

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ

Група АКП -22-1

Максим Гопша

2026

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

Гопша Максим Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 685.1:622.24:519.876

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Удосконалення системи керування процесом буріння нафтогазових свердловин

(назва роботи)

на засадах нечіткої логіки

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент О.В. Кучмистенко
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1 М.С.Гопша
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент М. В. Шавранський
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

асистент Г.Г.Зварич
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту Завідувач кафедри

доцент А.І. Лагойда
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І.Лагойда

202__ року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Гопші Максиму Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення системи керування процесом буріння нафтогазових свердловин на засадах нечіткої логіки

керівник роботи Шавранський Михайло Васильович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 29 » 04 20 26 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2026

3. Вихідні дані до роботи матеріали практики, технологічний регламент

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

4.1. Аналіз сучасного стану автоматизації процесу буріння

4.2. Математичне моделювання процесу буріння

4.3. Розробка системи керування на основі нечіткої логіки

4.4. Дослідження розробленої системи керування в програмному середовищі Matlab

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
БР. АКП – 71.00.00.000.01– Схема бурової установки та процесу буріння

БР. АКП – 71.00.00.000.02 – Основні технологічні параметри процесу буріння

БР. АКП – 71.00.00.000.03 – Математичне моделювання процесу буріння свердловин

БР. АКП – 71.00.00.000.04 – Часові та частотні характеристики

БР. АКП – 71.00.00.000.05 – Оцінка адекватності моделі

БР. АКП – 71.00.00.000.06 – Структурна схема САК з нечітким регулятором

БР. АКП – 71.00.00.000.07 – Simulink-модель системи нечіткого керування процесом буріння

БР. АКП – 71.00.00.000.08 – Результати моделювання СК процесом буріння

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану автоматизації процесу буріння	08.05.2026 р.	Виконано
2	Математичне моделювання процесу буріння	22.05.2026 р.	Виконано
3	Розробка системи керування на основі нечіткої логіки	30.05.2026р.	Виконано
4	Дослідження розробленої системи керування в програмному середовищі Matlab	05.06.2026 р.	Виконано
5	Висновки по роботі	12.06.2026 р.	Виконано

Студент _____
(підпис)

М.С. Гопша _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М.В.Шавранський _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 76 сторінок друкованого тексту, 16 рисунків, 7 таблиць, 30 переліків посилань на джерела і 0 додатків.

Тема: «Удосконалення системи керування процесом буріння нафтогазових свердловин на засадах нечіткої логіки»

Об'єкт дослідження: процес буріння нафтогазових свердловин як об'єкт автоматичного керування. Предметом дослідження є методи та засоби підвищення ефективності керування процесом буріння з використанням нечітких регуляторів.

Мета проекту: підвищення ефективності та якості керування процесом буріння нафтогазових свердловин шляхом розробки та дослідження системи автоматичного керування на основі нечіткого логічного регулятора, що забезпечує стійку роботу в умовах нелінійності, невизначеності та збурень.

Методи дослідження: використано методи математичного моделювання та теорії автоматичного керування для опису й аналізу процесу буріння. Для розробки системи керування застосовано методи нечіткої логіки, а також методи ідентифікації та оптимізації параметрів. Дослідження виконано шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

Результати кваліфікаційної роботи: розроблено математичну модель процесу буріння та систему автоматичного керування на основі нечіткого логічного регулятора. Синтезовано структуру нечіткого регулятора, визначено функції належності та сформовано базу правил керування.

Проведено моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink та виконано порівняльний аналіз з PID-регулятором. Отримані результати показали підвищення якості керування: зменшення перерегулювання, скорочення часу встановлення та покращення стійкості до збурень.

Розроблено рекомендації щодо практичної реалізації системи керування на промислових контролерах і її інтеграції зі SCADA-системами.

Ключові слова: буріння свердловин, нечітка логіка, автоматичне керування, WOB, RPM, ROP, Torque, PID-регулятор, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 76 pages of printed text, 16 figures, 7 tables, 30 lists of references to sources and 0 appendices.

Topic: "Improvement of the control system for the drilling process of oil and gas wells based on fuzzy logic"

Object of research: the drilling process of oil and gas wells as an object of automatic control. The subject of the research is methods and means of increasing the efficiency of drilling process control using fuzzy controllers.

Purpose of the work: increasing the efficiency and quality of oil and gas well drilling process control by developing and researching an automatic control system based on a fuzzy logic controller that ensures stable operation under conditions of nonlinearity, uncertainty and disturbances.

Research methods: methods of mathematical modeling and automatic control theory were used to describe and analyze the drilling process. Fuzzy logic methods, as well as methods of parameter identification and optimization, were used to develop the control system. The research was carried out by computer modeling in the MATLAB/Simulink environment.

Results of qualification work: a mathematical model of the drilling process and an automatic control system based on a fuzzy logic controller were developed. The structure of the fuzzy controller was synthesized, membership functions were determined, and a base of control rules was formed.

The system was simulated in the MATLAB/Simulink environment and a comparative analysis was performed with a PID controller. The results obtained showed an improvement in control quality: reduction of overshoot, reduction of settling time, and improvement of resistance to disturbances.

Recommendations were developed for the practical implementation of the control system on industrial controllers and its integration with SCADA systems.

Keywords: well drilling, fuzzy logic, automatic control, WOB, RPM, ROP, Torque, PID controller, MATLAB/Simulink.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ.....	14
1.1 Загальна характеристика процесу буріння нафтогазових свердловин.....	14
1.2 Аналіз факторів, що впливають на процес буріння.....	18
1.3 Огляд сучасних систем автоматичного керування бурінням.....	21
1.4 Аналіз недоліків існуючих систем керування	23
1.5 Постановка задачі дослідження.....	25
Висновки до розділу.....	28
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ.....	29
2.1 Фізична модель процесу буріння	29
2.2 Формування математичної моделі процесу буріння.....	31
2.3 Передавальні функції об'єкта керування	34
2.4 Ідентифікація параметрів моделі	37
2.5 Аналіз динамічних характеристик об'єкта.....	41
Висновки до розділу	43
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	45
3.1 Основи нечіткої логіки в системах керування.....	45
3.2 Вибір структури нечіткого регулятора	47
3.3 Розробка функцій належності.....	50
3.4 Формування бази нечітких правил	54
3.5 Синтез структури системи керування.....	56
Висновки до розділу.....	60

					БР.АКП - 71.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докумен.	Підпис	Дата				
Розроб.		Гопша М.С.			Удосконалення системи керування процесом буріння нафтогазових свердловин на засадах нечіткої логіки	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Шавранський М.В					6	76
Реценз.		Зварич Г.Г.				АКП-22-1, ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В						
Затверд.		Лагойда А.І.						

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В	
ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MATLAB	62
4.1 Побудова моделі в MATLAB/Simulink.....	62
4.2 Результати моделювання системи керування процесом буріння	64
4.3 Оптимізація параметрів системи.....	70
Висновки до розділу	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	75

					БР. АКП - 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АМ – аналітичний метод
АС – адаптивні системи
АСК – автоматизована система керування
БНП – база нечітких правил
ЕМ – експериментальний метод
ІСК – інтелектуальні системи керування
ММ – математичне моделювання
МНК – метод найменших квадратів
НГС – нафтогазові свердловини
НЛ – нечітка логіка
НМ – нечіткі множини
ПЛК – програмований логічний контролер
ПП – програмний продукт
ПХ – перехідна характеристика
СА – система автоматизації
САК – система автоматичного керування
СК – система керування
ТП – технологічний процес
ФН – функції належності

					БР. АКП -71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток нафтогазової галузі характеризується ускладненням умов буріння свердловин, зростанням глибин розробки родовищ, підвищенням вимог до енергоефективності та безпеки технологічних процесів. У процесі буріння виникають значні динамічні навантаження, коливання технологічних параметрів та вплив невизначених факторів, зокрема неоднорідності геологічного середовища, зміни фізико-механічних властивостей порід, нестабільності гідродинамічних режимів і зношування бурового інструменту. Це ускладнює забезпечення стабільної та ефективної роботи традиційних систем автоматичного керування.

Класичні системи керування, побудовані на основі лінійних регуляторів, не завжди забезпечують необхідну якість регулювання в умовах нелінійності, невизначеності та багатопараметричності процесу буріння. Унаслідок цього виникають аварійні ситуації, знижується механічна швидкість буріння, збільшується ризик прихоплень бурильної колони, перевантаження обладнання та перевитрати енергетичних ресурсів. Тому актуальним є пошук нових інтелектуальних методів керування, здатних адаптуватися до змін технологічного процесу в режимі реального часу.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності автоматизованих систем керування є використання методів нечіткої логіки. Нечіткі регулятори дозволяють формалізувати досвід і знання оператора-буровика, враховувати невизначеність вхідної інформації та реалізовувати адаптивне прийняття рішень без необхідності створення точної математичної моделі об'єкта керування. Застосування нечіткої логіки забезпечує підвищення точності регулювання основних параметрів буріння, зменшення коливань осьового навантаження та крутного моменту, стабілізацію режимів роботи бурового обладнання та покращення техніко-економічних показників процесу.

Актуальність теми також обумовлена необхідністю впровадження сучасних цифрових технологій, елементів штучного інтелекту та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у нафтогазовій

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

промисловості. Розроблення та удосконалення систем керування процесом буріння на засадах нечіткої логіки сприятиме підвищенню продуктивності бурових робіт, зменшенню аварійності, оптимізації енергоспоживання та забезпеченню надійної роботи бурових комплексів у складних геолого-технічних умовах.

Таким чином, тема «Удосконалення системи керування процесом буріння нафтогазових свердловин на засадах нечіткої логіки» є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки спрямована на підвищення ефективності, надійності та інтелектуалізації процесів буріння в сучасних умовах розвитку нафтогазової галузі.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми дослідження зумовлений необхідністю підвищення ефективності та надійності процесів буріння в умовах постійного ускладнення геолого-технічних умов розробки нафтогазових родовищ. Сучасні бурові установки функціонують у середовищі значної невизначеності, де технологічні параметри процесу можуть змінюватися в широких межах під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. До таких факторів належать неоднорідність гірських порід, зміна пластового тиску, коливання навантаження на долото, зміни швидкості обертання бурильної колони та властивостей бурового розчину.

Традиційні системи автоматичного керування, що базуються переважно на класичних ПІД-регуляторах, мають обмежені можливості в умовах нелінійності та неповної визначеності процесу буріння. Використання лише класичних алгоритмів регулювання часто не забезпечує достатньої швидкодії та точності підтримання оптимальних режимів буріння, що призводить до зниження механічної швидкості проходки, підвищення енерговитрат, прискореного зношування бурового обладнання та виникнення аварійних ситуацій.

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначених проблем є застосування інтелектуальних методів керування, зокрема нечіткої логіки. Нечіткі системи керування дозволяють враховувати експертні знання операторів та технологів, працювати з нечіткою або неповною інформацією й адаптувати

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

алгоритми керування до змін параметрів об'єкта в режимі реального часу. Це особливо важливо для процесу буріння, який характеризується складною динамікою, багатозв'язністю та значною кількістю випадкових збурень.

Використання нечіткої логіки у системах керування бурінням дає можливість забезпечити більш плавне регулювання осьового навантаження, крутного моменту, частоти обертання та швидкості подачі бурового інструменту, що сприяє стабілізації технологічного процесу та підвищенню його ефективності. Крім того, впровадження інтелектуальних алгоритмів керування дозволяє знизити ризик виникнення прихоплень бурильної колони, перевантажень обладнання та інших ускладнень під час буріння.

