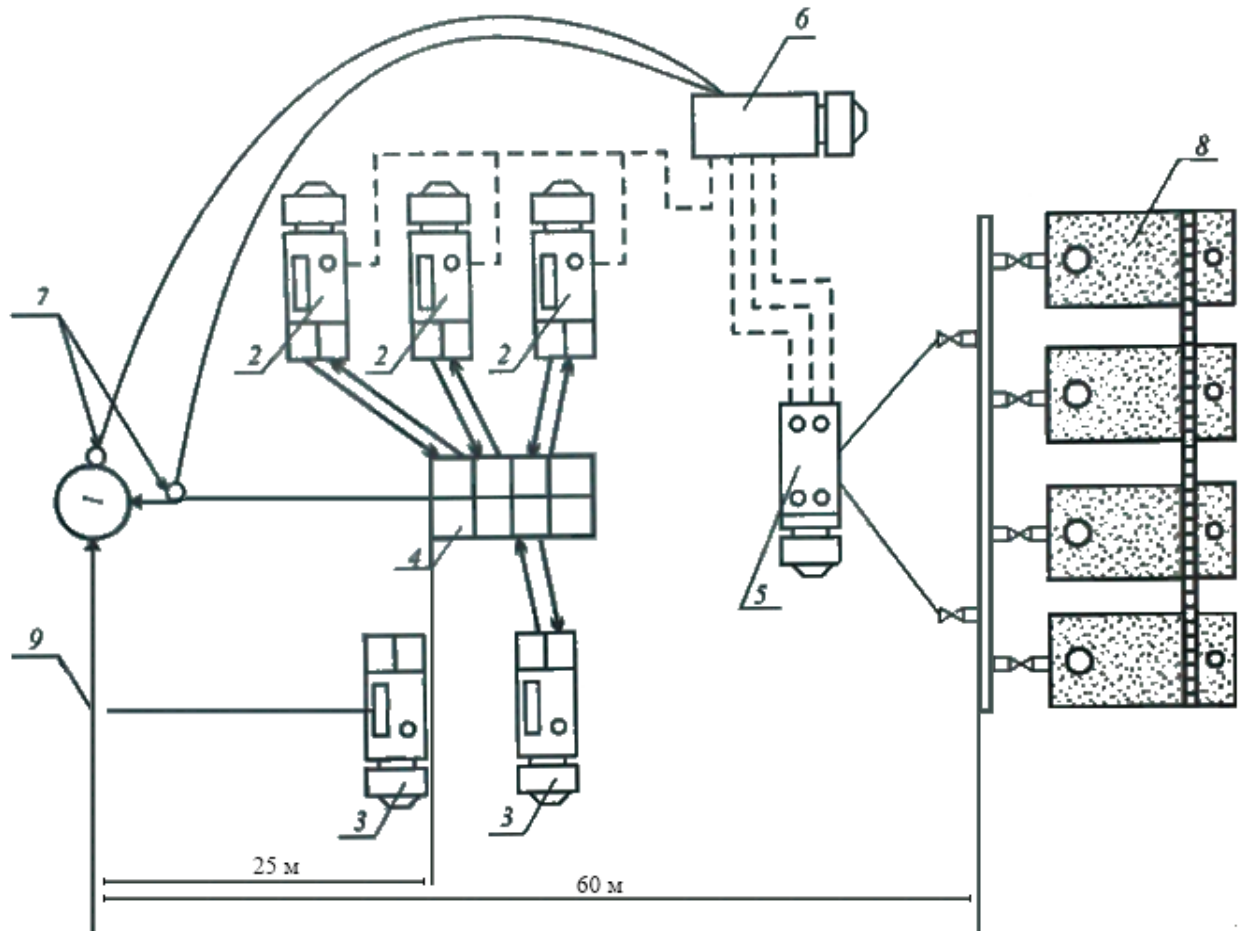


Рис. 1.4. Схематичне розташування спеціалізованої техніки під час проведення потужного гідравлічного розриву пласта передбачає таку конфігурацію: 2 - насосні агрегати типу FC-2251; 3 - насосні агрегати моделі АЧФ-1050; 4 - блок-маніфольд ІС-320; 5 - змішувальний модуль МС-60; 6 - станція моніторингу та керування процесом FC-320; 7 - датчики контролю технологічних параметрів; 8 - ємності для робочих рідин; 9 – технологічна лінія, що забезпечує подачу робочого середовища у затрубний простір свердловини

Станція ЕС-22АСД для контролю а також управління процесом (рис. 1.5) призначається для управління обладнанням та запису даних. Дана станція

оснащується необхідними приладами, сучасними комп'ютерами із програмним забезпеченням, яке призначене для проектування, обробки даних а також безпосередньо для контролю ПГРП. [15]

Для ефективного контролю станцію з'єднують за допомогою двох кабелів із давачами тиску а також двох кабелів із блендером, який призначений для контролю за густиною та швидкістю закачування рідини.

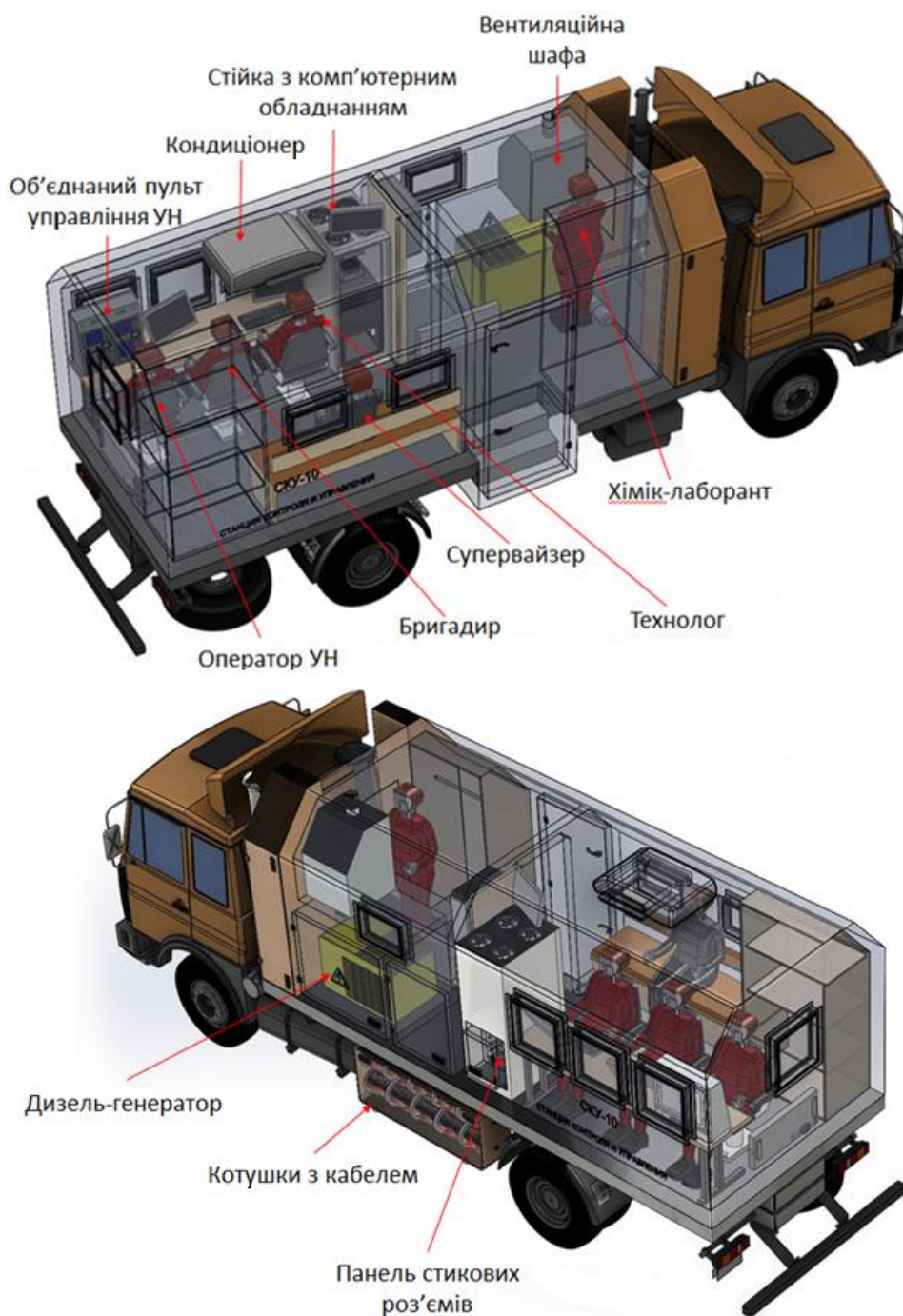


Рис. 1.5. Технологічна станція для контролю а також управління технологічним процесом ПГРП моделі ЕС-22АСД

Програмно-технічна система призначається для збору інформації та здатна реєструвати через кожні 3 с не більше восьми параметрів. [2]

### **1.5. Дослідження насосного агрегату, як керованого об'єкта**

Установка моделі FC-2251 призначається для закачування робочої рідини а також пропанту в свердловину, за таких тисків та витрат, при яких може забезпечуватись технологічний процес гідророзриву пласта. [2]

Насосною установкою мають забезпечуватись такі функції:

- плавне регулювання значення тиску, яке створюється УН у діапазоні від 0 МПа до 85 МПа;
- автоматизовану роботу;
- плавне регулювання значення витрати УН у діапазоні від 0 м<sup>3</sup>/хв до 2,5 м<sup>3</sup>/хв;
- підтримка в автоматичному режимі витрати;
- контроль поточного стану вузлів а також систем УН в автоматичному режимі. [2]

Дистанційне керування установкою здійснюється або від переносного пульта, або з станції контролю та управління процесом ПГРП. [18]

Недоліком установки є низька надійність роботи установки через обмежене числа параметрів, що контролюються. [17]

Насосна установка складається із змонтованих 3 плунжерні насосні агрегати на шасі. Агрегати мають продуктивністю 2050 л/хв., система підігріву та охолодження, маніфольди низького а також високого тиску, системи керування насосним агрегатом, яка включає електроустаткування скомпоноване у систему датчиків (рис. 1.6). [17]

З установкою поставляється дистанційний переносний пульт керування та контролю, який включає наступні функції: [18]

- керування дросельною заслінкою;

- переключання швидкостей;
- включення/відключення електроживлення;
- керування гальмуванням трансмісії;
- запуск та відключення двигуна;
- аварійне відключення двигуна;
- скидання показів надлишкового тиску.

Таблиця 1.1

### Технічні характеристики УН FC-2251

№	Параметри	Значення
1	Шасі	МАЗ 6303А5
2	Повна маса УН (експлуатаційна), кг	29600
3	Маса технологічного устаткування (експлуатаційна), кг	19500
4	Силова установка – два газотурбінні двигуни з обслуговуючими системами	
4.1	Марка двигунів	ГТД-1250
4.2	Максимальна потужність одного двигуна, л.с.	1250
4.3	Питома витрата палива на режимі максимальної потужності, г/л.с. год.	235
4.4	Маса одного двигуна в моноблочному виконанні (з системами), кг	1500
4.5	Вживане паливо	диз. паливо, ТС, РТ
5	Трансмісія, механічна з електрогідравлічним перемиканням передач	
5.1	Кількість передач в трансмісії	4
6	Плунжерний насос	
6.1	Модель	FC-2251
6.2	Число плунжерів	3
6.3	Діаметр плунжера, мм <sup>2</sup>	127 (5,0)

6.4	Максимальна продуктивність, м <sup>3</sup> /хв	2,5
6.5	Максимальний тиск робочої рідини, МПа	105

Робота плунжерного насосного агрегату ґрунтується на перетворенні обертального руху привідного двигуна у зворотно-поступальний рух плунжера за допомогою редуктора та ексцентрикового вала. У результаті цього в робочій камері гідроблоку формується надлишковий тиск, що спричиняє відкриття нагнітального клапана та подачу певного об'єму робочої рідини. Під час зворотного ходу плунжера здійснюється процес всмоктування, у ході якого відкривається всмоктувальний клапан. Регулювання довжини ходу плунжера дозволяє змінювати швидкість подачі технологічного реагенту (рис. 1.7).

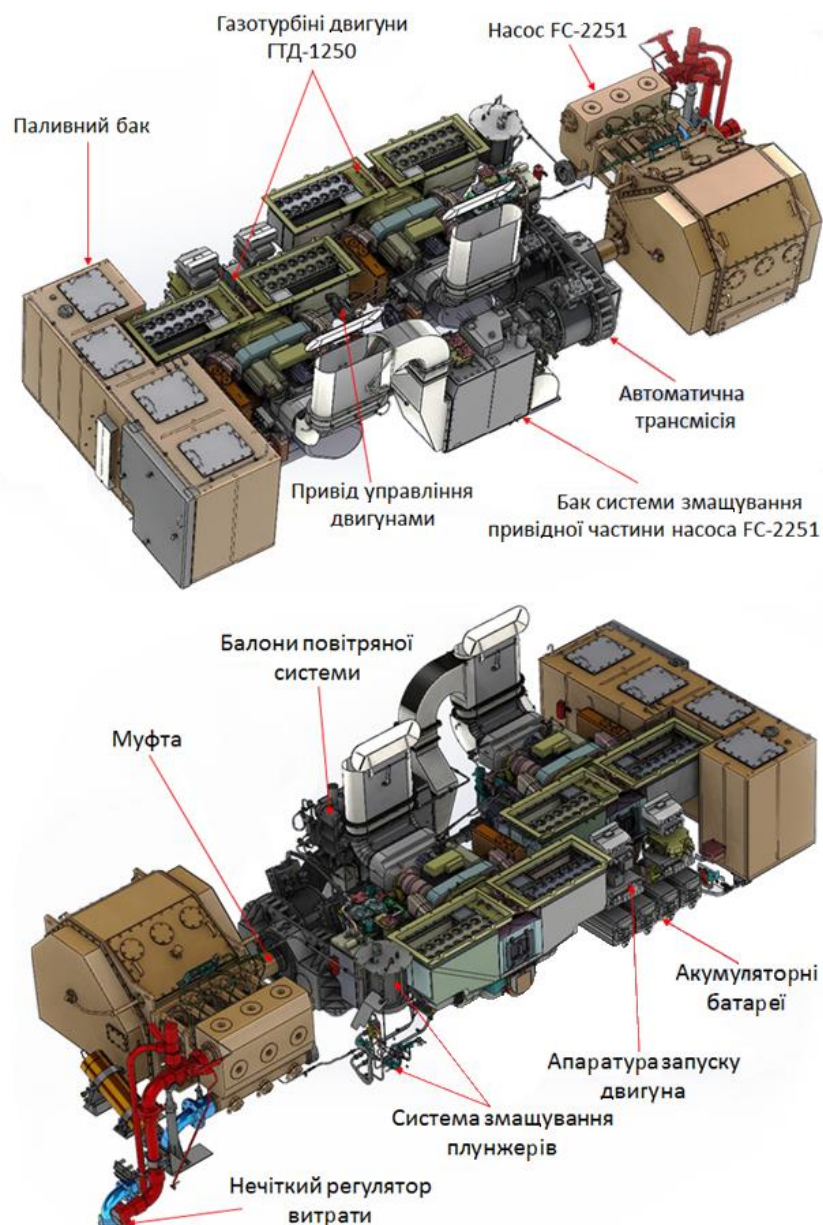


Рис. 1.6. Насосна установка для ПГРП

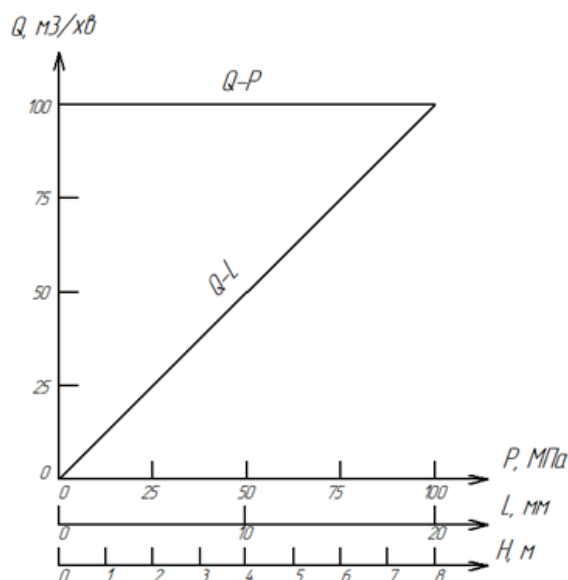


Рис. 1.7. Основні регулювальні параметри насосного агрегату FC-2251 включають: L - довжину ходу плунжера (мм); P - тиск у системі (МПа); Q - об'ємну витрату робочої рідини ( $\text{м}^3/\text{хв}$ ); H - висоту всмоктування (м). До ключових експлуатаційних залежностей відносять: Q–P - напірну характеристику, що відображає співвідношення між витратою та тиском, та Q–L - регульовальну характеристику, яка показує зміну подачі рідини при зміні довжини ходу плунжера