Вибір цієї теми також обумовлений сучасними тенденціями цифровізації нафтогазової галузі, розвитком концепцій Smart Drilling та Industrial IoT, які передбачають інтеграцію інтелектуальних систем аналізу та керування у виробничі процеси. Розроблення та вдосконалення систем керування на основі нечіткої логіки є важливим етапом створення високоефективних автоматизованих бурових комплексів нового покоління.

Отже, обрана тема дослідження має важливе наукове та практичне значення, оскільки спрямована на підвищення якості автоматичного керування процесом буріння, покращення техніко-економічних показників роботи бурових установок та забезпечення безпечного й ефективного освоєння нафтогазових родовищ.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення системи автоматичного керування процесом буріння нафтогазових свердловин на основі методів нечіткої логіки для підвищення ефективності, стійкості та якості керування технологічними параметрами буріння в умовах невизначеності та змінних геолого-технічних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних технологій буріння нафтогазових свердловин та існуючих систем автоматичного керування процесом буріння.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

2. Дослідити основні технологічні параметри процесу буріння та фактори, що впливають на ефективність роботи бурового обладнання.
3. Виконати аналіз недоліків традиційних систем керування на основі класичних регуляторів в умовах нелінійності та невизначеності процесу буріння.
4. Обґрунтувати доцільність застосування методів нечіткої логіки для керування процесом буріння нафтогазових свердловин.
5. Розробити математичну модель об'єкта керування процесом буріння з урахуванням основних динамічних характеристик системи.
6. Розробити структуру та алгоритм функціонування нечіткої системи керування технологічними параметрами буріння.
7. Сформувати базу нечітких правил та функції належності для реалізації нечіткого регулятора.
8. Провести моделювання роботи системи керування в середовищі MATLAB Simulink та оцінити ефективність запропонованого алгоритму.
9. Виконати порівняльний аналіз роботи класичної та нечіткої систем керування за показниками якості регулювання.

Методи дослідження. У роботі для досягнення поставленої мети використано комплекс теоретичних, аналітичних та прикладних методів дослідження, що базуються на сучасних підходах автоматизації технологічних процесів, теорії керування та інтелектуальних систем.

Під час дослідження застосовано методи системного аналізу для вивчення процесу буріння нафтогазових свердловин як складного багатопараметричного об'єкта керування та визначення основних факторів, що впливають на ефективність технологічного процесу. Для опису динаміки процесу буріння використано методи математичного моделювання, теорії автоматичного керування та ідентифікації параметрів об'єкта.

Для розроблення системи керування використано методи нечіткої логіки, зокрема апарат нечітких множин, функції належності, базу продукційних правил та алгоритми нечіткого логічного висновку Мамдані. Формування структури

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

нечіткого регулятора здійснювалося з урахуванням експертних знань щодо режимів буріння та особливостей функціонування бурового обладнання.

Дослідження динамічних характеристик системи, оцінювання якості регулювання та аналіз стійкості виконувалися із застосуванням методів теорії автоматичного керування, чисельного моделювання та комп'ютерного експерименту.

Моделювання та перевірка працездатності розробленої системи керування здійснювалися у програмному середовищі MATLAB Simulink із використанням засобів моделювання динамічних систем та інструментів реалізації нечітких регуляторів. Для оцінювання ефективності запропонованої системи виконано порівняльний аналіз показників якості керування, зокрема перерегулювання, часу встановлення, точності підтримання режиму та стійкості системи до дії збурень.

Отримані результати дослідження опрацьовано з використанням методів аналізу та узагальнення результатів моделювання, що дозволило оцінити доцільність застосування нечіткої логіки для удосконалення систем керування процесом буріння нафтогазових свердловин.

Структура та обсяг бакалаврської роботи. Бакалаврська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань на джерела з 30 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 76 сторінок, у тому числі 7 таблиць і 16 рисунків.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ

1.1 Загальна характеристика процесу буріння нафтогазових свердловин

Процес буріння нафтогазових свердловин (НГС) є складною багатофакторною технологічною операцією, яка поєднує механічне руйнування гірських порід, транспортування шламу, забезпечення стійкості стовбура свердловини та контроль параметрів роботи бурового обладнання [1-3]. Ефективність буріння визначається узгодженою роботою механічних, гідравлічних та автоматизованих систем [2, 4], а також правильним вибором режимів буріння.

1.1.1 Основні етапи буріння

Процес буріння свердловини включає такі ключові етапи:

- 1) Підготовчий етап: монтаж бурової установки; підготовка майданчика; перевірка обладнання та систем автоматизації.
- 2) Початкове буріння (спуск направляючої колони): буріння верхніх нестійких шарів; встановлення обсадних труб; цементування.
- 3) Основне буріння (поглиблення свердловини): механічне руйнування породи долотом; циркуляція бурового розчину; контроль параметрів буріння.
- 4) Проміжне кріплення свердловини: спуск обсадних колон; цементування для зміцнення стінок.
- 5) Фінальне буріння (до проектної глибини): досягнення продуктивного пласта; підготовка до дослідження свердловини.
- 6) Завершення буріння: очищення свердловини; геофізичні дослідження; підготовка до експлуатації.

На рисунку 1.1 зображено загальну схему бурової установки з основними технологічними системами та їх взаємодією. Показано підйомну, обертальну, циркуляційну, енергетичну системи, а також систему протифонтанної безпеки, які забезпечують процес буріння свердловини. Усі системи працюють у

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

взаємозв'язку для ефективного, безпечного та безперервного виконання бурових робіт.

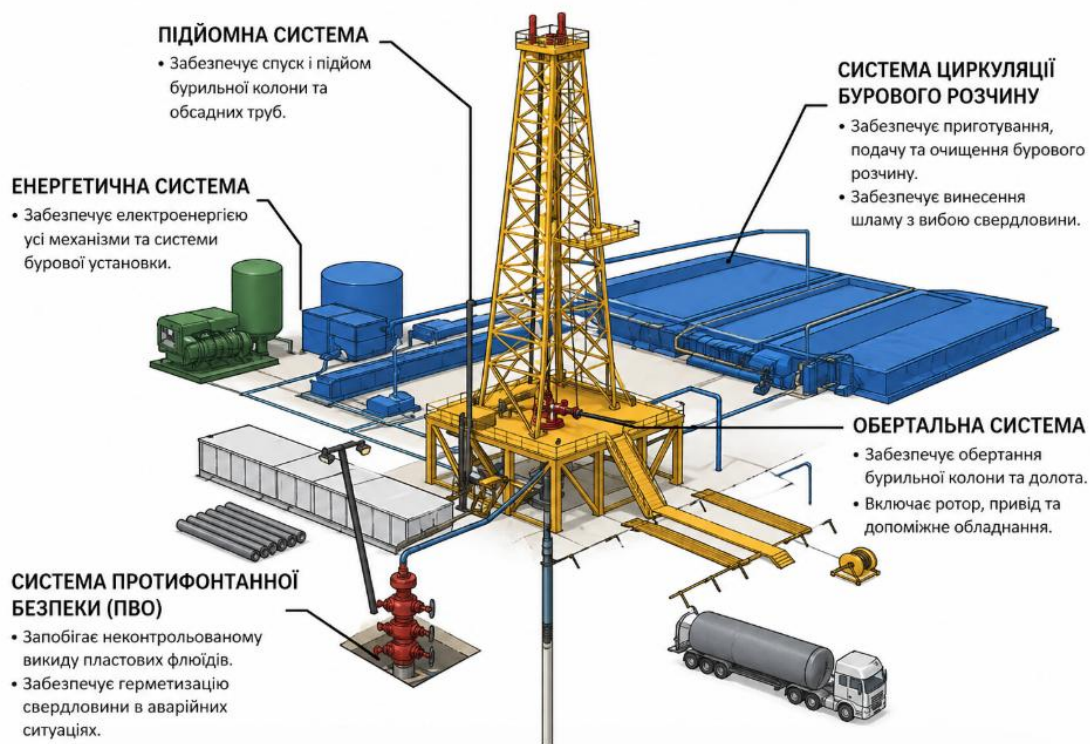


Рисунок 1.1– Структурна схема бурової установки з основними технологічними системами

На рисунку 1.2 зображено узагальнену схему бурової установки та принцип здійснення процесу буріння свердловини. Центральним елементом є бурова вежа – металева конструкція, яка забезпечує підтримку підйомного обладнання та проведення основних технологічних операцій, зокрема спуско-підймальних робіт. У свердловині розміщена колона бурових труб, яка передає обертальний рух від бурових двигунів до долота, що безпосередньо руйнує гірську породу на вибої.

Особливу роль відіграє система подачі бурового розчину: насосами розчин подається всередину бурової колони, після чого піднімається по затрубному простору між стінками свердловини та трубами, виносячи на поверхню шлам і одночасно охолоджуючи долото. Також на схемі показано систему цементування, яка використовується для закріплення обсадних труб у стовбурі свердловини та ізоляції нафтових і газових пластів від водоносних горизонтів.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Отже, рисунок 1.2 відображає взаємодію основних вузлів бурової установки та послідовність технологічних процесів, що забезпечують ефективне і безпечне буріння свердловини.

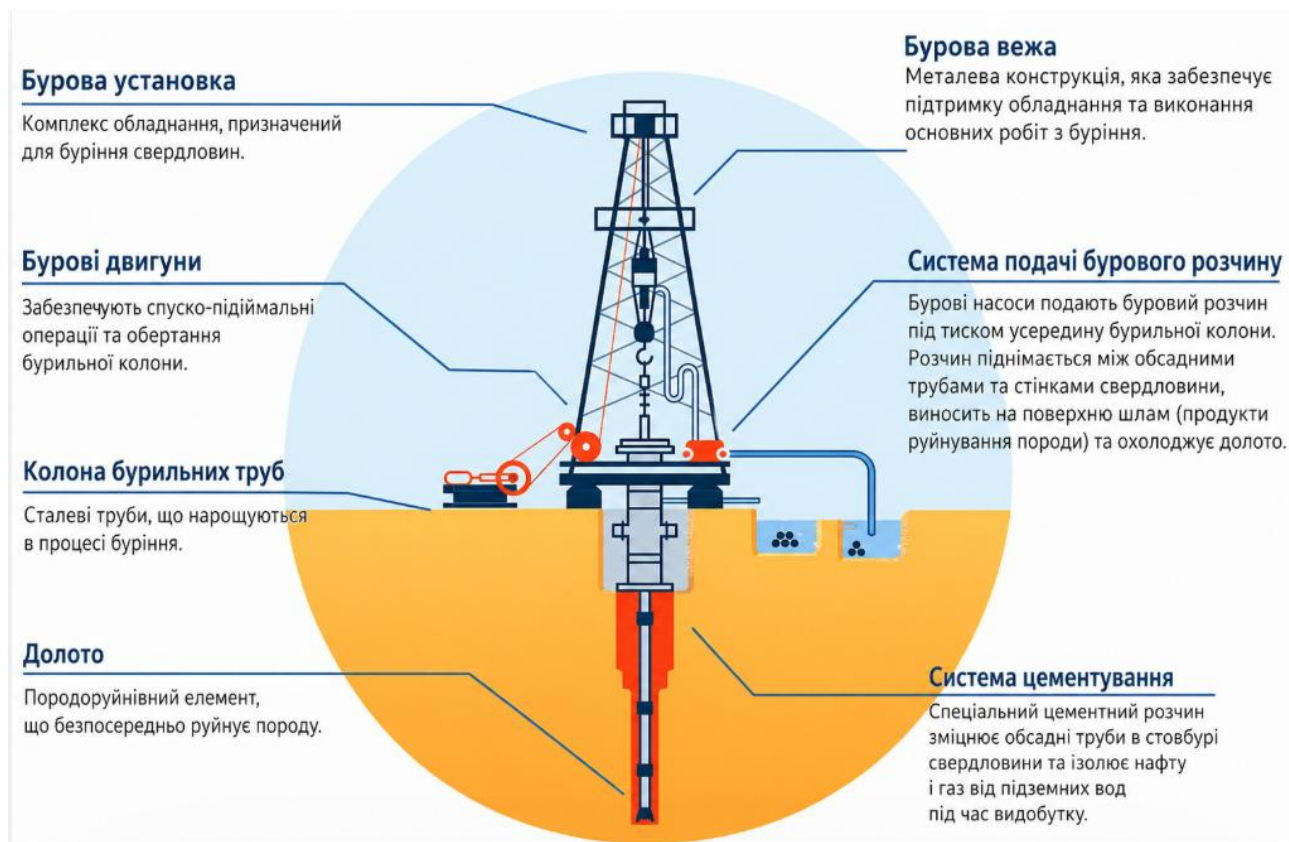


Рисунок 1.2 – Схема будови бурової установки та процесу буріння свердловини

Таким чином, типова бурова установка складається з таких основних підсистем:

- 1) Підйомна система: (вежа, талева система, лебідка) — забезпечує підйом і спуск бурової колони.
- 2) Обертальна система: (ротатор або top drive) — передає обертання долоту.
- 3) Циркуляційна система: (насоси, трубопроводи, ємності) — забезпечує подачу бурового розчину.
- 4) Буровий колон: (бурові труби, долото) — здійснює руйнування породи.
- 5) Система очищення розчину: (вібросита, дегазатори) — очищує буровий розчин від шламу.
- 6) Система автоматизації та контролю: (датчики, ПЛК, SCADA) — забезпечує вимірювання та регулювання параметрів.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Технологічно процес буріння реалізується як замкнений цикл: буровий розчин подається насосами через бурильну колону до долота, після чого разом зі шламом піднімається в затрубному просторі на поверхню, очищується та повторно використовується.

1.1.2 Основні параметри процесу буріння

Керування процесом буріння здійснюється через ключові технологічні параметри [3, 5, 6]:

- 1) Осьове навантаження на долото (WOB – Weight on Bit): визначає силу тиску долота на породу; впливає на швидкість механічного руйнування; надмірне значення призводить до зносу або аварій.
- 2) Частота обертання (RPM – Revolutions per Minute): характеризує швидкість обертання бурильної колони; впливає на ефективність руйнування породи; надмірні значення можуть викликати вібрації та резонанс.
- 3) Крутий момент (Torque): відображає опір породи руйнуванню; є індикатором навантаження на привід; різкі зміни можуть свідчити про ускладнення (прихвати, заклинювання).
- 4) Витрата бурового розчину (Flow Rate): забезпечує винесення шламу; охолоджує долото; підтримує гідростатичний тиск у свердловині.

Взаємозв'язок параметрів є нелінійним і залежить від геологічних умов, що ускладнює застосування класичних методів керування [5, 7].

Основні параметри процесу буріння є взаємопов'язаними: збільшення WOB → зростання *Torque* та швидкості буріння (*ROP*); підвищення *RPM* → зменшення необхідного WOB; зміна витрати розчину впливає на очищення вибою та стабільність процесу.

Ці залежності є нелінійними та залежать від геологічних умов, що ускладнює застосування класичних методів керування.

Всі вище описані параметри процесу буріння зведені в таблицю 1.1.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Таблиця 1.1 – Основні параметри процесу буріння

№	Параметр	Позначення	Опис	Одиниці вимірювання	Типові значення
1	Осьове навантаження на долото	WOB (F)	Сила тиску долота на породу, визначає інтенсивність руйнування	кН	50 – 300 кН
2	Частота обертання	RPM(n)	Швидкість обертання бурильної колони	об/хв	60 – 250 об/хв
3	Крутний момент	Torque (M)	Опір породи руйнуванню, навантаження на привід	кН·м	5 – 40 кН·м
4	Витрата бурового розчину	Flow Rate(Q)	Забезпечує винесення шламу та охолодження долота	л/с	20 – 60 л/с
5	Швидкість буріння	ROP(v)	Швидкість проходки свердловини	м/год	5 – 40 м/год
6	Тиск у свердловині	Well pressure (p)	Гідростатичний та динамічний тиск бурового розчину	МПа	5 – 30 МПа

Таким чином, процес буріння нафтогазових свердловин є складною динамічною системою з багатьма взаємопов'язаними параметрами та значним рівнем невизначеності. Основні технологічні параметри (WOB, RPM, Torque, витрата бурового розчину) визначають ефективність і безпечність процесу буріння. Нелінійний характер взаємодії параметрів обґрунтовує необхідність застосування інтелектуальних методів керування, зокрема систем на основі нечіткої логіки.

1.2 Аналіз факторів, що впливають на процес буріння

Процес буріння нафтогазових свердловин характеризується складною взаємодією природних та технічних факторів, що визначають ефективність, стабільність і безпечність виконання робіт. Врахування цих факторів є критично

важливим при синтезі систем автоматичного керування, особливо при застосуванні інтелектуальних методів, таких як нечітка логіка.

1.2.1 Геологічні умови

Геологічні умови є одним із ключових факторів, що визначають процес буріння, включаючи міцність порід, пластовий тиск і температуру [1, 3, 8]:

- 1) Тип і міцність гірських порід: відрізняються за твердістю, абразивністю та тріщинуватістю, що безпосередньо впливає на швидкість буріння (*ROP*) та знос долота.
- 2) Неоднорідність пластів: різка зміна літології призводить до нестабільності режимів буріння та потребує адаптивного керування.
- 3) Пластовий тиск і температура: впливають на вибір параметрів бурового розчину та режимів буріння.
- 4) Наявність аномальних зон: (зони поглинання, газонасичені пласти) створюють ризик аварійних ситуацій.

Таким чином, геологічні фактори формують зовнішні збурення, які важко точно передбачити, що ускладнює процес керування.

1.2.2 Властивості бурового розчину

Властивості бурового розчину суттєво впливають на ефективність транспортування шламу та стабільність свердловини [2, 6, 9]:

- 1) Густина(ρ): визначає гідростатичний тиск у свердловині та запобігає викидам.
- 2) В'язкість (μ): впливає на здатність транспортувати шлам на поверхню.
- 3) Реологічні властивості: (наприклад, модель Гершеля–Балклі) визначають поведінку потоку в різних умовах.
- 4) Теплоємність і теплопровідність: забезпечують охолодження долота.
- 5) Фільтраційні властивості: впливають на стійкість стінок свердловини.

Неправильний вибір параметрів бурового розчину може призвести до: поганого очищення вибою; підвищеного зносу обладнання; аварій (прихвати, обвали).

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

1.2.3 Механічні характеристики обладнання

Технічний стан та параметри бурового обладнання визначають можливості реалізації заданих режимів буріння [1]:

- 1) Жорсткість бурильної колони: впливає на передачу навантаження на долото.
- 2) Інерційність системи: визначає швидкість реакції на зміну керуючих впливів.
- 3) Характеристики приводу (двигуна): визначають діапазон обертів (RPM) і крутного моменту.
- 4) Знос долота: призводить до зниження ефективності буріння та зміни динаміки процесу.
- 5) Наявність вібрацій і резонансів: викликає нестабільність роботи системи та прискорений знос обладнання.

Ці фактори формують внутрішні обмеження системи керування.

1.2.4 Збурення та невизначеності

Процес буріння супроводжується значною кількістю збурень та невизначеностей [1, 2]:

- 1) Зовнішні збурення: зміна геологічних умов; коливання пластового тиску; зміна властивостей бурового розчину.
- 2) Внутрішні збурення: люфти та нелінійності механізмів; зміна параметрів обладнання в часі; похибки вимірювання датчиків.
- 3) Стохастичний характер процесу: випадкові зміни навантажень; шум у вимірювальних сигналах.
- 4) Невизначеність моделі: неточність математичного опису; спрощення при моделюванні.

У класичних системах керування (PID) ці фактори часто призводять до: перерегулювання; нестійкості; втрати якості керування.

Саме тому застосування нечіткої логіки дозволяє: враховувати нечіткість і невизначеність; адаптувати керування до змін умов; підвищити стійкість системи.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Таким чином, процес буріння визначається сукупністю геологічних, гідродинамічних та технічних факторів, які мають нелінійний і стохастичний характер. Значна кількість збурень і невизначеностей ускладнює застосування класичних методів керування. Це обґрунтовує необхідність використання інтелектуальних підходів, зокрема нечіткої логіки, для підвищення ефективності та надійності процесу буріння.

1.3 Огляд сучасних систем автоматичного керування бурінням

Сучасні системи автоматичного керування процесом буріння спрямовані на підвищення ефективності, безпеки та стабільності технологічного процесу. Вони забезпечують підтримання оптимальних режимів буріння шляхом регулювання основних параметрів: осьового навантаження на долото (WOB), частоти обертання (RPM), крутного моменту (Torque) та витрати бурового розчину. Залежно від принципів побудови та рівня інтелектуалізації системи керування поділяються на три основні класи: класичні, адаптивні та інтелектуальні.

1.3.1 Класичні системи (PID-регулятори)

Класичні системи автоматичного керування базуються на використанні пропорційно-інтегрально-диференціальних (PID) регуляторів, які широко застосовуються у промисловості завдяки своїй простоті реалізації та надійності [10, 11], однак їх ефективність обмежена у нелінійних системах [7, 12].

Основні принципи роботи: регулювання здійснюється на основі відхилення між заданим і фактичним значенням параметра; формування керуючого впливу включає три складові: пропорційну, інтегральну та диференціальну.

Переваги: простота реалізації; низькі обчислювальні витрати; надійність у стаціонарних умовах.

Недоліки: низька ефективність при нелінійності процесу; чутливість до збурень і шумів; складність налаштування при змінних умовах буріння; відсутність здатності до самонавчання.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

У процесі буріння PID-регулятори використовуються для стабілізації WOB, RPM та тиску бурового розчину, однак їх ефективність знижується при зміні геологічних умов.

1.3.2 Адаптивні системи керування

Адаптивні системи (АС) керування здатні автоматично змінювати свої параметри відповідно до змін характеристик об'єкта або зовнішніх умов. АС дозволяють враховувати змінність параметрів процесу [11, 13].

Основні підходи: самоналаштовувані регулятори (Self-Tuning Regulators); системи з еталонною моделлю (Model Reference Adaptive Control, MRAC); ідентифікаційно-адаптивні системи.

Переваги: можливість роботи в умовах змінних параметрів; підвищена точність керування; автоматичне налаштування параметрів регулятора.

Недоліки: складність реалізації; залежність від точності математичної моделі; можливість нестійкості при неправильній ідентифікації.

У бурінні адаптивні системи застосовуються для: регулювання швидкості буріння (ROP); компенсації зміни твердості породи; оптимізації режимів роботи обладнання.