Регульовальний механізм насосного агрегату \*\*FC-2251\*\* (рис. 1.8) представлений конструкцією, що включає корпус (1), заповнений трансмісійним маслом для забезпечення мастила та зменшення тертя. У середині корпусу розміщено ковпак (7) із лімбом, шкальний корпус (5), регульовальний гвинт (4), підшипники (3 та 9) та ексцентриковий вал (2), які забезпечують перетворення обертального руху двигуна у зворотно-поступальний рух плунжера та дозволяють точно регулювати подачу робочої рідини.

У процесі обертання ковпака (7) у напрямку за годинниковою стрілкою плунжер відсовується гвинтом гідроблоку вправо, у результаті чого відсовує його від валу (2), який є ексцентриковим зменшуючи у цей же час хід плунжера.

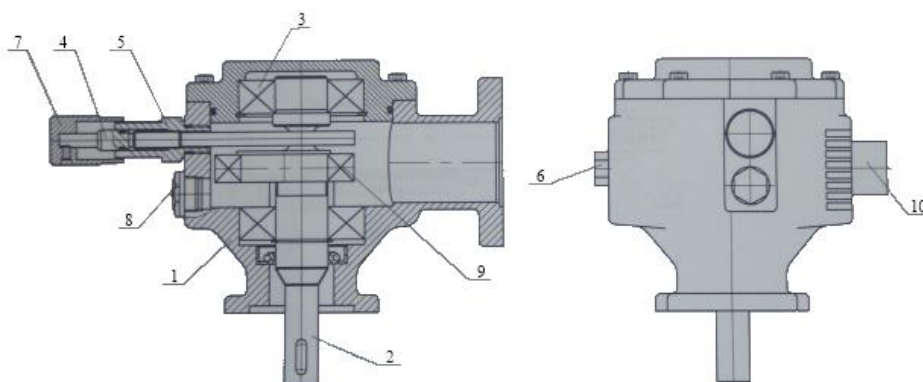


Рис. 1.8. Будова УН FC-2251

При обертанні ковпака (7) проти годинникової стрілки спостерігається збільшення об'ємної подачі насоса. Визначення заданого значення подачі здійснюється за допомогою шкали регулювального гвинта (4) та лімбу, розташованого на ковпаку (7). Конструктивні особливості механізму регулювання забезпечують можливість плавного коригування подачі без зупинки агрегату у межах від 0 до 20 мм ходу плунжера з точністю до 0,1 мм (рис. 1.9) [19].



Рис. 1.9. Органи керування FC-2251

Схема комунікації блоків станції а також гідравлічної системи наведена на рисунку 1.10. Базовими компонентами станції являються насосні установки із засувками. До числа додаткових пристроїв також можна віднести зворотні

клапани та вентиля, котрі призначені для унеможливлення зворотнього переміщення рідини через насос. Перетворювач частоти призначений для плавного керування насосним агрегатом. Установка для плавного пуску (УПП) являється необхідною для запуску двигунів великої потужності. УПП використовується також з метою поступового зниження частоти двигуна у випадку його гальмування.

Дана система автоматичного управління здатна реалізувати більшість захисних а також сервісних функцій, здійснює керування апаратурою а також забезпечує ефективну роботу задіяних у насосній станції блоків. Телеметрична система здатна забезпечити передачу інформації на пульт диспетчера актуальних параметрів стану станції, можливих сигналів аварійних ситуацій а також здійснювати прийом управляючих команд із пульта диспетчера. [17, 18]

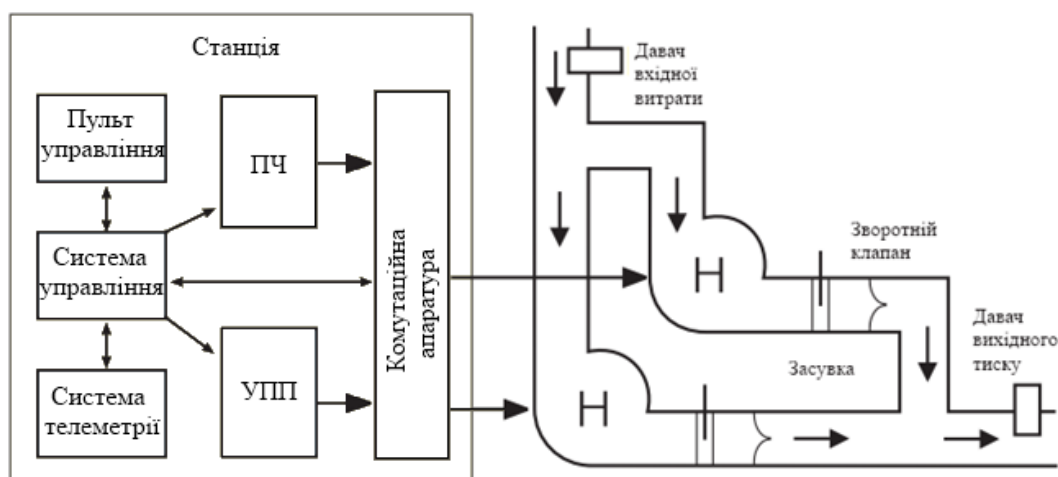


Рис. 1.10. Схема взаємодії блоків станції і гідравлічної системи

Наявні у системі датчики здійснюють забезпечення системи керування інформацією для зміни вихідної дії. [18]

### 1.6. Постановка завдання на магістерську роботу

Наявні у даний час САК витратою переважно використовують ПД алгоритми регулювання. Даний алгоритм оснований на порівнянні наявних вихідних параметрів керованого об'єкта із певними заданими значеннями та

визначенні значень розбіжностей між цими значеннями (похибки).

Недоліками таких систем є припущення, що характер залежності параметрів є лінійним, що відповідно суттєво знижує адекватність отриманої моделі.

Численними дослідженнями встановлено, що при нечіткому моделюванні отримуються адекватніші результати у порівнянні із результатами, котрі можна отримати при застосуванні традиційних алгоритмів керування.

На основі наведених вище досліджень та тверджень сформовано наступні задачі, які необхідно вирішити у магістерській роботі:

1. Виконати аналіз насосного агрегату при проведенні ГРП, як об'єкту автоматизації, а також встановити динамічні властивості основних каналів регулювання. Здійснити оцінку якості параметрів регулювання з використанням традиційних регуляторів та розглянути доцільність застосування новітніх технологій управління.

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

3. Синтезувати нечітких регулятор у автоматичній системі керування з метою керування технологічним об'єктом.

4. Виконати імітаційне моделювання розроблених систем автоматичного керування та здійснити аналіз отриманих результатів.

## **Висновки до розділу 1**

Здійснено аналіз, а також характеристичний огляд сучасних систем керування та контролю за процесом ГРП. Аналіз науково-технічної інформації з проблеми стабілізації тиску в процесі ГРП дозволяє зробити висновок, що існуючі у практиці способи і засоби контролю мають такі недоліки, як складність розрахунків та велика імовірність похибок.

Розглянуто основні способи керування процесом ГРП з використанням класичних методів та визначено більш ефективний спосіб керування, який базуватиметься на засобах нечіткої логіки.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА

#### **2.1. Дослідження динамічних властивостей процесу гідравлічного розриву пласта**

ГРП є високотехнологічним безперервним процесом складної організації, котрий функціонує за умов часткової невизначеності. Наявна система керування не дає можливості враховувати недостатню повноту інформації та певну лінгвістичну невизначеність керуючих рішень, котрі приймаються персоналом. Отож виникає необхідність у розробленні для диспетчера засобів аналізу поточної ситуації з метою прийняття певних керуючих рішень. Динаміка та невизначеність роблять задачу керування технологічним процесом ГРП досить складною. Оптимальну якість технологічного процесу можна отримати у випадку повного інформаційного забезпечення і оптимальному управлінні процесом.

На основі даних тверджень виникає необхідність в побудові сучасної високоефективної САК та системи підтримки прийняття рішень. Для здійснення синтезу структури САК та алгоритмів її функціонування використовуємо методи нечіткої логіки. З метою оперативного коригування ГРП у реальному часі необхідно забезпечити контроль за великою кількістю устьових та вибійних параметрів. Під час кожного проведення гідравлічного розриву пласта станційні комп'ютери здійснюють запис до восьми технологічних параметрів із періодом 3 секунди: об'ємна витрата рідини, тиск на усті свердловини, тиск у нагнітальному трубопроводі, тиск у затрубному просторі, сумарний об'єм закачаної рідини та густина рідини. Більшість цих параметрів вимірюються безпосередньо в свердловині, що піддає їх впливу зовнішніх збурень, таких як гідростатичний тиск і тертя, що ускладнює точний контроль процесу закачування рідини.

Проблема регулювання режимів потужного гідророзриву пласта та інтерпретації його динаміки у часі є однією з ключових для забезпечення високої

ефективності процесу. На сучасному етапі аналіз розвитку тріщин при гідророзриві проводиться із застосуванням теорії К. Нольта, згідно з якою величина «чистого тиску»  $P_{чст}$  визначається як різниця між вибійним тиском  $P_{виб}$  та тиском закриття тріщини  $P_з$  після припинення нагнітання рідини.

$$P_{чст} = P_{виб} - P_з. \quad (2.1)$$

Величину вибійного тиску при розриві визначають наступним чином:

$$P_{виб} = P_{уст} + P_{зст} + P_{втр}, \quad (2.2)$$

де  $P_{втр}$  - гідравлічні втрати тиску на тертя в насосно-компресорних трубах;

$P_{зст}$  - гідростатичний тиск рідинного стовпа;

$P_з$  - тиск закриття тріщини;

$P_{уст}$  - тиск на усті свердловини.

Визначення  $P_{виб}$  передбачає безпосередній контроль за величиною тиску на усті свердловини. Спосіб вимірювання такого тиску полягає у вимірюванні значення тисків у режимі он-лайн від моменту початку помпування до моменту припинення даного помпування.

Наявний спосіб Маєра призначається для окремих типів рідин, характеристики котрих є відомими та занесеними у програму. [31]

Враховуючи відсутність характеристик вимірювання тиску по даному методу, збільшується похибка вимірювання.

## **2.2. Особливості систем автоматизованого керування побудованих на основі методів нечіткої логіки**

Поступовий розвиток наукової думки наштовхнув на висновок, що існуючі системи управління не дають можливості враховувати неповноту інформації і певну лінгвістичну невизначеність керуючих рішень, котрі відповідно приймаються оператором. Отже виникає потреба у розробленні та представленні у розпорядження керівнику засобів аналізу наявної ситуації для прийняття керуючих дій. Невизначеність та динаміка технологічних процесів галузі роблять

процес керування досить складним. Високий рівень ефективності керування може бути досягнутий лише за умови повного інформаційного забезпечення та застосування адаптивного оптимального управління технологічними процесами. Це зумовлює актуальність розробки високопродуктивних систем автоматичного керування для забезпечення стабільності та ефективності технологічних операцій. Одним з варіантів вирішення цієї задачі є впровадження методів нечіткої логіки та теорії нечітких множин, яка була розроблена та запропонована професором Лотфі А. Заде (Lotfi A. Zadeh).

У цьому контексті доцільним математичним інструментарієм виступають концепції теорії нечітких множин та методи, що базуються на принципах нечіткої логіки. Сучасні системи нечіткого логічного виведення відіграють суттєву роль у нечітких експертних системах, нечітких контролерах. [23]

Такі системи будуються за правилом «Якщо ...,  $\Rightarrow$  то ...», у котрих усі параметри є нечіткими поняттями. Такі твердження притаманні для людини розуміти природну мову а також розрізняти складні образи.

Методи побудови інформаційних моделей засновані на теорії нечітких множин суттєво розширюють традиційні сфери використання комп'ютерів та утворюють окремий самостійний напрямок науково-прикладних досліджень, котрі отримали назву нечіткого моделювання.

Нечітке моделювання являється напевне одним з найбільш активних, а також одним з найперспективніших напрямів прикладних досліджень в сфері управління та прийняття рішень.

Нечітка логіка, що становить основу методів нечіткого керування, забезпечує більш адекватне відтворення особливостей людського мислення порівняно з традиційними формально-логічними системами. Тому дослідження та застосування математичних методів для представлення нечіткої вихідної інформації дозволяє створювати моделі, які достовірно відображають різноманітні аспекти складних процесів [5].

Основним напрямком практичного використання систем нечіткого виведення є розв'язання задач керування різноманітними процесами, об'єктами та

системами. У такому випадку побудова нечіткої моделі базується на формальному поданні характеристик досліджуваної системи у термінах лінгвістичних змінних.

Ціль автоматичного управління у загальному полягає у тому, щоб ґрунтуючись на аналізі поточного стану керованого об'єкту визначити поточні значення керуючих змінних, реалізація котрих дає можливість забезпечити необхідну поведінку або стан керованого об'єкту.

Процес розробки нечітких моделей і систем реалізується із застосуванням програмного комплексу Fuzzy Logic Toolbox, спеціально призначеного для нечіткого моделювання. Концепція моделі або архітектури нечіткого керування полягає у заміщенні традиційної класичної системи автоматичного регулювання на систему нечіткого автоматичного керування, в основі якої функціонують системи нечіткого виводу (FIS, Fuzzy Inference System).