1.3.3 Інтелектуальні системи керування (нейромережі, нечітка логіка)

Інтелектуальні системи керування (ІСК) (нейромережі, нечітка логіка) є перспективними для складних технологічних процесів [12, 14]. ІСК використовують методи штучного інтелекту для роботи в умовах невизначеності, нелінійності та неповної інформації.

Нейромережеві системи: базуються на штучних нейронних мережах, які здатні навчатися на основі експериментальних даних.

Переваги: здатність до апроксимації складних нелінійних залежностей; самонавчання; можливість прогнозування параметрів.

Недоліки: потреба у великому обсязі даних; складність навчання; низька інтерпретованість результатів.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

У бурінні нейромережі використовуються для: прогнозування швидкості буріння; виявлення аварійних ситуацій; оптимізації параметрів процесу.

1.3.4 Системи на основі нечіткої логіки

Нечіткі системи керування базуються на використанні нечітких множин і лінгвістичних правил типу «ЯКЩО–ТО».

Особливості: не потребують точної математичної моделі; використовують експертні знання; забезпечують роботу в умовах невизначеності.

Переваги: висока стійкість до збурень; ефективність при нелінійних залежностях; можливість гнучкого налаштування.

Недоліки: складність формування бази правил; залежність від експертних оцінок; необхідність оптимізації параметрів.

У процесі буріння нечіткі регулятори застосовуються для: керування WOB та RPM; стабілізації крутного моменту; зменшення вібрацій; підвищення ефективності буріння.

Отже, аналіз сучасних систем автоматичного керування бурінням показує, що класичні PID-регулятори є ефективними лише в умовах стабільних параметрів, тоді як адаптивні системи дозволяють частково враховувати змінність процесу. Найбільш перспективними є інтелектуальні системи, зокрема на основі нечіткої логіки, які забезпечують ефективне керування в умовах невизначеності, нелінійності та складної динаміки процесу буріння. Це обґрунтовує доцільність їх використання для удосконалення систем керування бурінням.

1.4 Аналіз недоліків існуючих систем керування

Сучасні системи керування характеризуються високою чутливістю до збурень та нестійкістю при зміні параметрів процесу [7, 10, 12].

Незважаючи на широке застосування автоматизованих систем керування у бурінні нафтогазових свердловин, їх ефективність часто обмежується складністю самого процесу. Буріння характеризується нелінійністю, змінністю параметрів та

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

значним рівнем невизначеності, що створює суттєві труднощі для традиційних підходів керування.

1.4.1 Нестійкість при зміні параметрів

Однією з ключових проблем існуючих систем керування є їхня нестійкість при зміні параметрів об'єкта [1]:

- 1) Зміна геологічних умов: перехід між різними типами порід призводить до різкої зміни навантажень, що впливає на динаміку системи.
- 2) Зміна характеристик бурового обладнання: знос долота, зміна жорсткості бурильної колони, люфти в механізмах змінюють параметри системи.
- 3) Нелінійність процесу: залежності між WOB, RPM і Torque є нелінійними та змінюються в процесі буріння.

У таких умовах: налаштований регулятор перестає відповідати реальному об'єкту; виникають коливання параметрів; система може втрачати стійкість.

1.4.2 Чутливість до збурень

Сучасні системи керування є чутливими до зовнішніх і внутрішніх збурень:

- 1) Зовнішні збурення: зміни пластового тиску; коливання властивостей бурового розчину; геологічна неоднорідність.
- 2) Внутрішні збурення: шум вимірювальних датчиків; вібрації бурильної колони; нестабільність роботи приводів.

Наслідки впливу збурень:

- збільшення перерегулювання;
- зростання часу встановлення;
- погіршення якості керування;
- ризик аварійних ситуацій (прихвати, перевантаження).

Особливо критично це проявляється у глибокому бурінні, де вплив збурень значно посилюється.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

1.4.3 Обмеженість класичних регуляторів

Класичні системи керування, зокрема PID-регулятори, мають ряд принципових обмежень [24]:

- 1) Лінійність підходу: PID-регулятори ефективні лише для лінійних або слабо нелінійних систем.
- 2) Фіксовані параметри: налаштовані коефіцієнти не змінюються автоматично при зміні умов.
- 3) Відсутність адаптації: регулятор не здатний самостійно враховувати нові режими роботи.
- 4) Залежність від точності налаштування: неправильне налаштування призводить до: нестійкості; коливань; втрати точності.
- 5) Обмежені можливості роботи з невизначеністю: класичні регулятори не враховують нечіткість і неповноту інформації.

1.4.4 Узагальнення проблем

Сукупність зазначених недоліків призводить до таких проблем у практиці буріння: нестабільність режимів буріння; зниження швидкості проходки (ROP); підвищений знос обладнання; збільшення ризику аварій; зниження економічної ефективності.

Таким чином, існуючі системи автоматичного керування бурінням мають суттєві обмеження, пов'язані з нестійкістю при зміні параметрів, високою чутливістю до збурень та неспроможністю класичних регуляторів ефективно працювати в умовах нелінійності та невизначеності. Це обґрунтовує необхідність переходу до більш досконалих методів керування, зокрема інтелектуальних систем на основі нечіткої логіки, які здатні адаптуватися до змін умов і забезпечувати високу якість керування.

1.5 Постановка задачі дослідження

Сучасний процес буріння нафтогазових свердловин характеризується складною динамікою, нелінійністю та значною кількістю невизначених факторів.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Аналіз, проведений у попередніх підрозділах, показав, що традиційні підходи до автоматичного керування не забезпечують необхідної якості регулювання в умовах змінних геологічних і технологічних параметрів. Це зумовлює необхідність розробки більш ефективних методів керування, здатних адаптуватися до невизначеностей і забезпечувати стабільну роботу системи.

1.5.1 Обґрунтування необхідності нечіткого керування

Застосування нечіткої логіки дозволяє врахувати невизначеність та нелінійність процесу буріння, що підвищує якість керування [12, 14, 15]. Її застосування в системах керування бурінням обґрунтовується такими особливостями процесу:

- Нелінійний характер об'єкта керування: взаємозв'язки між параметрами (WOB, RPM, Torque, ROP) є складними та змінними в часі.
- Наявність невизначеностей: геологічні умови, властивості порід та параметри бурового розчину не можуть бути точно описані математичною моделлю.
- Складність отримання точної моделі: побудова адекватної математичної моделі буріння потребує значних спрощень, що знижує точність керування.
- Необхідність врахування експертних знань: практичний досвід бурильників містить важливу інформацію, яку складно формалізувати класичними методами.
- Висока чутливість до збурень: нечіткі системи здатні ефективніше компенсувати вплив випадкових змін параметрів.

У зв'язку з цим нечітке керування дозволяє:

- формалізувати експертні знання у вигляді правил типу «ЯКЩО–ТО»;
- працювати без точної математичної моделі;
- підвищити стійкість та адаптивність системи;
- забезпечити більш якісне регулювання в умовах невизначеності.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

1.5.2 Формулювання задачі удосконалення системи керування

Метою даної бакалаврської роботи є підвищення ефективності та якості керування процесом буріння нафтогазових свердловин шляхом розробки та дослідження системи автоматичного керування на основі нечіткої логіки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Проаналізувати існуючі системи керування бурінням та визначити їх основні недоліки.
2. Розробити математичну модель процесу буріння як об'єкта автоматичного керування.
3. Визначити основні керовані параметри системи (WOB, RPM, Torque) та збурення.
4. Синтезувати нечіткий регулятор для керування процесом буріння: вибрати структуру регулятора; сформулювати функції належності; розробити базу нечітких правил.
5. Реалізувати модель системи керування у MATLAB/Simulink та провести її моделювання.
6. Провести порівняльний аналіз роботи нечіткого регулятора та класичного PID-регулятора.
7. Оцінити показники якості керування, зокрема: час встановлення; перерегулювання; стійкість системи; чутливість до збурень.

Таким чином постановка задачі дослідження базується на необхідності підвищення ефективності керування складним нелінійним процесом буріння. Застосування нечіткої логіки дозволяє врахувати невизначеність і змінність параметрів процесу, що робить її перспективним підходом для удосконалення систем автоматичного керування бурінням. Визначені задачі дослідження формують основу для подальшої розробки математичної моделі та синтезу системи керування.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Висновки до розділу

У першому розділі проведено комплексний аналіз процесу буріння нафтогазових свердловин як об'єкта автоматичного керування та сучасних підходів до його регулювання.

Встановлено, що процес буріння є складною нелінійною динамічною системою, на яку впливає значна кількість взаємопов'язаних факторів, зокрема геологічні умови, властивості бурового розчину та технічні характеристики обладнання. Основні технологічні параметри (осьове навантаження на долото, частота обертання, крутний момент, витрата бурового розчину) визначають ефективність і безпеку буріння та потребують постійного контролю і регулювання.

Аналіз існуючих систем автоматичного керування показав, що класичні PID-регулятори є ефективними лише в умовах відносної стабільності параметрів, тоді як адаптивні системи частково компенсують змінність процесу, але залишаються складними у реалізації. Водночас інтелектуальні системи керування, зокрема на основі нечіткої логіки, є найбільш перспективними для використання в умовах невизначеності та нелінійності.

Виявлено основні недоліки існуючих систем керування, серед яких: нестійкість при зміні параметрів об'єкта, висока чутливість до зовнішніх і внутрішніх збурень, а також обмеженість класичних регуляторів у складних умовах буріння. Це призводить до зниження якості керування, збільшення ризику аварійних ситуацій та зменшення ефективності процесу.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність застосування нечіткої логіки для удосконалення системи керування бурінням. Сформульовано мету та основні задачі дослідження, які передбачають розробку математичної моделі процесу, синтез нечіткого регулятора та дослідження його ефективності у порівнянні з класичними методами.

Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшого моделювання процесу буріння та розробки ефективної системи автоматичного керування на основі нечіткої логіки.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ

2.1 Фізична модель процесу буріння

Фізична модель процесу буріння описує основні закономірності взаємодії елементів бурової системи з гірською породою та буровим розчином [1-3]. Вона є основою для побудови математичної моделі та подальшого синтезу системи автоматичного керування. Процес буріння доцільно розглядати як сукупність трьох взаємопов'язаних підсистем: взаємодії долота з породою, динаміки бурильної колони та гідродинаміки бурового розчину. Такий підхід відповідає сучасним методам системного аналізу складних технологічних процесів [16].

2.1.1 Взаємодія долота з породою

Процес руйнування гірських порід визначається осьовим навантаженням, частотою обертання та властивостями породи [2, 17]. Основним робочим органом є долото, яке здійснює руйнування гірської породи під дією осьового навантаження та обертального руху.

Ключові особливості процесу:

- 1) Механізм руйнування породи, який залежить від типу долота (шарошкове, PDC) і властивостей породи: дроблення (для твердих порід); різання (для м'яких і середніх порід).
- 2) Основні фактори впливу: осьове навантаження (WOB); частота обертання (RPM); крутний момент (Torque); міцність породи.
- 3) Швидкість буріння (ROP), яка визначається як функція навантаження та швидкості обертання [3, 18]:

$$ROP = f(WOB, RPM, \text{властивості породи})$$

- 4) Нелінійність процесу: при збільшенні WOB швидкість буріння зростає лише до певного рівня, після чого ефективність знижується через перевантаження долота. Нелінійність процесу та насичення ефекту навантаження добре відомі в теорії буріння [2, 18].

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

- 5) Зворотний вплив породи: опір породи формує крутний момент і впливає на динаміку всієї системи.

2.1.2 Динаміка бурильної колони

Бурильна колона є розподіленою механічною системою з пружно-інерційними властивостями [19].

Основні характеристики:

- 1) Пружно-інерційні властивості: колона має розподілену масу; виникають коливання та деформації.
- 2) Типи коливань: поздовжні (вібрації по осі); крутильні (stick-slip ефект); поперечні (биття, вібрації).
- 3) Stick-slip ефект: періодичне залипання та різке прокручування долота, що призводить до: нерівномірного буріння; підвищеного зносу обладнання; коливань крутного моменту. Stick-slip ефект є одним із ключових джерел нестабільності та описується в роботах з динаміки буріння [19, 20].
- 4) Передача навантаження, а саме, частина енергії втрачається через: тертя; деформації; демпфування.
- 5) Інерційність системи – визначення затримки реакції на зміну керуючих впливів.

Таким чином, бурильна колона виступає як динамічна ланка, що істотно впливає на якість керування процесом.

2.1.3 Гідродинаміка бурового розчину

Буровий розчин забезпечує нормальне функціонування процесу буріння та виконує кілька критичних функцій. Гідродинамічні процеси визначаються витратою, в'язкістю та геометрією свердловини [21].

Основні функції:

- 1) Очищення вибою: винос шламу з зони руйнування.
- 2) Охолодження долота: запобігає перегріву інструменту.
- 3) Створення гідростатичного тиску: запобігає викидам пластових флюїдів.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

4) Стабілізація стінок свердловини

Основні параметри гідродинаміки: витрата розчину Q ; швидкість потоку; тиск у свердловині; густина та в'язкість розчину.

Режими течії: ламінарний; турбулентний; перехідний.

Тиск у системі визначається втратами [21, 22]:

$$\Delta P = f(Q, \mu, L, D)$$

де: Q – витрата; μ – в'язкість; L – довжина каналу; D – діаметр.

Особливості: при недостатній витраті $\rightarrow$ накопичення шламу; при надмірній витраті $\rightarrow$ ерозія обладнання; зміна властивостей розчину впливає на стабільність процесу.

Фізична модель буріння характеризується тісним взаємозв'язком підсистем: зміна WOB $\rightarrow$ впливає на Torque і ROP; зміна RPM $\rightarrow$ впливає на динаміку колони; зміна витрати розчину $\rightarrow$ впливає на очищення вибою та стабільність буріння. Ця взаємодія є нелінійною та змінною в часі.

Таким чином, фізична модель процесу буріння включає три основні взаємопов'язані складові: взаємодію долота з породою, динаміку бурильної колони та гідродинаміку бурового розчину. Кожна з цих підсистем має складний нелінійний характер і значно впливає на ефективність процесу буріння. Взаємозалежність параметрів та наявність коливальних процесів і збурень обумовлюють необхідність використання сучасних методів моделювання та інтелектуального керування.

2.2 Формування математичної моделі процесу буріння

Математична модель (ММ) процесу буріння формується на основі фізичних закономірностей, розглянутих у п. 2.1, та використовується для подальшого синтезу системи автоматичного керування. Модель повинна відображати динаміку взаємодії долота з породою, поведінку бурильної колони та вплив гідродинамічних процесів.

Математичне моделювання базується на використанні диференціальних рівнянь, що описують динаміку системи [16, 23].

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

2.2.1 Вхідні та вихідні змінні

Для побудови моделі визначимо основні змінні системи.

Вхідні змінні (керуючі впливи):

$u_1 = WOB$ – осьове навантаження на долото;

$u_2 = \omega$ – кутова швидкість обертання (RPM);

$u_3 = Q$ – витрата бурового розчину.

Збурення:

d_1 – зміна міцності породи;

d_2 – зміна властивостей бурового розчину;

d_3 – зовнішні механічні впливи.

Вихідні змінні:

$y_1 = ROP$ – швидкість буріння;

$y_2 = M$ – крутний момент;

$y_3 = P$ – тиск у свердловині.

2.2.2 Основні диференціальні рівняння

1. Динаміка обертального руху бурильної колони [19, 23]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{drv} - M_{bit} - B\omega \quad (2.1)$$

де:

J – момент інерції бурильної колони;

M_{drv} – момент приводу;

M_{bit} – момент опору на долоті;

B – коефіцієнт демпфування.

2. Модель взаємодії долота з породою [3, 18]

$$ROP = k_1 WOB + k_2 \omega - k_3 M_{bit} \quad (2.2)$$

де:

k_1, k_2, k_3 — емпіричні коефіцієнти.

3. Модель крутного моменту

$$M_{bit} = c_1 WOB + c_2 \omega + d_1$$

4. Гідродинаміка бурового розчину (тиск) [21]

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{T_p} (k_p Q - P) \quad (2.3)$$

де:

T_p – постійна часу системи;

k_p – коефіцієнт підсилення.

Об'єднавши рівняння (2.1; 2.2; 2.3), отримаємо математична модель процесу буріння у вигляді системи (2.4):

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_{drv} - M_{bit} - B_\omega) \\ ROP = k_1 WOB + k_2 \omega - k_3 M_{bit} \\ \frac{dP}{dt} = \frac{1}{T_p} (k_p Q - P) \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2.3 Лінеаризація моделі

Лінеаризація моделі методом розкладу в ряд Тейлора є стандартним підходом у теорії керування [23, 24]. Для застосування класичних методів керування модель необхідно лінеаризувати в околі робочої точки:

$$(WOB_0, \omega_0, Q_0)$$

Метод лінеаризації: розклад у ряд Тейлора; відкидання нелінійних членів вищого порядку.

Лінеаризована форма (відхилення):

Позначимо:

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0, \quad \Delta WOB = WOB - WOB_0$$

Тоді:

$$\Delta\dot{\omega} = a_1 \Delta\omega + a_2 \Delta WOB + a_3 \Delta M_{drv}$$

Аналогічно:

$$\Delta ROP = b_1 \Delta WOB + b_2 \Delta\omega$$

$$\Delta\dot{P} = c_1 \Delta Q - c_2 \Delta P$$

Отримана модель має такі властивості:

- є нелінійною у повній формі;
- після лінеаризації — лінійна система;

- враховує основні фізичні процеси;
- придатна для: аналізу стійкості; синтезу регуляторів; моделювання в MATLAB/Simulink.

Отже, сформовано математичну модель процесу буріння на основі фізичних закономірностей. Визначено вхідні, вихідні змінні та збурення системи. Побудовано систему диференціальних рівнянь, що описує динаміку бурильної колони, процес руйнування породи та гідродинаміку бурового розчину. Проведено лінеаризацію моделі, що дозволяє застосовувати класичні методи аналізу та синтезу систем керування. Отримана модель є основою для подальшого дослідження та розробки нечіткого регулятора.

2.3 Передавальні функції об'єкта керування

Передавальні функції широко застосовуються для аналізу динамічних систем [23, 25]. Для аналізу динамічних властивостей процесу буріння та подальшого синтезу регуляторів доцільно подати об'єкт керування у вигляді передавальних функцій. Такий підхід дозволяє спростити опис складного фізичного процесу та дослідити реакцію системи на зміну вхідних параметрів.

2.3.1 Канал WOB → ROP

Канал WOB → ROP описує вплив осьового навантаження на долото на швидкість проходки свердловини.

У спрощеному вигляді цей канал можна описати аперіодичною ланкою першого порядку [23]:

$$G_1(s) = \frac{ROP(s)}{WOB(s)} = \frac{K_1}{T_1 s + 1}$$

де:

K_1 – коефіцієнт підсилення каналу;

T_1 – стала часу реакції процесу буріння.

Для практичного моделювання приймаємо:

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$G_1(s) = \frac{0,8}{12s + 1}$$

Це означає, що при збільшенні осьового навантаження швидкість буріння зростає не миттєво, а з певною інерційністю.

2.3.2 Канал RPM → Torque

Канал RPM → Torque описує вплив частоти обертання бурильної колони на крутний момент.

Механічні системи часто описуються аперіодичними ланками першого порядку [19, 23]:

$$G_2(s) = \frac{Torque(s)}{RPM(s)} = \frac{K_2}{T_2s + 1}$$

де:

K_2 – коефіцієнт підсилення;

T_2 – стала часу механічної системи.

Передавальна функція в нашому випадку:

$$G_2(s) = \frac{1,5}{8s + 1}$$

Зростання частоти обертання призводить до зміни крутного моменту, однак реакція системи затримується через інерцію бурильної колони та приводу.

2.3.3 Моделювання інерційності системи

Інерційність процесу буріння зумовлена: масою та довжиною бурильної колони; пружністю механічних елементів; затримкою передачі навантаження до долота; інерцією приводу; зміною властивостей породи.

У загальному вигляді інерційність описується передавальною функцією першого порядку:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

де T визначає швидкість реакції системи: чим більше T , тим повільніше система реагує на зміну керуючого впливу.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Для більш реалістичного опису врахуємо транспортне запізнення [25]:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

де:

τ – час запізнення сигналу.

В нашому випадку:

$$G_3(s) = \frac{0,8}{12s + 1} e^{-2s}$$

Така модель краще відображає реальний процес буріння, у якому зміна керуючого впливу на поверхні проявляється на долоті із затримкою.

2.3.4 Узагальнена система передавальних функцій

Для дослідження процесу буріння використовуємо описані вище канали:

$$G_{WOB \rightarrow ROP}(s) = \frac{0,8}{12s + 1} e^{-2s} \quad (2.5)$$

$$G_{RPM \rightarrow Torque}(s) = \frac{1,5}{8s + 1} \quad (2.6)$$

$$G_{Q \rightarrow P}(s) = \frac{2,0}{10s + 1} \quad (2.7)$$

де:

$G_{Q \rightarrow P}(s)$ – канал впливу витрати бурового розчину на тиск у свердловині.

Таким чином, сформовано передавальні функції основних каналів керування процесом буріння. Канал $WOB \rightarrow ROP$ (2.5) описує зміну швидкості проходки залежно від осового навантаження, канал $RPM \rightarrow Torque$ (2.6) характеризує вплив частоти обертання на крутний момент, а канал $Q \rightarrow P$ (2.7) відображає гідродинамічну складову процесу. Урахування інерційності та транспортного запізнення дозволяє наблизити модель до реальних умов буріння та використати її для подальшого синтезу PID- і нечіткого регуляторів.

Для складніших моделей процес буріння описують системою кількох передавальних функцій:

$$ROP(s) = G_1(s) \cdot WOB(s) + G_2(s) \cdot RPM(s) + G_3(s) \cdot Q(s)$$

Тоді повна модель:

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$ROP(s) = \frac{0,8e^{-2s}}{10s + 1} WOB(s) + \frac{0,5}{6s + 1} RPM(s) + \frac{0,3}{4s + 1} Q(s)$$

Якщо звести систему до однієї еквівалентної передавальної функції (для однакових входів), то:

$$G_{eq}(s) = \frac{0,8e^{-2s}(6s + 1)(4s + 1) + 0,5(10s + 1)(4s + 1) + 0,3(10s + 1)(6s + 1)}{(10s + 1)(6s + 1)(4s + 1)}$$

Фінальна форма:

$$G_{eq}(s) = \frac{(19s^2 + 8s + 0,8)e^{-2s} + 38s^2 + 11,8s + 0,8}{240s^3 + 124s^2 + 20s + 1} \quad (2.8)$$

2.4 Часові та частотні характеристики процесу буріння

За передавальною функцією (2.8) будемо часові та частотні характеристики.