В процесі побудови САК із нечіткою моделлю правила формуються за допомогою інформації від експерта на основі його досвіду та кваліфікації. Кількість правил напряму залежить від кількості лінгвістичних змінних.

### **2.3. Розробка структурної схеми насосного агрегату**

З метою перекачування продуктів із заданим тиском а також витратою чи для їхньої коректної зміни потрібно регулювати режими роботи насосного агрегату. Виконувати зазначене регулювання можна за допомогою зміни характеристик насоса. Одним із шляхів такого регулювання є метод регулювання частоти обертання ротора двигуна.

Подібне регулювання можна реалізувати за допомогою зміни частоти руху плунжера. У випадку застосування таких методів автоматичного регулювання засувка залишається на трубі повністю відкритою а уся наявна гідравлічна потужність насоса застосовується для переміщення рідини по довжині трубі. Загальна структурна схема насосної станції представлена на рисунку 2.1. Зазначена САК являється одноконтурною із одним зовнішнім контуром регулювання за тиском.

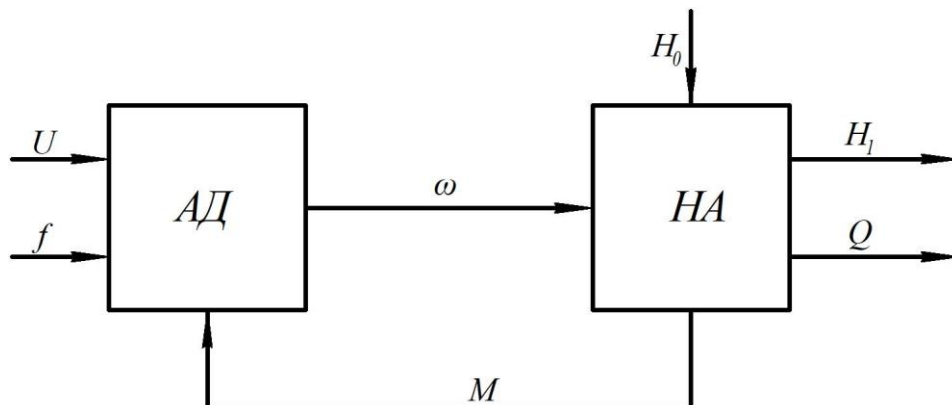


Рис. 2.1. Загальна структурна схема насосного агрегату:  $f$  - частота напруги у статорі;  $U$  - напруга у статорі; АД - асинхронний двигун;  $M$  - момент навантаження на валу двигуна статичний;  $\omega$  - швидкість обертання ротора; НА - насосний агрегат;  $Q$  - витрата насосу;  $H_0$  - тиск рідини на вході у насоси;  $H_1$  - тиск рідини на виході у насоси

Ключовими параметрами НА являються напір та подача. Напір  $H$  представляє собою деякий вміст енергії у 1 кг речовини на ділянці від входу і до виходу із НА. Подача  $Q$  представляє собою деякий об'єм рідини, котрий подається НА за деяку визначену одиницю часу. У загальному структурна схема НА має вигляд наведений на рисунку 2.2.

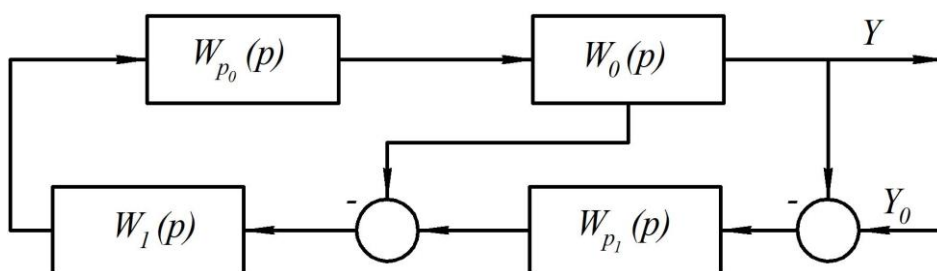


Рис. 2.2. Структурна схема САК НА

#### 2.4. Проведення експериментального дослідження об'єкта керування

Визначимо динамічні характеристики керованого об'єкту за допомогою проведення активного експерименту. У процесі підготовки експерименту вивчається об'єкт дослідження, а також визначаються вхідні і вихідні змінні. У даному випадку вхідною величиною являється витрата пропанту, а відповідно

вихідною величиною являється тиск на виході із НА (табл. 2.1 та 2.3, рис. 2.3 та 2.5).

Таблиця 2.1

**Зміна тиску на виході із насосного агрегату**

t, хв	P, МПа	t, хв	P, МПа	t, хв	P, МПа
0	42.2	34	42.5	68	44.2
1	43.6	35	41.6	69	47.2
2	47.8	36	44.6	70	44.0
3	39.8	37	44.8	71	45.4
4	43.8	38	48.6	72	44.6
5	43.8	39	44.2	73	47.8
6	40.2	40	44.2	74	46.4
7	40.2	41	43.6	75	47.0
8	40.2	42	44.6	76	45.6
9	40.2	43	42.2	77	44.8
10	45.8	44	42.3	78	46.4
11	42.6	45	44.2	79	44.0
12	43.8	46	42.2	80	43.8
13	41.0	47	44.6	81	42.4
14	40.8	48	44.8	82	46.4
15	40.2	49	48.0	83	43.2
16	42.2	50	46.8	84	44.6
17	39.6	51	45.0	85	48.6
18	42.1	52	46.0	86	45.2
19	39.4	53	44.4	87	44.6
20	48.6	54	44.8	88	43.6
21	40.6	55	44.6	89	43.8
22	42.2	56	47.0	90	45.0
23	42.1	57	47.2	91	45.1

Продовження таблиці 2.1

t, хв	P, МПа	t, хв	P, МПа	t, хв	P, МПа
24	42.8	58	45.9	92	44.4
25	40.8	59	46.4	93	47.8
26	41.0	60	46.0	94	47.6
27	42.8	61	48.6	95	48.4
28	41.8	62	47.8	96	47.4
29	44.2	63	45.4	97	47.2
30	43.0	64	46.4	98	47.8
31	43.1	65	46.3	99	48.6
32	41.8	66	46.5		
33	42.4	67	41.6		

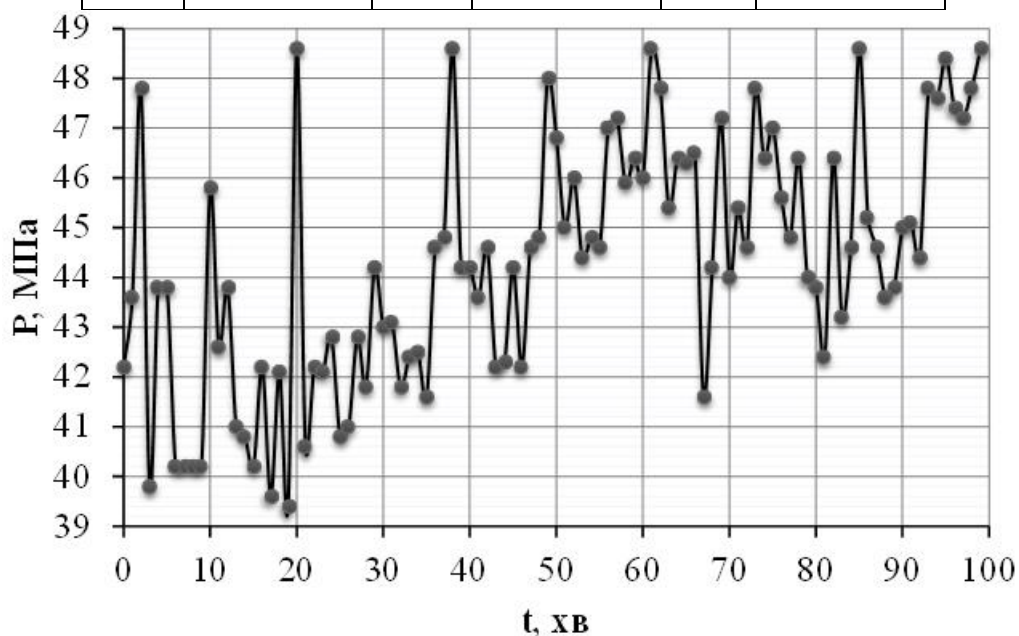


Рис. 2.3. Експериментальним чином отриманий графік зміни тиску на виході НА

Наведемо експериментально визначену перехідну характеристику у безрозмірному вигляді, використовуючи такі співвідношення:

$$Y(t)_i = \frac{P(t)_i - P(t)_{\min}}{P(t)_{\max} - P(t)_{\min}}, \quad (2.3)$$

де  $P(t)_{\max}$  - кінцеве значення вихідного параметра у фізичних одиницях;

$P(t)_{\min}$  - початкове значення вихідного параметра у фізичних одиницях;

$P(t)_i$  - поточне значення вихідної величини у одиницях вимірювання.

У результаті обчислень отримаємо безрозмірні значення, які відображено у таблиці 2.2

Таблиця 2.2

**Обчислені безрозмірні значення тиску на виході із НА**

$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$
0	0,304	34	0,337	68	0,522
1	0,457	35	0,239	69	0,848
2	0,913	36	0,565	70	0,501
3	0,043	37	0,587	71	0,652
4	0,478	38	1,000	72	0,565
5	0,478	39	0,522	73	0,913
6	0,087	40	0,522	74	0,761
7	0,087	41	0,457	75	0,826
8	0,087	42	0,565	76	0,674
9	0,087	43	0,304	77	0,586
10	0,696	44	0,315	78	0,761
11	0,348	45	0,522	79	0,501
12	0,478	46	0,304	80	0,478
13	0,174	47	0,565	81	0,326
14	0,152	48	0,587	82	0,761
15	0,087	49	0,935	83	0,413
16	0,304	50	0,804	84	0,565
17	0,021	51	0,609	85	1,000
18	0,293	52	0,717	86	0,631
19	0,000	53	0,543	87	0,565
20	1,000	54	0,587	88	0,457
21	0,131	55	0,565	89	0,478
22	0,304	56	0,826	90	0,609

## Продовження таблиці 2.2

$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$
23	0,293	57	0,848	91	0,619
24	0,369	58	0,707	92	0,543
25	0,152	59	0,761	93	0,913
26	0,174	60	0,717	94	0,891
27	0,369	61	1,000	95	0,978
28	0,261	62	0,913	96	0,869
29	0,522	63	0,652	97	0,848
30	0,391	64	0,761	98	0,913
31	0,402	65	0,751	99	1,000
32	0,261	66	0,772		
33	0,326	67	0,239		

Отримані дані апроксимуємо за допомогою програмного продукту Arrox (рис. 2.4).

У результаті отримано наступну функцію передачі:

$$W_0(p) = \frac{125.5170p^2 + 1.5860p + 0.4860}{8864.4370p^3 + 1022.9240p^2 + 50.0940p + 1.0} \quad (2.4)$$

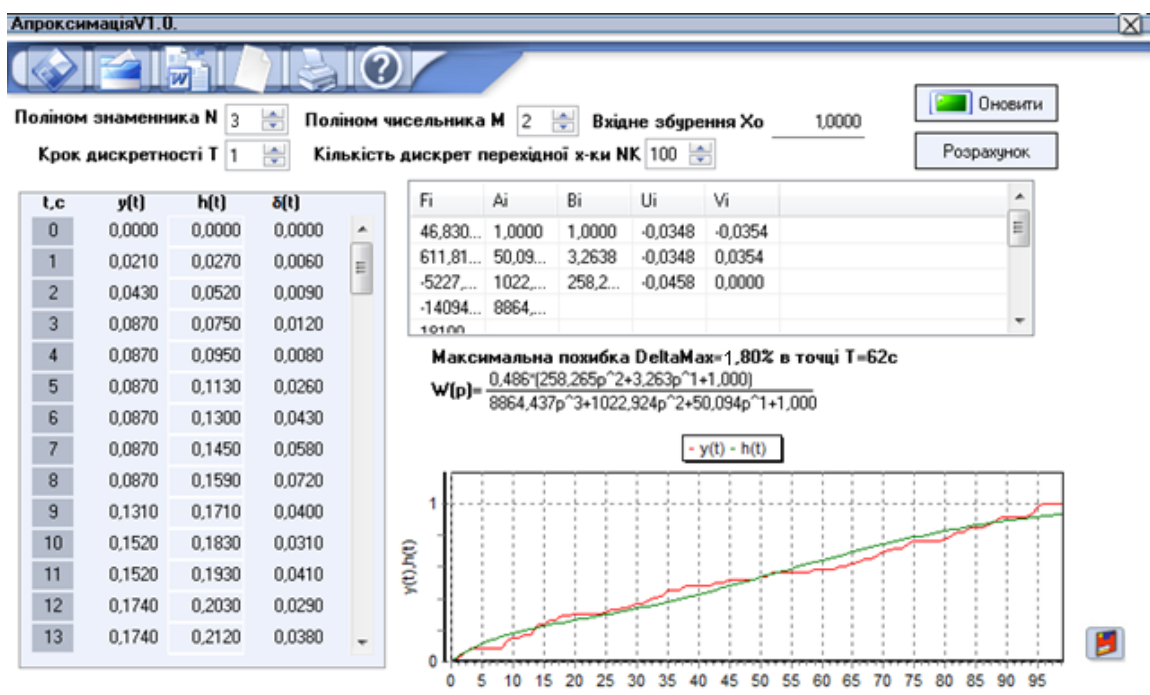


Рис. 2.4. Апроксимація перехідної характеристики тиску на виході з НА

Виконаємо ті самі операції з іншим параметром.

Таблиця 2.3

**Зміна витрати**

t, хв	G, м <sup>3</sup> /хв	t, хв	G, м <sup>3</sup> /хв	t, хв	G, м <sup>3</sup> /хв
0	2,4	34	3,2	68	2,9
1	2,8	35	2,9	69	2,8
2	2,6	36	3,1	70	3,1
3	2,7	37	2,8	71	3,3
4	2,6	38	2,7	72	2,9
5	2,7	39	2,9	73	3,0
6	2,5	40	3,1	74	3,1
7	2,8	41	3,0	75	3,2
8	2,9	42	3,2	76	3,4
9	2,5	43	3,1	77	3,0
10	2,8	44	2,9	78	2,9
11	2,9	45	3,0	79	3,0
12	3,0	46	3,1	80	3,2
13	2,9	47	3,3	81	2,8
14	3,1	48	2,9	82	2,9
15	2,8	49	3,0	83	2,7
16	3,1	50	2,6	84	2,8
17	3,3	51	2,9	85	3,1
18	3,0	52	3,1	86	3,5
19	3,2	53	3,0	87	3,4
20	2,8	54	2,7	88	3,0
21	3,1	55	2,9	89	3,2
22	3,4	56	3,1	90	2,9
23	3,0	57	3,4	91	2,8
24	2,9	58	3,5	92	2,7

Продовження таблиці 2.3

t, хв	G, м <sup>3</sup> /хв	t, хв	G, м <sup>3</sup> /хв	t, хв	G, м <sup>3</sup> /хв
25	3,1	59	3,5	93	2,6
26	3,3	60	3,3	94	2,8
27	3,5	61	3,2	95	2,9
28	3,0	62	3,1	96	3,0
29	3,2	63	3,3	97	3,1
30	3,1	64	3,4	98	3,2
31	3,3	65	3,5	99	3,4
32	3,0	66	3,3		
33	3,5	67	3,0		

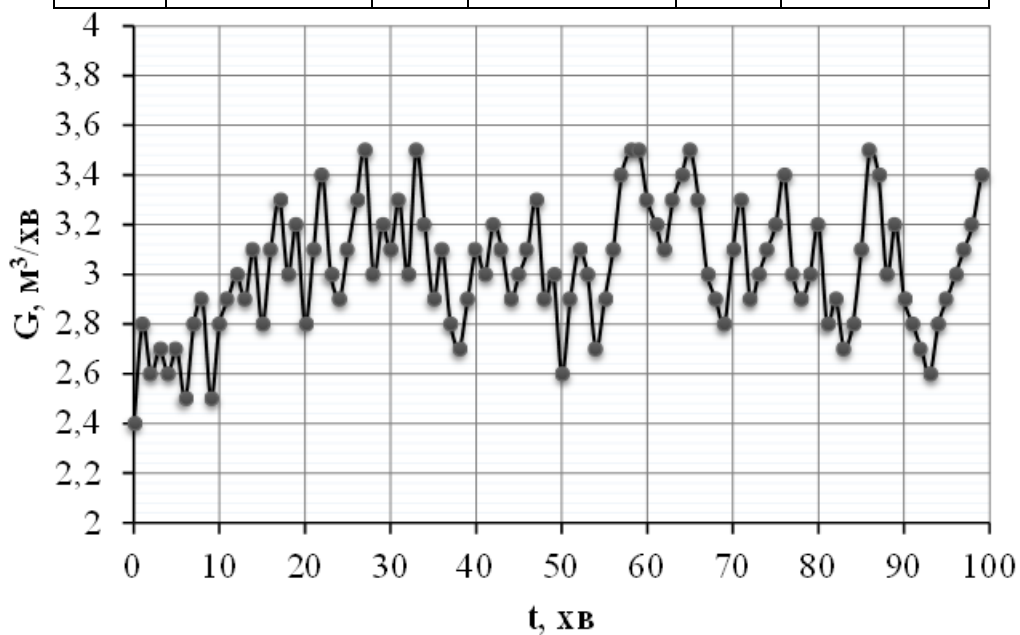


Рис. 2.5. Графік зміни витрати

Виконаємо перевід до безрозмірних величин, а результати наведемо у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

**Обчислені безрозмірні значення витрати**

$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$
0	0,000	34	0,786	68	0,571

Продовження таблиці 2.4

$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$
1	0,364	35	0,571	69	0,501
2	0,182	36	0,714	70	0,714
3	0,273	37	0,501	71	0,857
4	0,182	38	0,429	72	0,571
5	0,273	39	0,571	73	0,643
6	0,286	40	0,714	74	0,714
7	0,501	41	0,643	75	0,786
8	0,571	42	0,786	76	0,929
9	0,286	43	0,714	77	0,643
10	0,501	44	0,571	78	0,571
11	0,571	45	0,643	79	0,643
12	0,286	46	0,714	80	0,786
13	0,571	47	0,857	81	0,501
14	0,714	48	0,571	82	0,571
15	0,501	49	0,643	83	0,429
16	0,714	50	0,357	84	0,501
17	0,857	51	0,571	85	0,714
18	0,643	52	0,714	86	1,000
19	0,786	53	0,643	87	0,929
20	0,501	54	0,429	88	0,643
21	0,714	55	0,571	89	0,786
22	0,929	56	0,714	90	0,571
23	0,643	57	0,929	91	0,501
24	0,571	58	1,000	92	0,429
25	0,714	59	1,000	93	0,357
26	0,857	60	0,857	94	0,501
27	1,000	61	0,785	95	0,571

## Продовження таблиці 2.4

$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$	$t$	$Y(t)$
28	0,643	62	0,714	96	0,643
29	0,786	63	0,857	97	0,714
30	0,714	64	0,929	98	0,786
31	0,857	65	1,000	99	0,929
32	0,643	66	0,857		
33	1,000	67	0,643		

Виконаємо апроксимацію за допомогою Аprox (рис. 2.6).

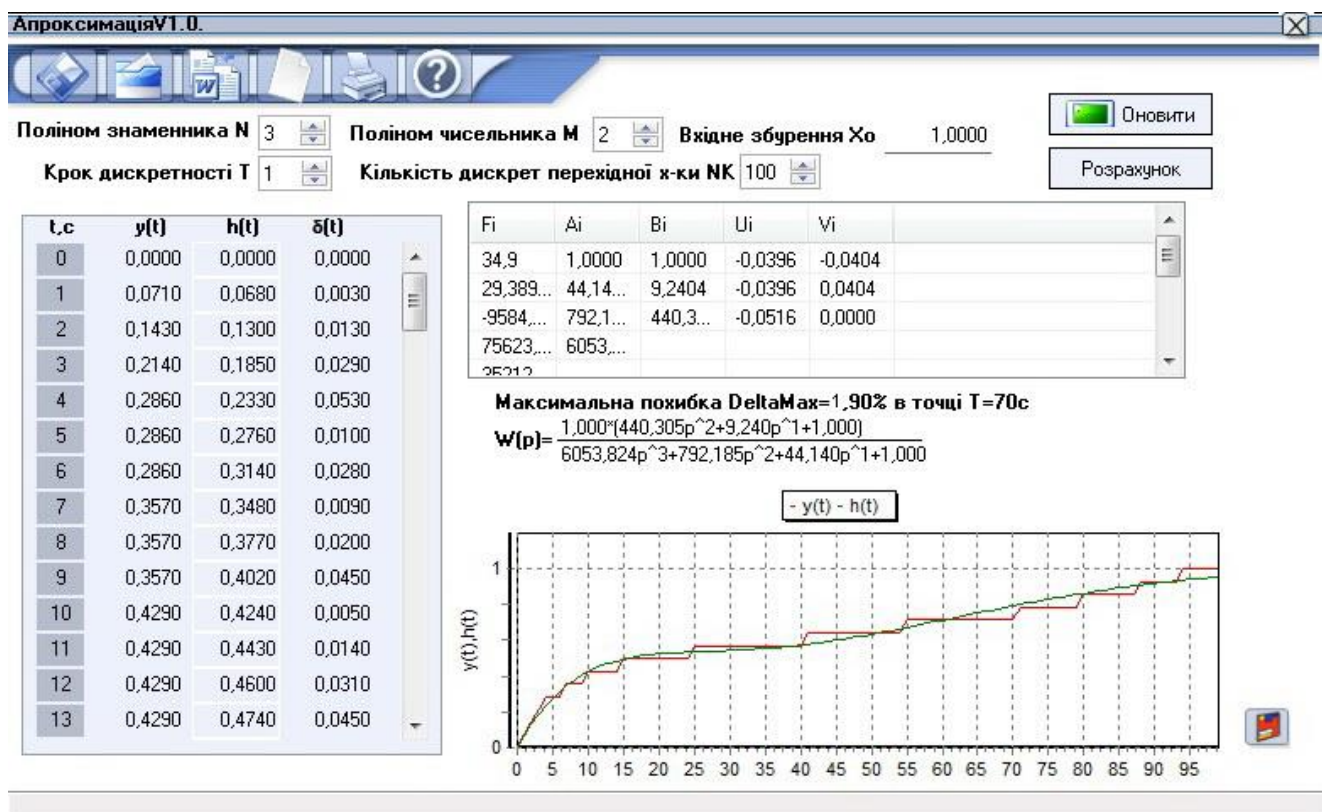


Рис. 2.6. Апроксимація значень витрати

З рисунку 2.6 бачимо, що передавальна функція є наступною:

$$W_1(p) = \frac{440.3050p^2 + 9.2040p + 1.0}{6053.8240p^3 + 792.1850p^2 + 44.14p + 1.0} \quad (2.5)$$

## 2.5. Дослідження динамічних властивостей систем автоматичного керування

Для моделювання системи керування застосовується середовище Simulink програмного комплексу Matlab. З метою дослідження динамічних властивостей розроблено модель (рис. 2.7) насосного агрегату, котра дозволяє здійснювати

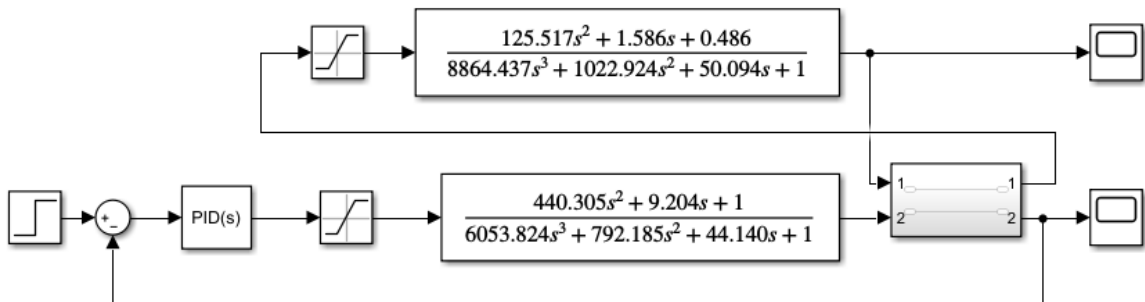


Рис. 2.7. Імітаційна модель системи

Параметри налаштування ПІД-регулятора визначено як:  $K_p = 3,3$ ,  $K_i = 4$ ,  $K_d = 3,75$ . Оптимізація цих параметрів виконувалася із використанням модуля параметричної оптимізації, що входить до бібліотеки Simulink.

Перехідна характеристика САК наведена на рисунку 2.8.

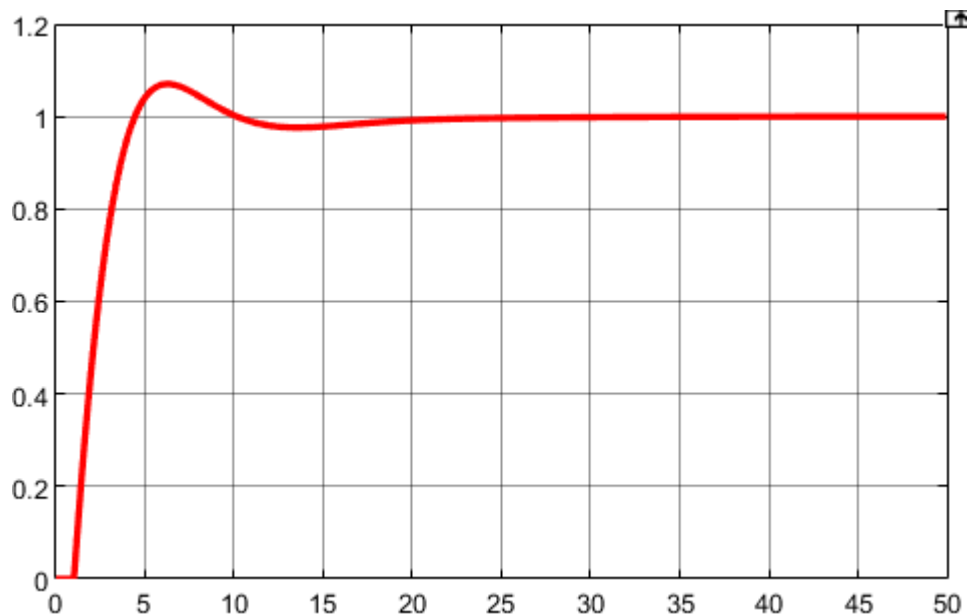


Рис. 2.8. Перехідна динаміка зміни тиску на виході насосного агрегату

Ключові критерії оцінювання якості перехідного процесу:

- час перехідного процесу:

$$t=20 \text{ с};$$

- перерегулювання:

$$\sigma=8\% .$$

## 2.6. Дослідження тиску на виході з насосного агрегату

### 2.6.1. Визначення оціночних характеристик тиску на виході із НА

Для усіх обрахунків застосовуватимемо програмний продукт Mathcad. Математичне сподівання для деякої випадкової функції  $K$  представляє собою деяке середньоарифметичне значення деякої нескінченної кількості реалізацій:

$$\text{mean}(K) = 143.152. \quad (2.5)$$

Далі розглянемо визначення дисперсії випадкової функції  $K$ . Зазначена величина є детермінованою та невід'ємною функцією  $D(t)$ , котра представляє собою деяке середнє значення квадрату відхилення певної випадкової функції від її наявного середнього значення. Дисперсія характеризує деяку інтенсивність відхилень відповідно до середнього значення та визначається за допомогою одномірного закону розподілу:

$$\text{var}(K) = 1.758 \text{ - незміщена оцінка,} \quad (2.6)$$

$$\text{Var}(K) = 1.804 \text{ - зміщена оцінка.} \quad (2.7)$$

Величина середньоквадратичного відхилення обраховується як квадратний корінь від значення дисперсії:

$$\text{stdev}(K) = 1.326 \text{ - незміщена оцінка,} \quad (2.8)$$

$$\text{Stdev}(K) = 1.343 \text{ - зміщена оцінка.} \quad (2.9)$$

Коефіцієнт ексцесу являє собою деяку числову характеристику розподілу ймовірностей досліджуваної дійсної випадкової величини. Коефіцієнт асиметрії являє собою деяку числову характеристику розподілу ймовірностей досліджуваної дійсної випадкової величини. Міру відхилення форми кривої розподілу від

нормального, зокрема її ступінь загостреності або сплющення відносно стандартної нормальної кривої відображає коефіцієнт ексцесу:

$$kurt(K) = -1.831, \quad (2.10)$$

$$skew(K) = -0.136. \quad (2.11)$$

Таким чином, було визначено основні статистичні характеристики розглянутого випадкового процесу.

### 2.6.2. Встановлення закону ймовірнісного розподілу тиску на виході насосного агрегату та його статистична перевірка за критерієм узгодженості Пірсона

З метою встановлення закону розподілу та перевірки його відповідності за критерієм Пірсона вибірку обсягом  $n = 100$  спостережень було розподілено на інтервали з визначенням абсолютних і відносних частот. Подальше впорядкування вибірки у порядку зростання виконано із використанням обчислювальних функцій програмного пакета MathCad:

$$Z = \text{sort}(K^{<1>}), \quad (2.12)$$

	0
81	47.2
82	47.4
83	47.6
84	47.8
85	47.8
86	47.8
87	47.8
Z = 88	47.8
89	48.0
90	48.4
91	48.6
92	48.6
93	48.6
94	48.6
95	49.6
96	...

Визначаємо діапазон варіації (зону розсіювання) отриманих значень:

$$n = 96, \quad (2.13)$$

$$R = \max(K^{<1>}) - \min(K^{<1>}), \quad (2.14)$$

$$R = 11. \quad (2.15)$$

Поділяємо отриманий діапазон варіації на п'ять інтервалів із заданою шириною. Після цього обчислюємо межі кожного інтервалу та формуємо їх у вигляді масиву даних:

$$h = 2.2, \quad (2.16)$$

$$i = 0..4, \quad (2.17)$$

$$\text{int}_0 = Z_0, \quad (2.18)$$

$$\text{int}_{i+1} = \text{int}_{i+1} + h, \quad (2.19)$$

де  $Z_0$  - мінімальне значення досліджуваної величини  $x$ ;

$\text{int}_0$  - нижня межа першого інтервалу;

$\text{int}_{i+1}$  - верхня межа  $i$ -го інтервалу.