На рисунку 2.1 наведено перехідну характеристику еквівалентної передавальної функції процесу буріння нафтогазових свердловин. Графік демонструє аперіодичний характер реакції системи: вихідний параметр ROP плавно зростає від нульового значення та поступово виходить на усталений режим без коливань і перерегулювання. Усталене значення становить приблизно 1.6 відносних одиниць, а час встановлення системи складає близько 35 - 40) с.

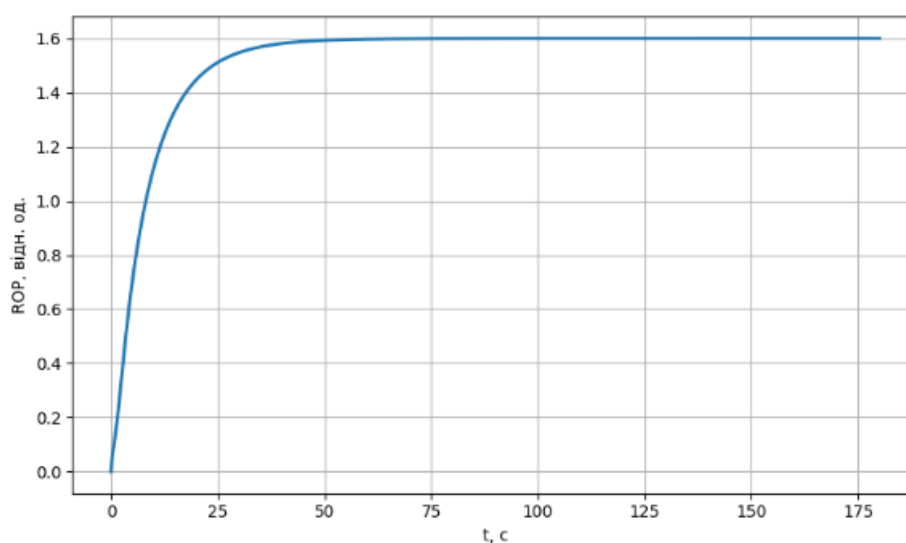


Рисунок 2.1 – Перехідна характеристика

Характер кривої свідчить про значне демпфування системи керування, що є типовим для процесів буріння через великі механічні інерції бурильної колони, гідравлічний опір бурового розчину та втрати енергії в елементах бурової установки. Відсутність коливань підтверджує стійкість системи та ефективність вибраних параметрів моделі.

Це означає, що зміна керуючого впливу (осьового навантаження, частоти обертання чи витрати бурового розчину) не викликає резонансних явищ, а реакція процесу є плавною та прогнозованою, що є важливою умовою для стабільного автоматичного керування бурінням.

На рисунку 2.2 наведено імпульсну характеристику еквівалентної передавальної функції (2.8) процесу буріння нафтогазових свердловин. На початковому етапі спостерігається різке зростання вихідного сигналу до максимального значення, після чого реакція швидко затухає та асимптотично прямує до нуля.

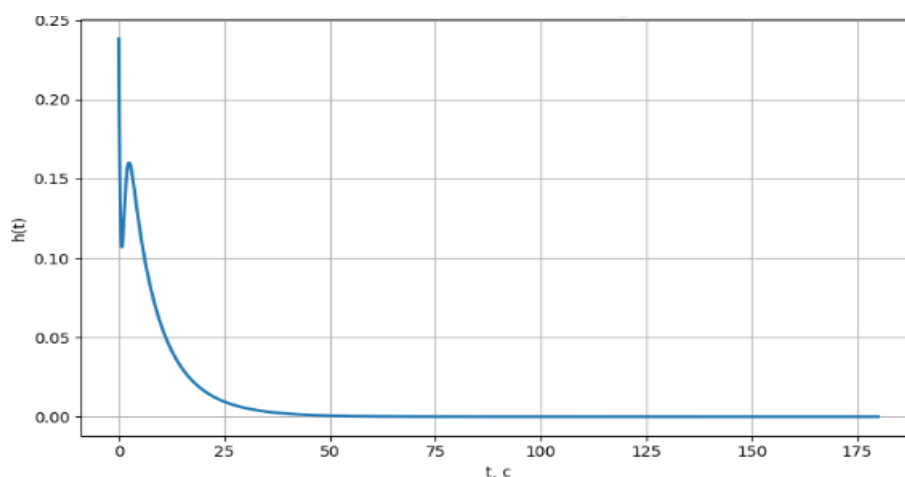


Рисунок 2.2 – Імпульсна характеристика

Форма характеристики свідчить про стійкість системи та наявність значного демпфування. Відсутність тривалих коливань після імпульсного впливу означає, що система не має виражених резонансних режимів та здатна ефективно пригнічувати короточасні збурення, які можуть виникати під час буріння внаслідок зміни структури породи, гідравлічних пульсацій або механічних вібрацій бурильної колони.

На рисунку 2.3 наведено логарифмічну амплітудно-частотну характеристику (ЛАЧХ) еквівалентної передавальної функції (2.8) процесу буріння нафтогазових свердловин. Графік відображає залежність коефіцієнта підсилення системи від кутової частоти ω у логарифмічному масштабі та дозволяє оцінити частотні властивості об'єкта керування.

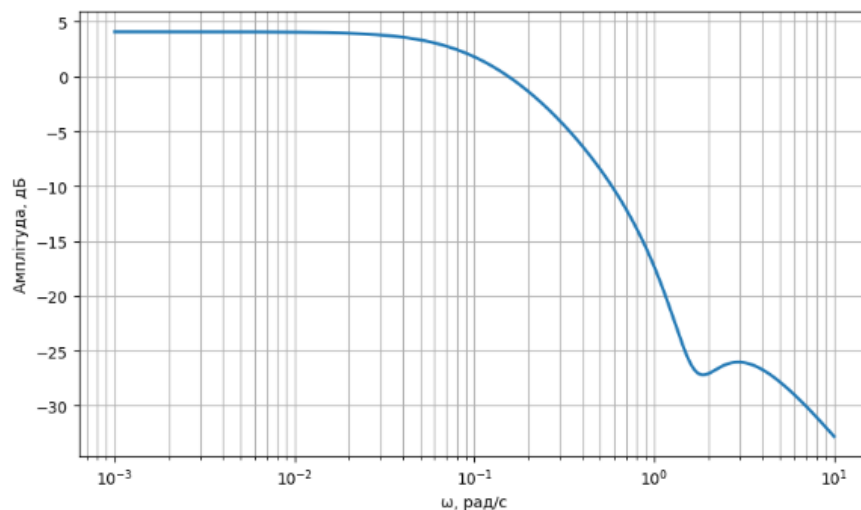


Рисунок 2.3 – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика

У області низьких частот амплітуда залишається майже сталою на рівні приблизно (4) дБ, що свідчить про ефективне проходження повільних змін керуючих сигналів через систему. Це означає, що система добре реагує на плавні зміни технологічних параметрів буріння, таких як осьове навантаження на долото, частота обертання або витрата бурового розчину.

Зі збільшенням частоти спостерігається спад амплітуди, що є характерною ознакою інерційної системи. Найбільш інтенсивне зниження підсилення починається в області приблизно:

$$\omega \approx 0,1 \div 1 \text{ рад/с.}$$

Це свідчить про те, що система пригнічує високочастотні збурення та шумові компоненти сигналу. Така властивість є важливою для процесу буріння, оскільки дозволяє зменшити вплив механічних вібрацій, гідравлічних пульсацій та випадкових коливань параметрів буріння.

Наявність локального перегину характеристики в області середніх частот може бути пов'язана з впливом транспортного запізнення та взаємодією кількох

динамічних ланок системи. При високих частотах амплітуда знижується до значень менше -30 дБ, що підтверджує сильне демпфування системи та її фільтрувальні властивості.

Така ЛАЧХ відповідає стійкій багатоланковій інерційній системі з низькочастотним характером роботи та значним ослабленням високочастотних сигналів.

На рисунку 2.4 наведено фазочастотну характеристику (ФЧХ) еквівалентної передавальної функції (2.8) процесу буріння нафтогазових свердловин. Графік відображає зміну фазового зсуву між вхідним та вихідним сигналами залежно від кутової частоти ω .

У області низьких частот фазовий зсув є близьким до нуля:

$$\varphi(\omega) \approx 0^\circ,$$

що свідчить про майже синфазну реакцію системи на повільні зміни керуючого сигналу. Це означає, що при низьких частотах система буріння практично без запізнення відтворює зміну технологічних параметрів.

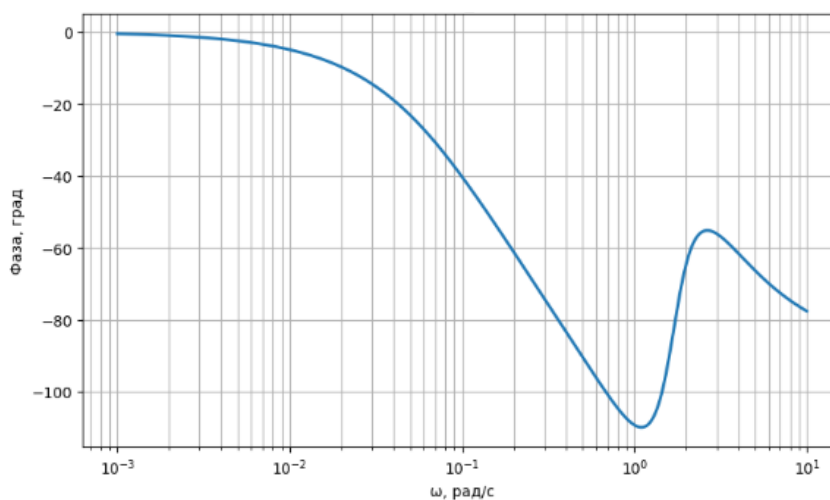


Рисунок 2.4 – Фазо - частотна характеристика

Із підвищенням частоти фазовий зсув поступово зменшується та набуває від'ємних значень, що є характерним для інерційних багатоланкових систем. У діапазоні середніх частот спостерігається інтенсивне зростання фазового відставання, яке досягає приблизно:

$$\varphi_{min} \approx -110^\circ.$$

Це пояснюється впливом транспортного запізнення та сукупної дії кількох інерційних ланок передавальної функції. У області частот близько 1-3 рад/с спостерігається локальне підвищення фази, що може бути пов'язано з взаємодією динамічних складових системи та апроксимацією запізнення методом Паде. Така поведінка є типовою для систем із транспортним запізненням та складною структурою полюсів і нулів.

На високих частотах фазовий зсув стабілізується на рівні близько -80° , що свідчить про значне демпфування високочастотних компонентів сигналу. Це означає, що система ефективно пригнічує швидкі коливання та випадкові збурення, які виникають під час буріння внаслідок механічних вібрацій, нестабільності породи або гідравлічних пульсацій.

Наведена ФЧХ підтверджує стійкість системи та її інерційний характер, що є характерним для автоматизованих систем керування процесом буріння нафтогазових свердловин.

2.5 Використання експериментальних даних

Для ідентифікації моделі процесу буріння сформуємо набір вхідних і вихідних сигналів.

До вхідних сигналів належать: осьове навантаження на долото WOB (рисунок 2.1); частота обертання RPM ; витрата бурового розчину Q .