Після цього обчислюємо середні значення кожного інтервалу:

$$xi_i = \frac{\text{int}_i + \text{int}_{i+1}}{2}. \quad (2.20)$$

Здійснимо обчислення абсолютних частот інтервалів:

$$mi = \text{hist}(\text{int}, Z). \quad (2.21)$$

Визначаємо відносні частоти для кожного інтервалу вибірки:

$$\omega_i = \frac{mi}{n}. \quad (2.22)$$

За підсумками проведених обчислень формуються наступні результати:

$i =$	$\text{int}_1 =$	$\text{int}_{i+1} =$	$xi =$	$mi =$	$\omega_i =$
0	49.4	41.6	$\begin{pmatrix} 40.5 \\ 42.7 \\ 44.9 \\ 47.1 \\ 49.3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 10 \\ 24 \\ 33 \\ 23 \\ 6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.104 \\ 0.25 \\ 0.344 \\ 0.24 \\ 0.063 \end{pmatrix}$
1	41.6	43.8			
2	43.8	46.0			
3	46.0	48.2			
4	48.2	50.4			

## Систематизація масиву експериментальних даних у порядку зростання

Число інтервалів	Діапазони інтервалів		Число повторень	Середнє значення	Ймовірність
	від	до			
0	39.4	41.6	10	40.5	0.104
1	41.6	43.8	24	42.7	0.25
2	43.8	46	33	44.9	0.344
3	46	48.2	23	47.1	0.24
4	48.2	50.4	6	49.3	0.063

Виконаємо перевірку обчислення абсолютних та відносних частот:

$$\sum_i m_i = 96, \quad (2.23)$$

$$\sum_i \omega_i = 1. \quad (2.24)$$

На основі зібраних даних сформуємо гістограму густини розподілу відносних частот, що представлена на рисунку 2.13.

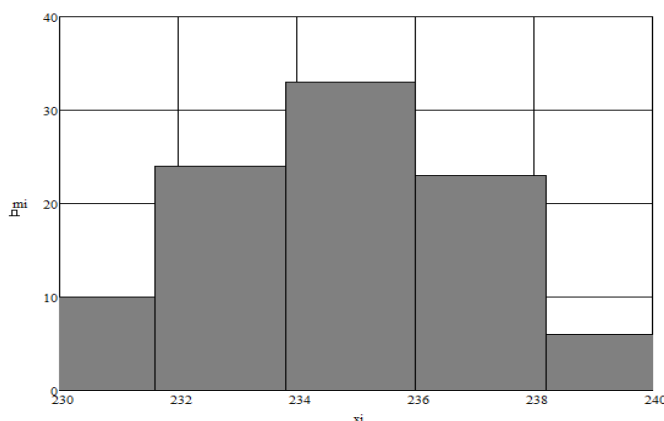


Рис. 2.13. Гістограма розподілу густини відносних частот значень тиску на виході насосного агрегату

Аналіз побудованої гістограми дозволяє зробити висновок, що досліджуваний розподіл відповідає нормальному закону розподілу.

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad i := 1..n \quad p_i := \frac{1}{n} \cdot i \quad x := 0..50.4$$

$$X := \text{norm}(n, 39.4, 50.4) \quad X := \text{rlogis}(n, 39.4, 50.4) \quad X := \text{runif}(n, 39.4, 50.4)$$

$$X := \text{sort}(K^{(1)}) \quad m := \text{mean}(K) \quad \sigma := \text{var}(K) \quad s := \text{stdev}(K)$$

$$m = 143.152 \quad \sigma = 8.758 \times 10^5 \quad s = 93.586$$

Рис. 2.14. Виконання чисельних обчислень для визначення функції розподілу за допомогою програмного комплексу MathCad

$$pn := \text{pnorm}(X, m, \sigma) \quad pl := \text{plogis}(X, m, \sigma) \quad pu := pt \quad k := 1..3$$

$$\text{cor}(pp) := \text{corr}(p, p)$$

$$\text{cor}(pn) = 1 \quad v := (40.5 \quad 42.7 \quad 44.9 \quad 47.1 \quad 49.3)$$

$$\text{cor}(pl) = 1 \quad ch := (0.104 \quad 0.25 \quad 0.344 \quad 0.24 \quad 0.063)$$

$$\text{cor}(pu) = 1 \quad i := 1..5 \quad n := 96$$

$$el_i := \begin{array}{|c|} \hline 40.5 \\ \hline 42.7 \\ \hline 44.9 \\ \hline 47.1 \\ \hline 49.1 \\ \hline \end{array} \quad kel_i := \begin{array}{|c|} \hline 10 \\ \hline 24 \\ \hline 33 \\ \hline 23 \\ \hline 6 \\ \hline \end{array}$$

$$pel_i := \frac{kel_i}{n}$$

$$pel_i = \begin{array}{|c|} \hline 0.104 \\ \hline 0.25 \\ \hline 0.344 \\ \hline 0.24 \\ \hline 0.063 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 2.15. Розрахунки функції розподілу методом чисельного аналізу із використанням програмного середовища MathCad

Здійснимо апроксимацію закону розподілу експериментальної величини із застосуванням програмного забезпечення Curve Expert.

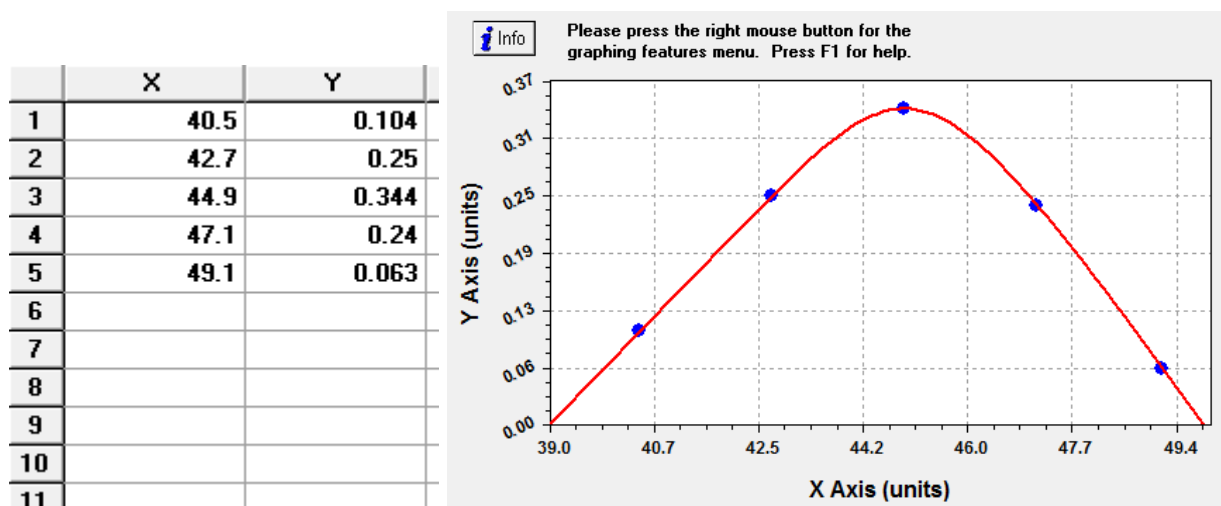


Рис. 2.16. Характеристика розподілу тиску на виході насосного агрегату

На основі представлених на рис. 2.16 даних можна зробити висновок, що досліджуваний розподіл в цілому відповідає нормальному закону розподілу. Для перевірки цієї гіпотези застосуємо критерій узгодженості Пірсона, прийнявши рівень значущості  $\alpha = 0,05$ .

$$n = 5, \quad (2.25)$$

$$\chi^2 = n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\text{int}_i - \text{int}_{i+1})^2}{\text{int}_{i+1}}, \quad (2.26)$$

$$\chi^2 = 0.513, \quad (2.27)$$

$$r = n - 3, \quad (2.28)$$

$$r = 2. \quad (2.29)$$

Зіставивши значення критичних точок  $\chi^2$  розподілу для рівня значущості 0,05 та кількості ступенів свободи 2, визначаємо відповідне критичне значення:

$$\chi_{кр}^2(0.05, 2) = 5.992. \quad (2.30)$$

Оскільки  $0,513 < 5,992$ , немає підстав для відхилення нульової гіпотези, що підтверджує, що досліджуваний розподіл відповідає нормальному закону.

## **2.7. Аналіз тиску на усті свердловини за допомогою методів нечіткої логіки**

### **2.7.1. Аналіз функції належності для значень тиску на усті свердловини**

Розглянемо у роботі структуру фази-моделі, яка базується на прикладі контролю процесу гідророзриву пласта. Процес ГРП є нелінійним. Параметри процесу бути визначені за допомогою параметрів контролю, котрі базується на застосуванні фази-логіки. [28, 29]

За допомогою статичних характеристик встановимо необхідну кількість термів, тип функції належності. Використовуватимемо для цього дослідження програмні продукти Matlab а також CurveExpert.

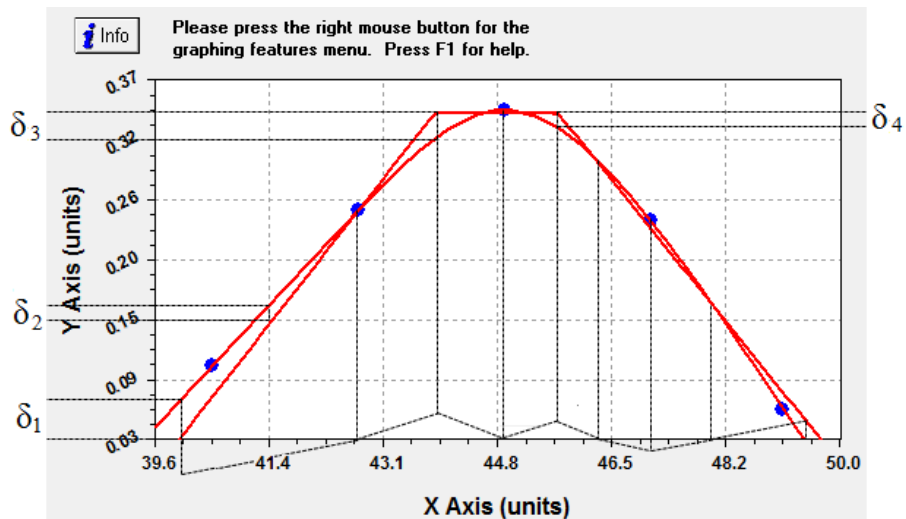


Рис. 2.17. Аппроксимация функции принадлежности тиску на усті свердловини у вигляді трапецієподібної кривої за допомогою програмного забезпечення CurveExpert

Виходячи з даних, представлених на рисунку 2.17, проведемо оцінку похибки апроксимації на різних інтервалах значень експериментальної величини.

$$\delta_1 = \frac{0.0675 - 0.03}{0.03} \cdot 100\% = 25\%, \quad (2.36)$$

$$\delta_2 = \frac{0.165 - 0.15}{0.15} \cdot 100\% = 10\%, \quad (2.37)$$

$$\delta_3 = \frac{0.33 - 0.32}{0.32} \cdot 100\% = 9.38\%, \quad (2.38)$$

$$\delta_4 = \frac{0.35 - 0.335}{0.335} \cdot 100\% = 4.48\%. \quad (2.39)$$

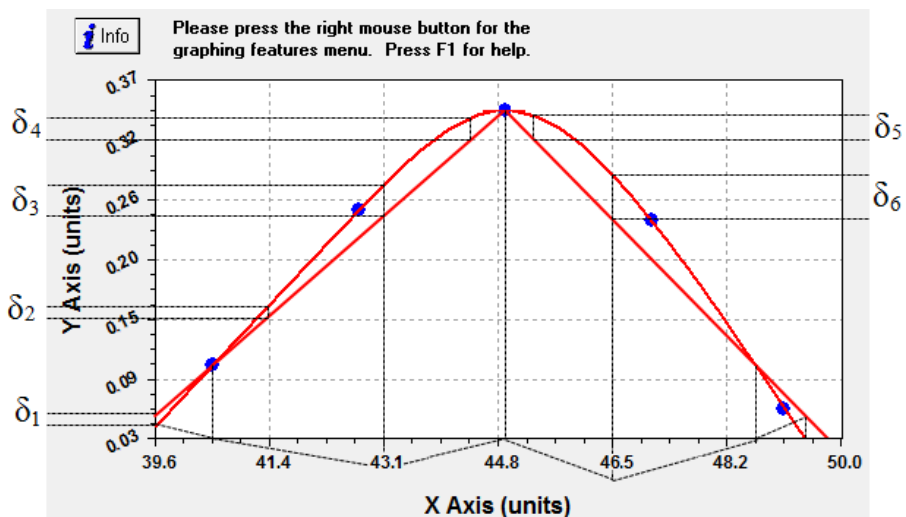


Рис. 2.18. Аппроксимация функции принадлежности тиску на усті свердловини у вигляді трикутної кривої за допомогою програмного забезпечення CurveExpert

Використовуючи дані, наведені на рисунку 2.18, проведемо аналіз похибки апроксимації для різних ділянок значень експериментальної величини.

$$\delta_1 = \frac{0.055 - 0.045}{0.045} \cdot 100\% = 22.2\% , \quad (2.40)$$

$$\delta_2 = \frac{0.1625 - 0.15}{0.15} \cdot 100\% = 8.33\% , \quad (2.41)$$

$$\delta_3 = \frac{0.2825 - 0.2375}{0.2375} \cdot 100\% = 18.75\% , \quad (2.42)$$

$$\delta_4 = \frac{0.3 - 0.22}{0.22} \cdot 100\% = 36.36\% . \quad (2.43)$$

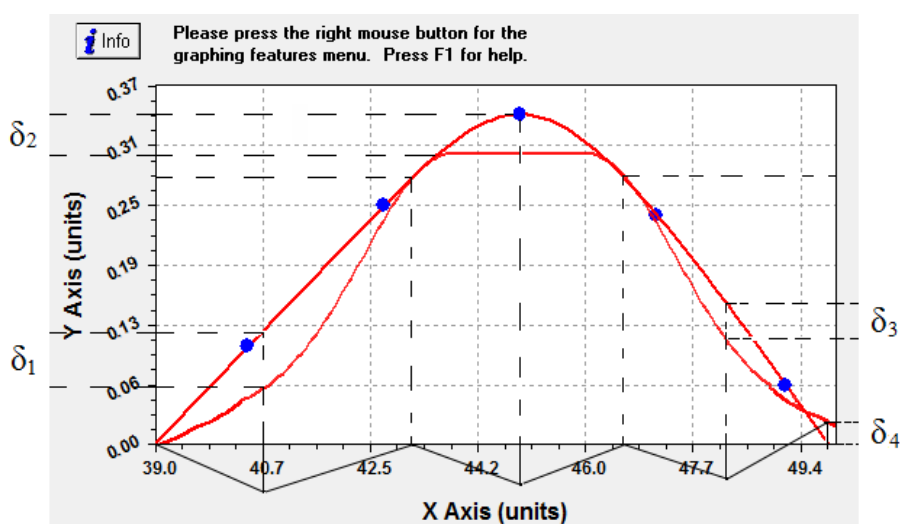


Рис. 2.19. Апроксимація функції належності тиску на усті свердловини за гаусівським законом із використанням програмного забезпечення CurveExpert

На основі даних, представлених на рис. 2.19, виконуємо обчислення похибок апроксимації для тих самих інтервалів значень експериментальної величини, що й у попередньому розділі.

$$\delta_1 = \frac{0.0475 - 0.03}{0.03} \cdot 100\% = 15\% , \quad (2.44)$$

$$\delta_2 = \frac{0.163 - 0.15}{0.15} \cdot 100\% = 8\% , \quad (2.45)$$

$$\delta_3 = \frac{0.34 - 0.32}{0.32} \cdot 100\% = 4.48\% , \quad (2.46)$$

$$\delta_4 = \frac{0.35 - 0.335}{0.335} \cdot 100\% = 4.48\% . \quad (2.47)$$

Для опису величини тиску на виході насосного агрегату доцільно застосувати гаусівську функцію належності.

### 2.7.2. Встановлення числа термів для представлення величини тиску на усті свердловини

Для формування термів використаємо модуль FIS Editor програмного забезпечення Matlab. Необхідну кількість термів для фазифікації обчислюємо за допомогою наведеної нижче формули:

$$m_i = 2 \cdot \left( \frac{\bar{x}_i - x_i}{R_i} \right) + 1, \quad (2.48)$$

де  $\bar{x}_i = 10$ ;  $\bar{x}_i = 30$ ;  $R_i = 51.1 - 39.6 = 11.5$ .

Після проведення підстановок та відповідних обчислень визначаємо кількість термів для експериментальної величини тиску:

$$m_i = 2 \cdot \left( \frac{30 - 10}{11.5} \right) + 1 = 4.62 \approx 5. \quad (2.49)$$

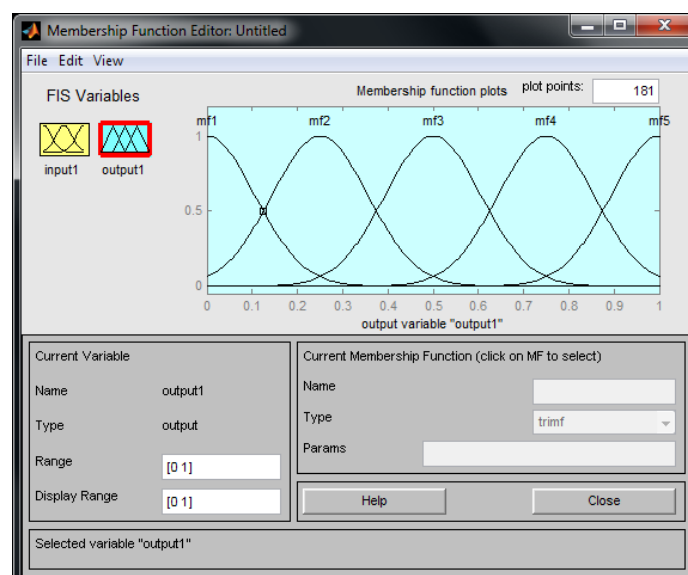


Рис. 2.20. Аппроксимация экспериментальной величины за допомогою гаусівської функції належності у середовищі Matlab

Таким чином, отримані нечіткі діапазони використовуються для фазифікації та подальшого інференціювання. Основна функція фазифікації полягає у перевірці пропускну здатності цих діапазонів, представленні контрольованих величин у формі нечітких інтервалів і підготовці результатів для логічної обробки. Ефективність нечіткого регулятора визначається як кількістю термів, на які розподілені вхідні та вихідні сигнали, так і якістю сформульованих правил нечіткої логіки.

## **Висновки до розділу 2**

Виконано синтез моделі насосного агрегату для гідравлічного розриву пласта. Розробка моделі дала змогу здійснювати імітаційне моделювання.

Виконано обробку експериментального дослідження зміни тиску на виході із насосного агрегату. Встановлено досліджуваний процес підпорядковується нормальному закону розподілу.

Обраховано необхідну кількість термів для опису досліджуваних параметрів.

## РОЗДІЛ 3

### СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАСОСНИМ АГРЕГАТОМ

#### 3.1. Розробка системи управління динамічними об'єктами з параметрами, що мають нечітку природу

На сучасному етапі дослідження в галузі проектування САК складними динамічними системами з нечіткими параметрами спрямовані на створення модульних систем нечіткого регулювання (fuzzy control system, fuzzy controller), заснованих на положеннях нечіткої логіки (fuzzy logic), що забезпечують відповідні характеристики поведінки об'єкта керування. Проектування подібних систем стало можливим завдяки активному розвитку сучасних технологій та різноманітних математичних методів, які доповнюються наочними геометричними інтерпретаціями.

Система нечіткого висновку призначена для трансформації значень вхідних змінних керованого процесу у вихідні змінні шляхом застосування нечітких продукційних правил. Алгоритмічне представлення переходу від нечіткого висновку до конкретного чіткого рішення наведено на рисунку 3.1.

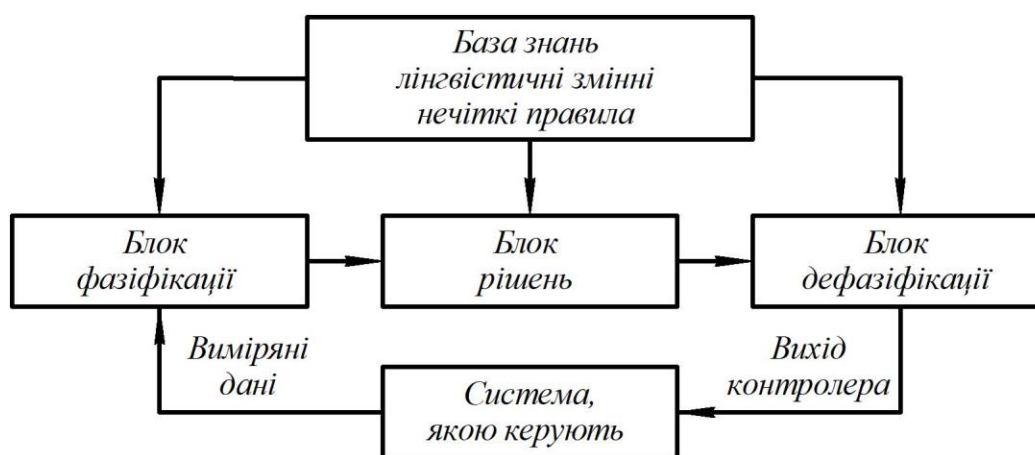


Рис. 3.1. Алгоритмічне представлення процесу прийняття рішення

Блок фазифікації здійснює перетворення наявної чіткої величини, котра вимірюється на виході керованого в певні нечіткі величини, котрі описані за

допомогою лінгвістичних змінних у базі знань.

Блок рішень побудований на основі використання нечітких умов типу «if – then» з метою перетворення наявних нечітких вхідних даних у певні керувальні впливи, котрі також мають нечіткий характер.

Блок дефазіфікації призначений для перетворення нечітких даних із виходу блоку рішень у певні чіткі величини, котрі застосовуються для управління об'єктом.

Усі системи у яких функціонують системи із нечіткою логікою працюють за однаковим принципом. Показники від вимірювальних приладів фазіфікуються, потім обробляються та дефазіфікуються і в вигляді простих сигналів направляються на індикаційні та виконавчі пристрої.

### **3.2. Створення нечіткого регулятора для автоматизованого керування насосним агрегатом**

Застосовуватимемо програмний продукт Matlab (Fuzzy Logic Toolbox) для створення моделі нечіткого регулятора. Застосовуватимемо алгоритм Mamdani для створення правил.

Процес розробка фазі регулятора потребує особливого зосередження від експерта, та складається із зв'язаних між собою етапів автоматичного проектування. На початковому етапі проведемо опитування експерта-технолога. Дана процедура умовно зводиться до анкетування експертів.

При гідророзриві пласта одним з основних контрольованих параметрів є тиск котрий утворюється у свердловині. Даний тиск можна регулювати швидкістю подачі речовини для розриву в свердловину, яка регулюється насосом.

Проектування фазового регулятора є складним і ресурсомістким процесом, який вимагає високої концентрації уваги експерта та включає взаємопов'язані етапи автоматизованого проектування. На початковому етапі здійснюється опитування технологічного експерта, що зазвичай реалізується у формі структурованого анкетування.

Таблиця 3.1

## Опитування технологів

Питання	Відповіді
1	2
Які саме входи потрібно узяти для регулятора тиску?	Значення витрати
Яким має бути вихід?	Зміна положення ВМ на лінії для подачі палива до двигуна
Яким має бути оптимальний тиск в трубопроводі?	44 МПа
Який максимально допустимий тиск в трубопроводі?	45 МПа
Який мінімально допустимий тиск в трубопроводі?	43 МПа
Який слід задати для регулятора максимальний тиск у трубопроводі?	44.75 МПа
Який слід задати для регулятора мінімальний тиск у трубопроводі?	43.25 МПа
Який саме тиск вважається малим?	43.5 МПа
Який саме тиск вважається великим?	44.5 МПа
Яке завдання потрібно задати ВМ, у випадку коли тиск у трубопроводі трубопроводі:	
- 44.75 МПа	Призакриття на 35%
- 43.25 МПа	Привідкриття на 35%
- 44.5 МПа	Призакриття на 10%
- 43.5 МПа	Привідкриття на 10%
- 44 МПа	Без змін

## Продовження таблиці 3.1

1	2
Яке завдання потрібно задати ВМ, у випадку коли є певна тенденція до пониження тиску у трубопроводі за оптимального тиску у трубопроводі?	Привідкриття на 10%
Яким являється робочий діапазон положення ВМ?	0 - 100%
Яке завдання потрібно задати ВМ, у випадку коли є певна тенденція до підвищення тиску у трубопроводі за оптимального тиску у трубопроводі?	Призакриття на 10%
Яким являється номінальне положення ВМ	50%

Маючи дані наведені у таблиці 3.1 переходимо до розробки безпосередньо регулятора. У попередніх розділах встановлено, що для параметру «витрата речовини розриву» необхідно 5 термів («висока»; «вище середньої»; «середня»; «нижче середньої»; «мала»). Інтерфейс налаштування цього параметра представлено на рисунку 3.2. Для іншого параметра, що характеризує тривалість процесу, встановлено наступні терми: «кінець»; «3 фаза»; «2 фаза»; «1 фаза»; «початок». Інтерфейсне вікно для встановлення значення даного параметра представлено на рисунку 3.3.

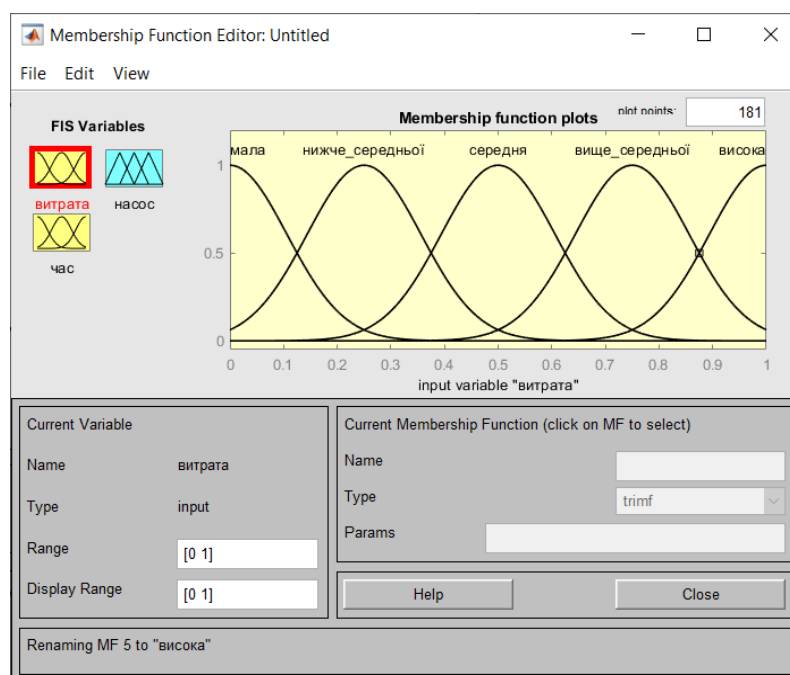


Рис. 3.2. Інтерфейсне вікно для конфігурації параметра «об’ємна витрата рідини»

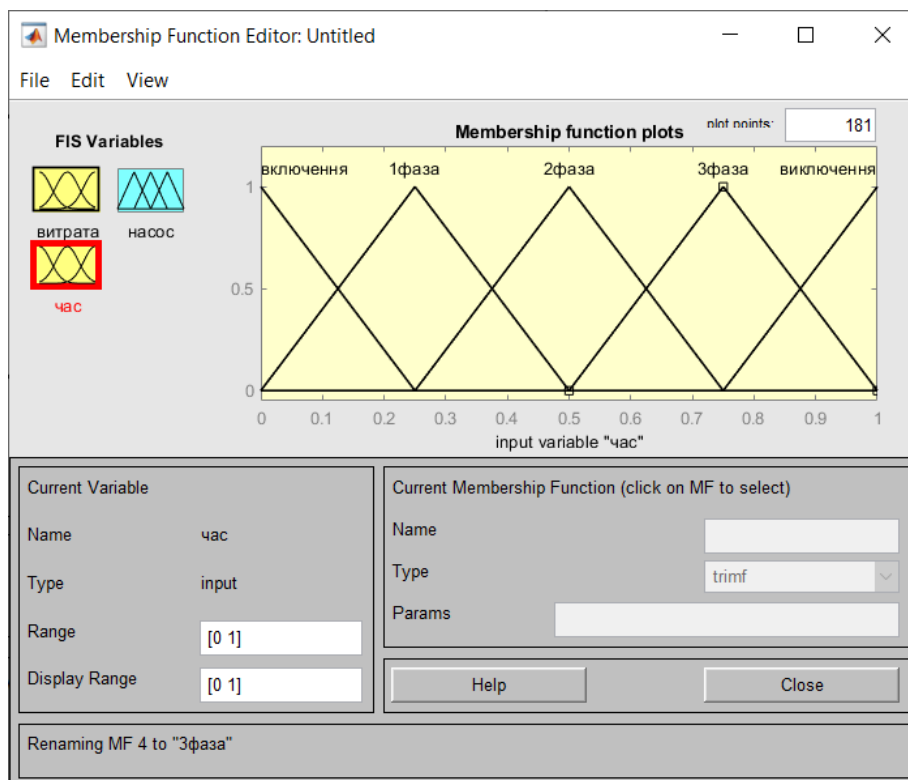


Рис. 3.3. Інтерфейсне вікно для конфігурації параметра «тривалість процесу»

Вихідний параметр «насос» характеризуватиметься також 5 термами (рис. 3.4): «виключити»; «збільшити подачу»; «залишити незмінною»; «зменшити подачу»; «включити».