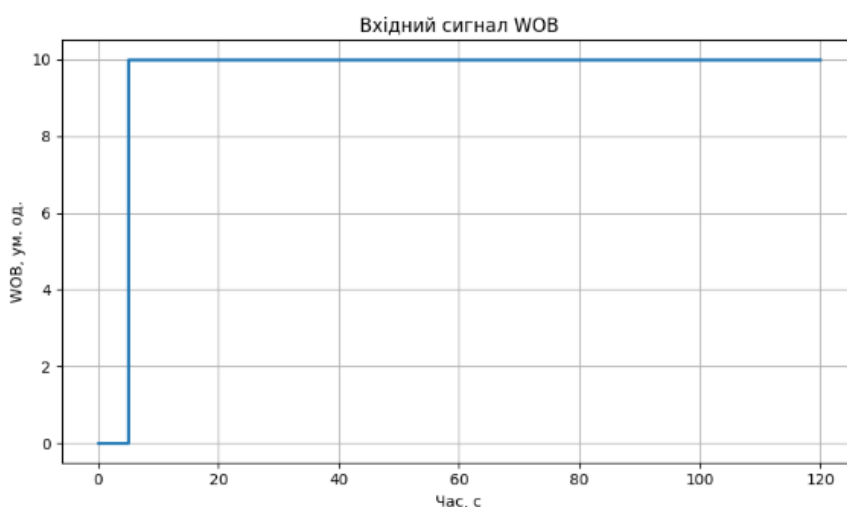


Рисунок 2.1 – Вхідний сигнал WOB – осьове навантаження на долото

До вихідних сигналів належать: швидкість проходки ROP (рисунок 2.2); крутний момент $Torque$; тиск у свердловині P .

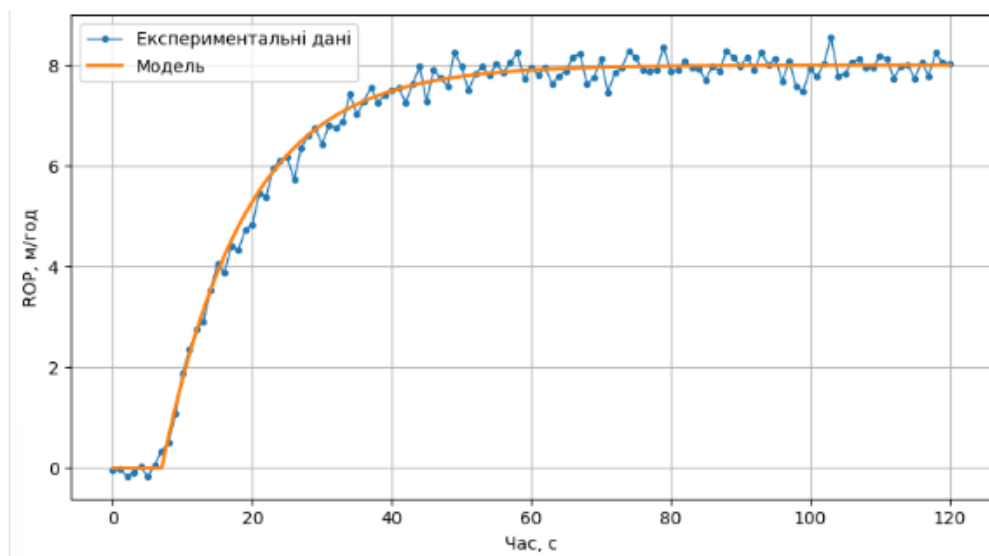


Рисунок 2.2 – Ідентифікація каналу $WOB \rightarrow ROP$ (осьове навантаження на долото $\rightarrow$ швидкість проходки)

Експериментальні дані можуть бути отримані з датчиків бурової установки або сформовані шляхом моделювання типових режимів роботи. Для підвищення точності ідентифікації дані попередньо обробляються: фільтруються від шумів, нормалізуються, видаляються аномальні значення та приводяться до єдиного інтервалу дискретизації.

2.5.1 Оцінка адекватності моделі

Після визначення параметрів моделі оцінюємо, наскільки добре вона описує реальний процес.

Основні критерії адекватності:

1. Середньоквадратична похибка (Root Mean Square Error – RMSE) (рисунок 2.3):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} = 0,2165$$

де:

y_i – експериментальне значення;

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$\hat{y}_i$ – значення моделі;

n – кількість вимірювань.

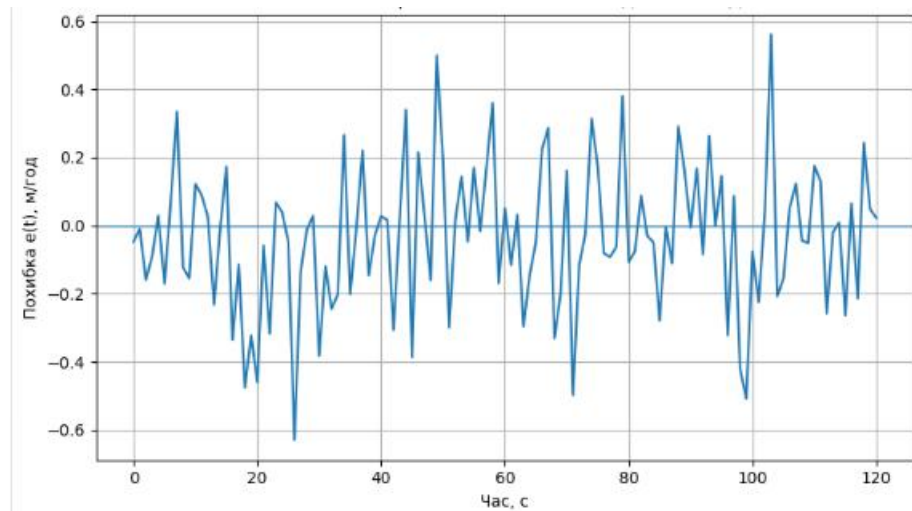


Рисунок 2.3 – Похибка між експериментальними та модельними даними

2. Середня абсолютна похибка (MAE — Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| = 0,1662$$

3. Коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} = 0,9916$$

де,

$\bar{y}$ – середнє значення експериментальних даних.

Значення R^2 , близьке до 1, свідчить про високу відповідність моделі експериментальним даним.

Висновки до розділу

У другому розділі роботи розроблено математичну модель процесу буріння як об'єкта автоматичного керування.

Сформовано фізичну модель процесу, яка враховує взаємодію долота з породою, динаміку бурильної колони та гідродинаміку бурового розчину. На її

основі визначено вхідні, вихідні змінні та збурення системи, а також побудовано систему диференціальних рівнянь, що описує динаміку процесу.

Отримано передавальні функції основних каналів керування, які дозволяють досліджувати поведінку об'єкта у частотній та часовій областях. Проведено ідентифікацію параметрів моделі з використанням експериментальних даних та методів оцінювання, що забезпечило відповідність моделі реальному процесу.

Аналіз математичної моделі процесу буріння показав, що об'єкт керування характеризується значною нелінійністю, інерційністю, наявністю транспортного запізнення та суттєвим впливом зовнішніх збурень. Крім того, параметри процесу змінюються залежно від геологічних умов, властивостей породи та режимів роботи бурильної системи, що ускладнює застосування класичних PID-регуляторів із фіксованими параметрами. Проведена ідентифікація підтвердила, що навіть за наявності адекватної математичної моделі залишаються похибки апроксимації, пов'язані з невизначеністю та стохастичним характером процесу буріння. У таких умовах традиційні методи керування не завжди забезпечують необхідну якість регулювання та стійкість системи. Саме тому для підвищення ефективності керування доцільним є застосування методів нечіткої логіки, які дозволяють враховувати невизначеність, нелінійність та експертні знання про процес буріння.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

3.1 Основи нечіткої логіки в системах керування

Нечітка логіка (НЛ) є одним із ефективних інструментів інтелектуального керування, який дозволяє працювати з невизначеністю, нечіткістю та нелінійністю об'єктів [12]. У задачах керування процесом буріння це особливо важливо, оскільки параметри системи змінюються в широких межах, а точна математична модель часто відсутня.

На відміну від класичної (бінарної) логіки, де змінні можуть набувати лише значень 0 або 1, у нечіткій логіці змінні можуть приймати будь-які значення в інтервалі $[0;1]$, що відображає ступінь належності до певної множини [12].

3.1.1 Поняття нечітких множин

Нечіткі множини (НМ) визначаються функціями належності $\mu_A(x)$, що описують ступінь належності елемента до множини [12, 15].

Нечітка множина — це сукупність елементів, для яких визначено ступінь належності до цієї множини.

$$\mu_A(x) \in [0,1]$$

де:

$\mu_A(x)$ — функція належності елемента x до нечіткої множини A .

Для процесу буріння, що досліджується, параметр WOB (осьове навантаження) може бути описаний нечіткими множинами:

- «низьке навантаження»
- «середнє навантаження»
- «високе навантаження»

При цьому одне й те саме значення може частково належати до кількох множин одночасно, що відображає реальні умови буріння.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

3.1.2 Функції належності

Функції належності (трикутні, трапецієподібні, гаусові) широко застосовуються в інженерних задачах керування [15, 28].

Розглянемо детальніше основні типи функцій належності:

1. Трикутна функція: проста у реалізації; часто використовується в практичних задачах.
2. Трапецієподібна функція: дозволяє задавати інтервали з повною належністю; більш гнучка у налаштуванні.
3. Гаусова функція: гладка; використовується для точних моделей.

В нашому випадку (для *WOB*):

- Low – низьке;
- Medium – середнє;
- High – високе.

Кожна з цих множин задається окремою функцією належності.

3.1.3 База нечітких правил

Нечіткі правила типу (БНП) IF–THEN є основою нечіткого керування та дозволяють формалізувати експертні знання [15, 28].

База правил є основою нечіткого регулятора та формується у вигляді логічних висловлювань типу:

IF (умова) THEN (дія)

Для процесу буріння створимо такі правил:

1. IF *WOB* = низьке AND *RPM* = високе
THEN збільшити навантаження
2. IF *Torque* = високе
THEN зменшити *RPM*
3. IF *ROP* = низька AND *WOB* = середнє
THEN збільшити *RPM*

Особливості бази правил: базується на експертних знаннях; дозволяє враховувати нелінійні залежності; може бути розширена або оптимізована.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Етапи роботи нечіткої системи:

1. Фазифікація: Перетворення точних значень у нечіткі.
2. Нечіткий висновок (inference): Обробка правил.
3. Дефазифікація: Перетворення результату у точне значення керуючого сигналу.

Переваги нечіткої логіки у керуванні бурінням: робота без точної математичної моделі; стійкість до збурень; можливість врахування досвіду оператора; ефективність у нелінійних системах.

Таким чином, нечітка логіка є ефективним інструментом для керування складними технологічними процесами, зокрема бурінням нафтогазових свердловин. Основними її складовими є нечіткі множини, функції належності та база правил, які дозволяють формалізувати експертні знання та враховувати невизначеність процесу. Це створює основу для розробки нечіткого регулятора, здатного забезпечити високу якість керування в умовах нелінійності та змінних параметрів.

3.2 Вибір структури нечіткого регулятора

Нечіткий регулятор часто будується за аналогією до ПД-регулятора (входи: помилка та її похідна) [28, 29].

Вибір структури нечіткого регулятора є ключовим етапом синтезу системи керування, оскільки визначає склад вхідних і вихідних змінних, тип нечіткого висновку та спосіб формування керуючого сигналу. Для процесу буріння доцільно використовувати структуру, аналогічну класичному ПД/ПД-регулятору, але реалізовану на основі нечіткої логіки.