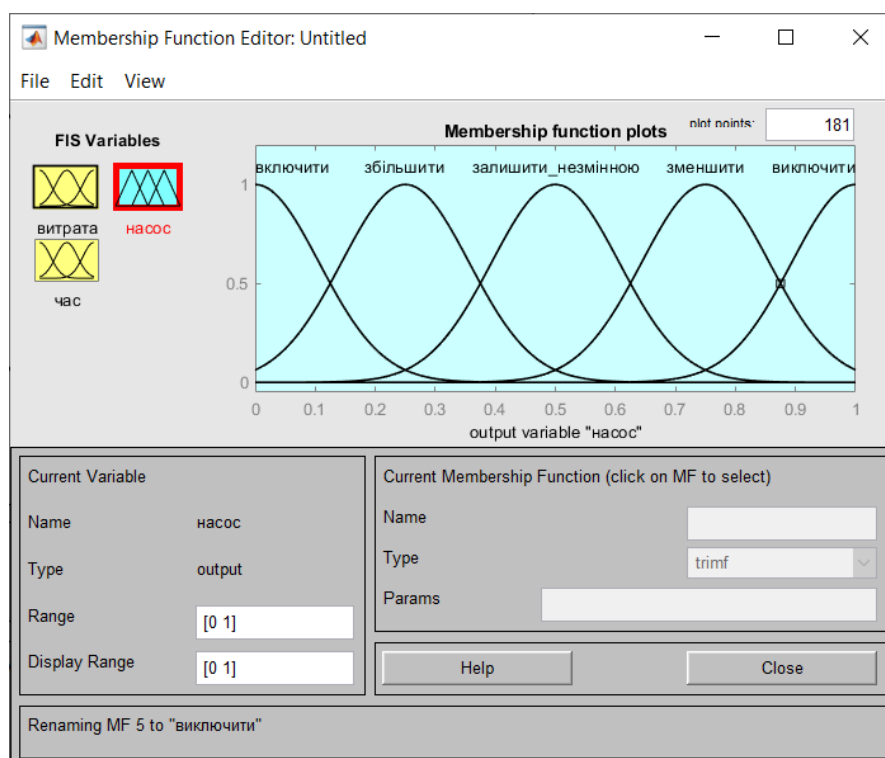


Рис. 3.4. Інтерфейсне вікно для конфігурації параметра «насос»

Діапазон зміни значень від 0 до 1.

Створення бази знань являється наступним кроком. Занесемо усі наявні дані (табл. 3.2) в алгоритмічний блок типу Mamdani.

Таблиця 3.2

**Дані необхідні для створення бази знань нечіткого регулятора**

Витрата	Час проходження	Насос
мала	виключення	залишити незмінною
висока	3 фаза	залишити незмінною
вище середньої	3 фаза	залишити незмінною
середня	3 фаза	збільшити
нижче середньої	3 фаза	збільшити
мала	3 фаза	збільшити
висока	3 фаза	залишити незмінною
вище середньої	2 фаза	збільшити
нижче середньої	2 фаза	збільшити
середня	2 фаза	збільшити
мала	2 фаза	збільшити
висока	2 фаза	залишити незмінною
вище середньої	2 фаза	залишити незмінною
середня	2 фаза	збільшити
нижче середньої	1 фаза	збільшити
мала	1 фаза	збільшити
висока	1 фаза	зменшити
вище середньої	1 фаза	залишити незмінною
середня	1 фаза	збільшити
мала	1 фаза	збільшити
нижче середньої	1 фаза	збільшити
мала	включення	включити

Представлені у таблиці 3.2 дані занесено у алгоритмічний блок Mamdani (рис. 3.5).

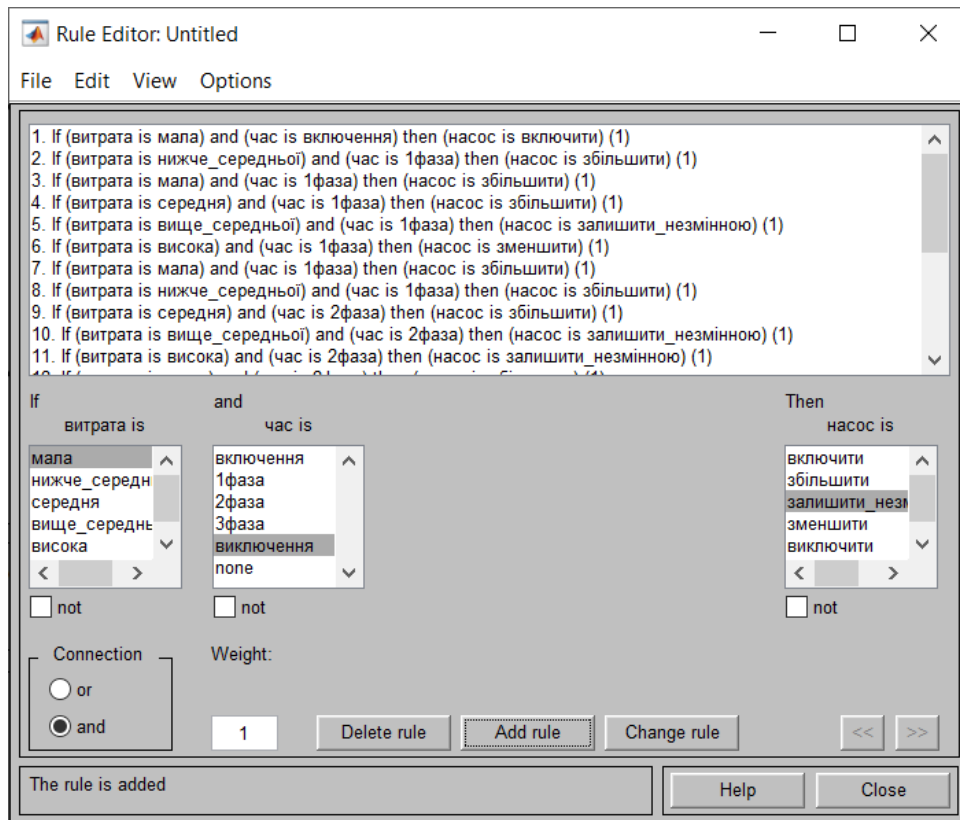


Рис. 3.5. База правил

Вікно у якому представлено роботу регулятора представлено на рисунку 3.6. У ньому видно процес зміни вихідних параметрів залежно від стану вхідних.

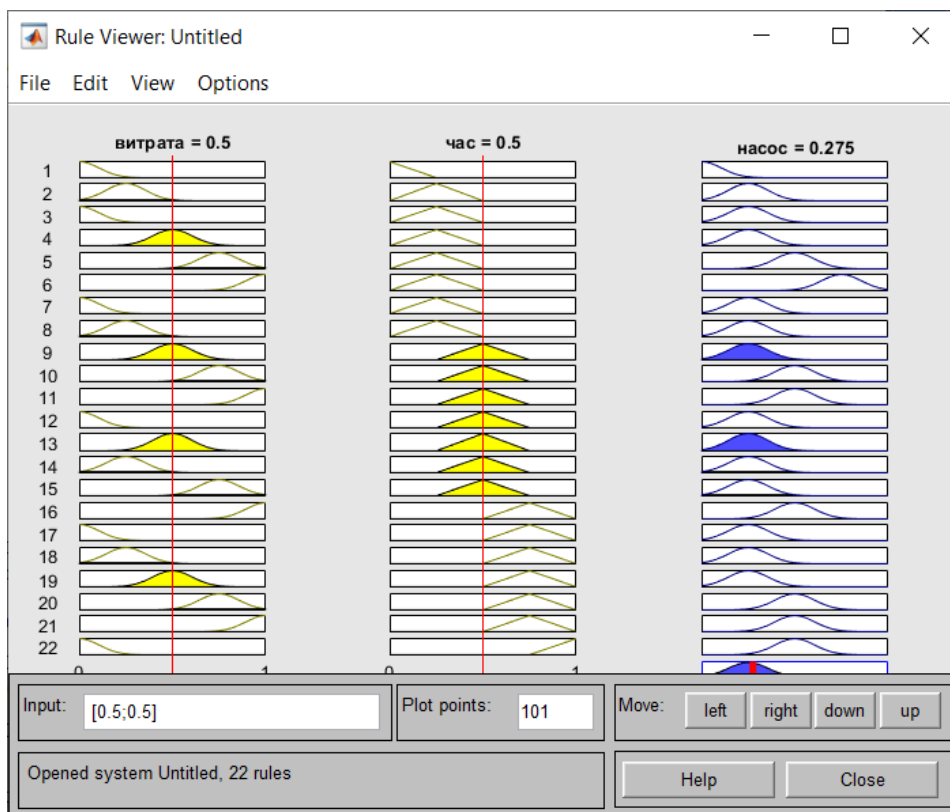


Рис. 3.6. Принцип регулювання нечіткого регулятора

За допомогою використання теорії нечітких множин побудовано нечіткий регулятор, який дасть можливість керувати насосом а також підтримувати на протязі деякого часу необхідні значення витрати речовини в процесі розриву пласта. З метою дослідження системи автоматичного регулювання тиском у трубопроводі у редакторі для систем нечіткого виводу здійснено проектування, а також налаштування нечітких регуляторів, котрі потрібно використати у процесі імітаційного моделювання. Налаштування нечіткого контролера є доволі тривалим, ретельним та складним.

### 3.3. Розробка імітаційної моделі з метою керування насосним агрегатом

Зважаючи на наведені вище проблеми використання ПІД-регуляторів, потрібно створити ефективну імітаційну модель системи керування.

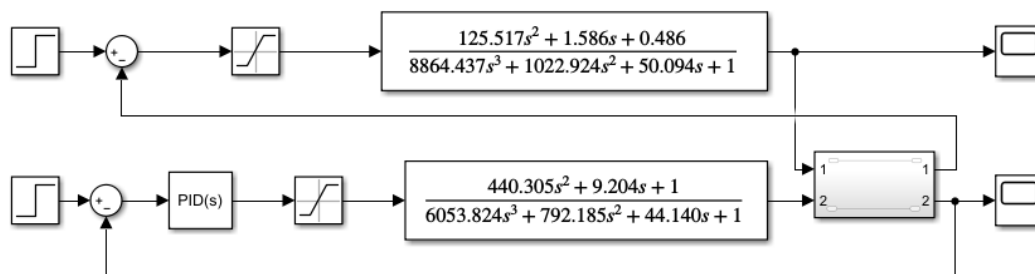


Рис. 3.7. Модель імітаційного моделювання системи автоматичного керування з коригуючим елементом

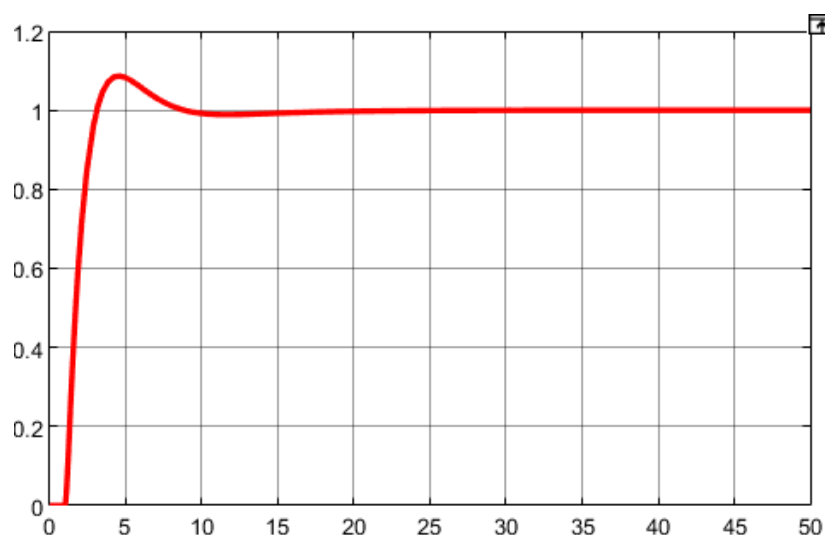


Рис. 3.8. Перехідна характеристика системи автоматичного керування із коригуючим елементом

Основні показники якості перехідного процесу:

- час перехідного процесу:

$$t=9 \text{ с;}$$

- перерегулювання:

$$\sigma=8.5\% .$$

Замість лінійного коректуючого пристрою синтезуємо нечіткий регулятор та одержаємо перехідний процес представлений на рисунках 3.9 та 3.10.

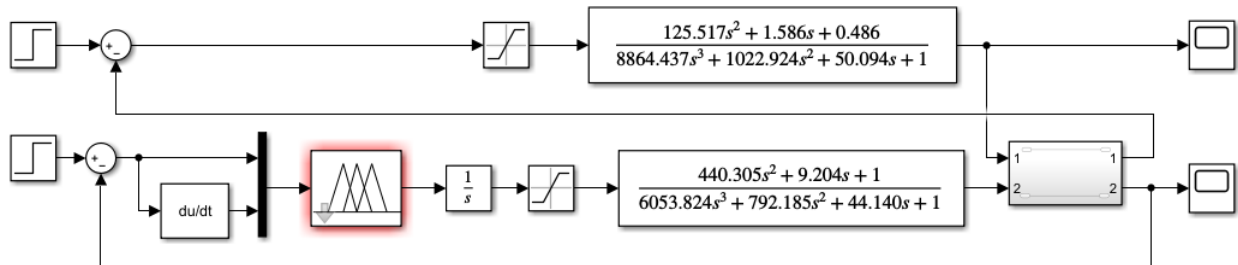


Рис. 3.9. Імітаційна модель САК з блоком Fuzzy Logic Controller та коректуючим пристроєм

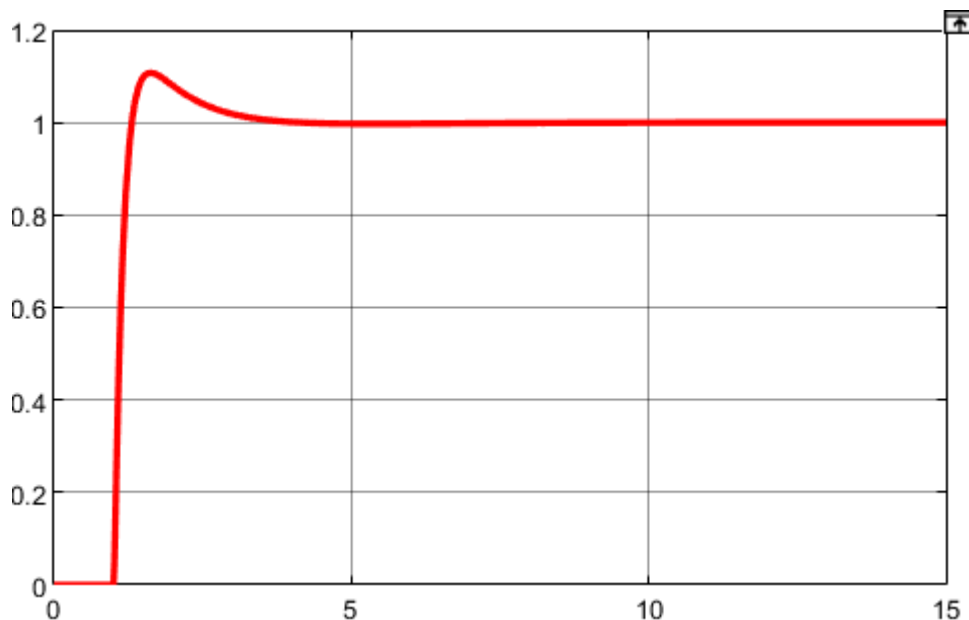


Рис. 3.10. Перехідний процес САК з блоком Fuzzy Logic Controller та коректуючим пристроєм

Основні показники якості перехідного процесу:

- час перехідного процесу:

$$t=3 \text{ с};$$

- перерегулювання:

$$\sigma=8\% .$$

Побудована САК насосного агрегату у порівнянні з лінійною САК виконує більш якісне регулювання перехідного процесу у випадку зміни параметрів системи а також при зовнішніх збуреннях.

### **Висновки до розділу 3**

Здійснено дослідження імітаційної моделі САК з метою здійснення ГРП з ПІД-регулятором а також з нечітким регулятором.

Виконавши аналіз результатів можемо стверджувати, що:

- найефективнішим являється нечіткий регулятор;
- у випадку застосування нечіткого регулювання показники якості нечіткої системи автоматичного керування суттєво не змінюються у порівнянні із традиційною системою. Перерегулювання майже однакове, але можемо отримати вииграш у часі перехідного процесу;
- висока точність керування забезпечується застосуванням нечіткого регулятора.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано наукову задачу, пов'язану з використанням методів нечітких множин та нечіткої логіки для керування процесом гідравлічного розриву пласта за умов неповноти інформації та нестачі апріорних даних. Розроблена система керування забезпечує ефективну роботу в умовах інформаційної невизначеності.

Отримані результати спричиняють такі висновки:

1. Виконано аналіз роботи насосного агрегату при проведенні ГРП, як об'єкту автоматизації, а також встановлено динамічні властивості основних каналів регулювання. Здійснено оцінку якості параметрів регулювання з використанням традиційних регуляторів та розглянуто доцільність застосування новітніх технологій управління.

2. Розроблено автоматичну систему керування тиском на виході із агрегату із застосуванням нечіткого регулятора та здійснено імітаційне моделювання САК. Підтверджено ефективність роботи нечітких регуляторів при наявності різноманітних збурень на об'єкт керування. Показано, що запропоновані моделі є адекватними та обґрунтовано доцільним їх застосування для автоматизованого керування процесом ГРП, замінюючи складні нелінійні моделі, що сприяє підвищенню техніко-економічних характеристик технологічного процесу.

3. Синтезовано модель насосного агрегату, яка призначена для проведення ГРП. Виконано імітаційне моделювання на реальних експлуатаційних режимах. Виконано дослідження системи автоматичного керування застосуванням нечітких а також класичних регуляторів.

Запропоновані рішення можна рекомендувати для застосування на нафтогазових родовищах а також при видобуванні сланцевого газу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Семенцов Г. Н. Теорія автоматичного керування: навч. посібник. Івано-Франківськ, 1999. 611 с.
2. Качмар Ю. Д., Яремійчук Р. С., Синюк Б. Б., Світлицький В. М. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину. Львів: Центр Європи, 2005. 414 с.
2. Семенцов Г. Н., Чигур І. І. Фазі-логіка в системах контролю: навч. посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2002. 70 с.
4. Cleary M.P. Comprehensive design formulae for hydraulic fracturing. Paper SPE 9259, 1980. 35-37 p.
5. Дранчук М. М. Проектування систем автоматизації технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості.: навч. посіб. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2005. 448 с.
6. Семенцов Г. Н., Чигур І. І. Фазі-логіка в системах керування: навч. Посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2002. 85 с.
7. Dickey P. A., Andressen K. H. Behavior of water input wells. Oil weekly, Vol.120, №2, 1945.
8. Hurst R. E., Moore J. M., Ramsey D. E. Development and application of frac treatments in the Permian Basin. J. of Petrol. Technology, Vol.7, №4, 1955.
9. Hurrison E. P., Kieschnick W. F., Me Guire W. J. The mechanics of fracture induction and extension. J. of Petrol. Technology, Vol.1, №10, 1954.
10. Mader D. Hydraulic proppant fracturing and gravel packing. Developments in petroleum science. Elsevier Science Publishers, Vol.26, №13, 1989.
11. Борин В. С., Лагойда А. І. Автоматизація технологічного процесу видобування сланцевого газу. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 2012. № 3(44). с. 40-51.
12. Горбійчук, М. І. Сучасна теорія керування та методи оптимізації технологічних об'єктів нафтогазового комплексу [Текст]: конспект лекцій / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. – 149 с.

13. Нетрадиційний газ в Україні. Технологія гідравлічного розриву [Електрон. ресурс] - Режим доступу: <http://shalegas.in.ua/fracking>.

14. Григораш В. В. Методи і засоби контролю за підготовкою та проведенням потужного гідророзриву пласта: дисертація кандидата технічних наук: спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин»: дата захисту 10.04.08. Івано-Франківськ, 2008. 191 с.

15. Нафтогазовидобувне управління «Надвірнанафтогаз»: друге життя нафтових свердловин [Електрон. ресурс] - Режим доступу: <http://nngvu.if.ua/index.php/novini/2-uncategorised/15-druge-zhittya-naftovikh-sverdlovyn> - Назва з екрану.

16. Zhurakivsky O., Chyгур I., Sementsov G. Fuzzy models of technological processes in oil and gas industry. Proceedings of Fuzzy 96, Zittau, Germany, 1996. 296-303 p.

17. Chyгур I., Sementsov G., Fuzzy simulation of drilling tool near process as many dimensional nonliner process. Proceedings of Zittau Fuzzy Colloguium, Zittan Germany, 2001. 175-180 p.

18. Григораш В. В., Бурмич Ф. М. Розробка комп'ютеризованої системи контролю за процесом ПГРП. Івано-Франківськ, 2004, №4. с. 140-142.

19. Григораш В. В. Розробка методологічних підходів до контролю і аналізу процесу ГРП. Методи та прилади контролю якості, 2004. №12. с.107-112.

20. Бурмич Ф. М., Качмар Ю. Д., Григораш В. В., Андрусак А. М. Нові технології потужного гідророзриву пласта. Івано-Франківськ, 2003. 302 с.

21. Борисенко В. Ф., Овсяніков В. П., Пліс П. С. Побудова ПІД-регулятора на підставі нечіткої логіки і нейронних мереж при регулюванні продуктивності насосів. Гірничя електромеханіка, 2009. - №17(257). с.110-122.

22. Мельник В. С. Імітаційне моделювання систем управління гідравлічним розривом пласта. Математичні машини і системи, 2007. № 3,4. с.199-202.

23. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. [Текст]: конспект лекцій / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024. – 159 с.

## ДОДАТКИ

## Додаток А

Тези на тему: «Модернізація системи автоматизованого керування процесом гідравлічного розриву пласта на нафтових і газових родовищах із використанням нечіткої логіки»

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

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

На рисунку 3 подано розроблену структурну схему системи, що реалізує керування із застосуванням нечіткого регулятора.

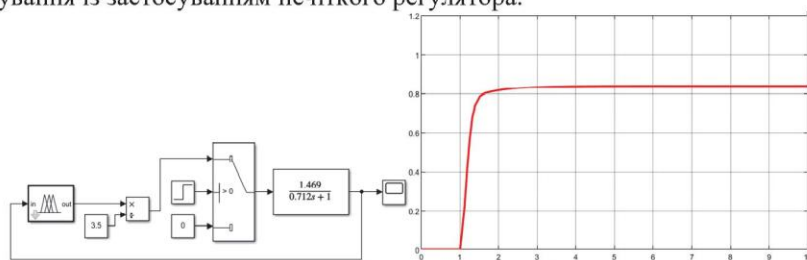


Рисунок 3 - Дослідження перехідної характеристики САК на базі нечіткої логіки

Літературні джерела

- 1 Горбійчук, М. І. Математичні методи оптимізації [Текст] : лаб. практикум / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016. – 79 с.
- 2 Новотарський М. А., Нестеренко Б.Б. Штучні нейронні мережі: обчислення. Київ: Ін-т математики НАН України, 2004. 408 с.
- 3 Семенов Г.Н. Автоматизація процесів переробки нафти і газу. Львів, 1992. 268 с.
- 3 Кононюк А. Ю. Нейронні мережі і генетичні алгоритми. К.: Корнійчук, 2008. 446 с.

УДК 681.5

### МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА НА НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ РОДОВИЩАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*І. В. Савчин, А. І. Лагойда*

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

Гідравлічний розрив пласта є високоефективним методом підвищення продуктивності нафтових та газових свердловин. Процес полягає у формуванні нових або розширенні існуючих тріщин у пласті шляхом нагнітання рідини або піни під високим тиском через свердловину. Для забезпечення стабільної проникності тріщин вони заповнюються спеціальним закріплюючим агентом. Під дією тиску закріплені тріщини не повністю замикаються, що призводить до істотного збільшення ефективної фільтраційної поверхні свердловини. Крім того, у деяких випадках процес активує додаткові зони пласта, які раніше не брали участі у видобутку.

Незважаючи на ефективність, технологія гідравлічного розриву пласта перебуває на ранніх стадіях розвитку, що обумовлює необхідність постійного вдосконалення її технологічної бази. Одним із перспективних напрямів є розробка систем керування на основі методів нечіткої логіки. Основною

перевагою цього підходу є можливість побудови регуляторів на основі лінгвістичних правил, де управління здійснюється через набір умовних операторів або правил, що відображають конкретні ситуації керування. Такі лінгвістичні правила формуються на основі експертного досвіду, інтуїції фахівців, а також виходячи з здорового глузду та технологічних даних, отриманих експериментальним шляхом.

На початковому етапі розробки системи було визначено передавальні функції для основного (1) та допоміжного (2) каналів управління:

$$W_0(p) = \frac{125,517p^2 + 1,586p + 0,486}{8864,437p^3 + 1022,924p^2 + 50,094p + 1}. \quad (1)$$

$$W_1(p) = \frac{440,305p^2 + 9,204p + 1}{6053,824p^3 + 792,185p^2 + 44,140p + 1}. \quad (2)$$

Виходячи із встановленої залежності між витратою пропанту та тиском на виході насосного агрегату, була розроблена і застосована імітаційна модель, що ілюструється на рис. 1.

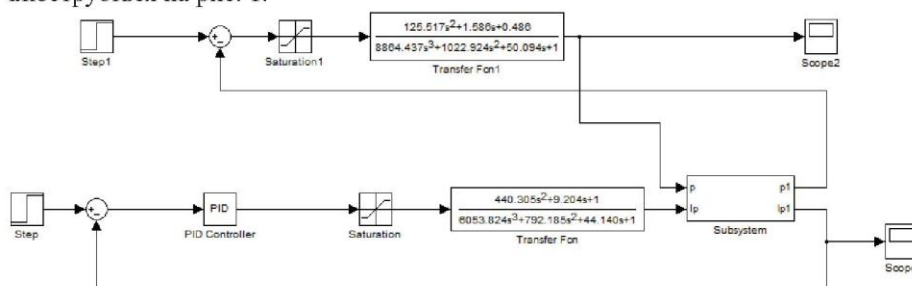


Рисунок 1 - Імітаційна модель системи регулювання тиску рідини на виході з насосного агрегату

На підставі аналізу статичних характеристик неперервного сигналу було визначено оптимальний тип функції належності, кількість термів та частоту дискретизації для досліджуваної експериментальної величини. Розрахунок похибок апроксимації тиску на виході насосного агрегату показав, що найбільш адекватною для моделювання є гаусівська функція належності (2), а для фазифікації технологічних параметрів експериментальної величини достатньо використати 5 термів (3).

Розробка нечіткого регулятора є комплексним і тривалим процесом, що потребує високого рівня уваги та експертної оцінки на кожному етапі проектування. Процес включає кілька взаємопов'язаних стадій. На початковому етапі було проведено опитування експертів, під час якого збиралися детальні відповіді на спеціально підготовлені питання.

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

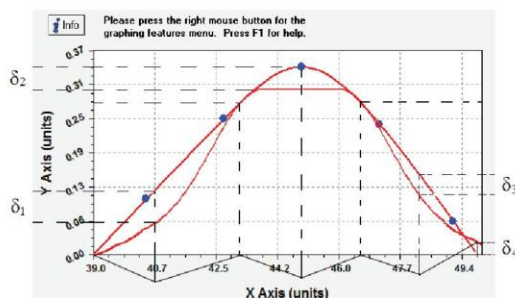


Рисунок 2 - Гаусівська функція належності тиску на усті свердловини в програмі CurveExpert

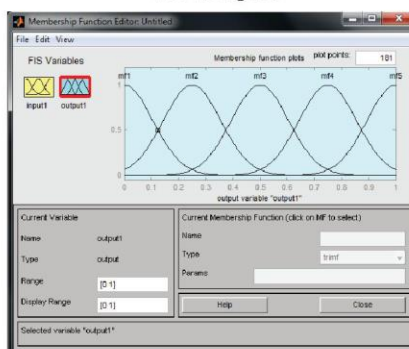


Рисунок 3 - Гаусівська функція належності експериментальної величини в програмі

На основі отриманих даних здійснено синтез нечіткого регулятора. У рамках дослідження були розроблені та проаналізовані різні конфігурації систем керування: з ПД-регулятором, з коректуючим пристроєм, а також із комбінацією коректуючого пристрою та блоку Fuzzy Logic Controller. Результати показали, що остання конфігурація забезпечує найвищу якість перехідного процесу та стабільність системи при зміні параметрів і виникненні зовнішніх збурень.

## Літературні джерела

- 1 Hurrison E. P., Kieshenick W. F., Me Guire W. J. The mechanics of fracture induction and extension. J. of Petrol. Technology, Vol.1, №10, 1954.
- 2 Dicrey P. A., Andressen K. H. Behavior of water input wells. Oil weekly, Vol.120, №2, 1945.
- 3 Горбійчук, М. І. Математичні методи оптимізації [Текст] : навч. посіб. / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2018. – 302 с.
- 4 Семенцов, Г. Н. Автоматизація збору і обробки інформації для резервуарних парків [Текст] : навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, Я. Р. Когуч. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2003. – 123 с.
- 5 Mader D. Hydraulic proppant fracturing and gravel packing. Developments in petroleum science. Elsevier Science Publishers, Vol.26, №13, 1989.



ІТЕТІ20250142

# СЕРТИФІКАТ

УЧАСНИКА КОНФЕРЕНЦІЇ

0,15 кредити ECTS

**САВЧИН І. В.**

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



09 жовтня 2025

Голова організаційного комітету Сергій ЗІКРАГИЙ



Івано-Франківськ