3.2.1 Вхідні змінні регулятора

Як правило, для нечіткого регулятора використовуються дві основні вхідні змінні:

1. Помилка керування

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

де:

$r(t)$ – задане значення (наприклад, бажаний *ROP* або *Torque*);

$y(t)$ – поточне значення.

Фізичний зміст: показує відхилення системи від заданого режиму.

2. Похідна помилки

$$\dot{e}(t) = \frac{de(t)}{dt}$$

Фізичний зміст: характеризує швидкість зміни помилки (тенденцію процесу).

Інтерпретація для буріння:

- якщо $e > 0 \rightarrow$ параметр менший за заданий $\rightarrow$ потрібно збільшити вплив;
- якщо $\dot{e} > 0 \rightarrow$ система віддаляється від заданого значення $\rightarrow$ необхідна активніша дія;
- якщо $\dot{e} < 0 \rightarrow$ система наближається до цілі $\rightarrow$ дію слід зменшити.

3.2.2 Вихідні змінні регулятора

Вихід нечіткого регулятора — це керуючий вплив: $u(t)$

У задачі керування бурінням він може відповідати:

- зміні осьового навантаження ΔWOB ;
- зміні частоти обертання ΔRPM ;
- або комбінованому впливу.

Типовий варіант:

$$u(t) = \Delta WOB$$

тобто регулятор формує корекцію навантаження на долото.

Структура нечіткого регулятора

Нечіткий регулятор має три основні блоки:

1. Фазифікатор – перетворює точні значення ($e, \dot{e}$) у нечіткі множини;
2. База правил + механізм висновку – визначає логіку керування;
3. Дефазифікатор – формує точне значення керуючого сигналу.

3.2.3 Обґрунтування вибору типу регулятора: Mamdani чи Sugeno

1. Регулятор типу Mamdani

Регулятор типу Mamdani є найбільш поширеним у задачах керування завдяки своїй інтерпретованості [15, 28].

Особливості: вихід задається нечіткими множинами; використовується дефазифікація (часто метод центру ваги).

Переваги: зрозуміла інтерпретація; легко формуються правила; добре підходить для систем з експертними знаннями.

Недоліки: більша обчислювальна складність; повільніший у реальному часі.

2. Регулятор типу Sugeno

Sugeno-регулятори застосовуються для швидкодіючих систем і оптимізації [28].

Особливості: вихід є функцією (лінійною або сталою); не потребує класичної дефазифікації.

Переваги: висока швидкодія; зручний для оптимізації; добре підходить для реалізації в ПЛК.

Недоліки: складніша інтерпретація; менш інтуїтивний для експертного налаштування.

3. Обґрунтування вибору типу регулятора.

Для задачі керування процесом буріння доцільно обрати:

Нечіткий регулятор типу Mamdani, оскільки: процес буріння має значну невизначеність; доступні експертні знання операторів; важлива інтерпретованість правил; потрібна гнучкість у налаштуванні.

Для подальшого дослідження приймаємо таку структуру:

- Входи: помилка $e(t)$; похідна помилки $\dot{e}(t)$;
- Вихід: керуючий вплив $u(t) = \Delta WOB$;
- Тип: нечіткий регулятор Mamdani;
- Функція: аналог ПД-регулятора з нечіткою логікою.

Таким чином, обґрунтовано вибір структури нечіткого регулятора для керування процесом буріння. Визначено вхідні змінні (помилка та її похідна) і вихідний керуючий вплив. Проведено порівняння регуляторів типу Mamdani та Sugeno, за результатами якого обрано структуру Mamdani як більш придатну для умов невизначеності та використання експертних знань. Обрана структура є основою для подальшого синтезу функцій належності та бази нечітких правил.

3.3 Розробка функцій належності

Вибір функцій належності визначає якість нечіткого керування та стабільність системи [15, 28].

Функції належності є ключовим елементом нечіткого регулятора, оскільки саме вони визначають, як числові значення вхідних і вихідних змінних перетворюються у нечіткі множини. Від правильного вибору типу та параметрів функцій належності залежить якість керування процесом буріння.

3.3.1 Вибір типів функцій належності

Трикутні та трапецієподібні функції є найбільш поширеними через простоту реалізації [28]:

1. Трикутні функції: найпоширеніші; прості у реалізації; добре підходять для реального часу.
2. Трапецієподібні функції: забезпечують “плоску” зону повної належності; зручні для крайніх значень (мінімум/максимум).
3. Гаусові функції: гладкі; забезпечують плавні переходи; застосовуються для більш точних моделей.

Обраний варіант для роботи: комбінація *трикутних* і *трапецієподібних* функцій, оскільки: забезпечує баланс між точністю та простотою; легко реалізується в MATLAB/Simulink і ПЛК; достатньо точна для практичних задач буріння.

3.3.2 Налаштування параметрів функцій

Для кожної змінної визначається універсум дискурсу (діапазон значень) та набір нечітких множин.

1. Вхідна змінна: помилка e

Діапазон:

$$e \in [-1,1]$$

Нечіткі множини:

- **NB** (Negative Big) — велике від'ємне
- **NS** (Negative Small) — мале від'ємне
- **Z** (Zero) — нуль
- **PS** (Positive Small) — мале додатне
- **PB** (Positive Big) — велике додатне

2. Вхідна змінна: похідна помилки $\dot{e}$

Діапазон:

$$\dot{e} \in [-1,1]$$

Аналогічні множини:

NB, NS, Z, PS, PB

3. Вихідна змінна: керуючий вплив u

Діапазон:

$$u \in [-1,1]$$

Нечіткі множини:

- **NB** – різко зменшити
- **NS** – зменшити
- **Z** – без змін
- **PS** – збільшити
- **PB** – різко збільшити

Параметри для трикутних функцій наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри для трикутних функцій

Множина	Параметри (a, b, c)
NB	(-1, -1, -0.5)
NS	(-1, -0.5, 0)
Z	(-0.5, 0, 0.5)
PS	(0, 0.5, 1)
PB	(0.5, 1, 1)

3.3.3 Візуалізація функцій належності

На рисунку 3.1 зображено функції належності для входних змінних нечіткого регулятора. Вхідна змінна розбита на сім нечітких множин із перекривними трикутними та трапецієподібними функціями. Така структура забезпечує плавність і адаптивність керування.

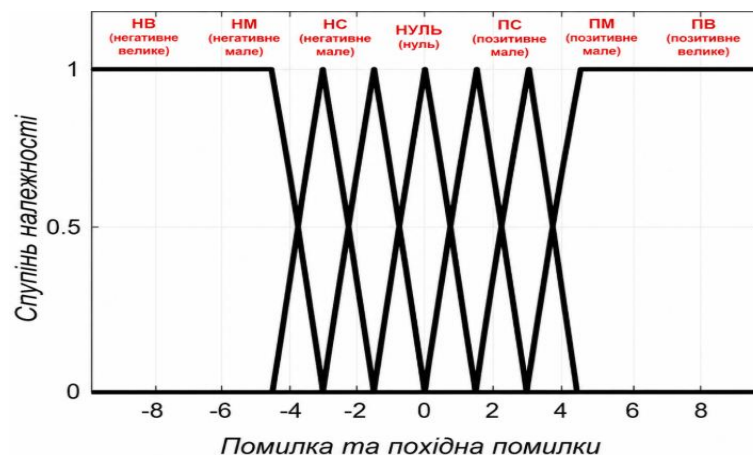


Рисунок 3.1 – Функції належності входних змінних

На рисунку 3.2 зображено функції належності нечіткої змінної, задані трикутними та трапецієподібними функціями. Змінна поділена на п'ять нечітких множин із перекриванням, що забезпечує плавність переходів і ефективність нечіткого керування.

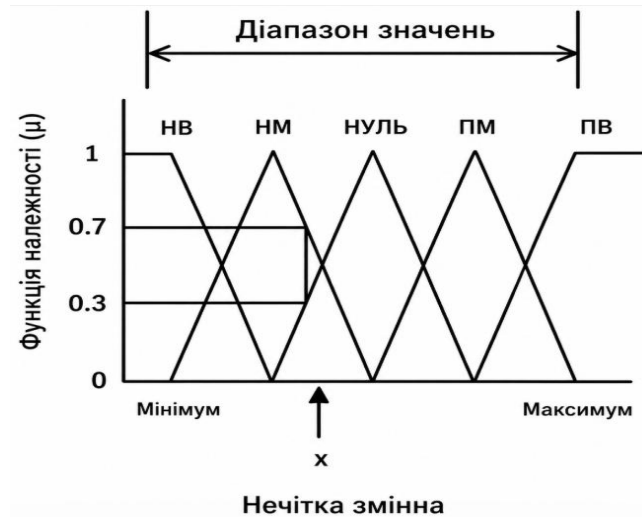


Рисунок 3.2 – Функції належності нечіткої змінної в заданому діапазоні значень

На рисунку 3.3 представлено структурну схему нечіткого логічного регулятора та його інтеграцію в систему автоматичного керування.

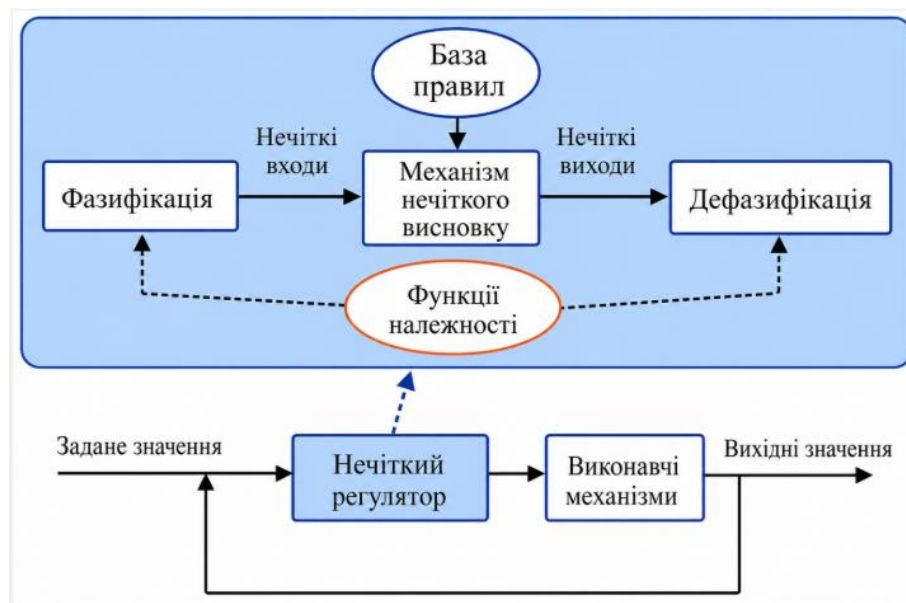


Рисунок 3.3 – Структурна схема нечіткого логічного регулятора в системі автоматичного керування

Регулятор включає блоки фазифікації, нечіткого висновку та дефазифікації, а також базу правил і функції належності. Керуючий сигнал формується на основі нечітких входніх даних і подається на виконавчі механізми, забезпечуючи адаптивне керування об'єктом у замкненому контурі.

Таким чином, розроблено функції належності для нечіткого регулятора процесу буріння. Обрано трикутні та трапецієподібні функції як оптимальні за

критеріями простоти та ефективності. Визначено діапазони змінних та параметри нечітких множин для вхідних і вихідних сигналів. Візуалізація функцій належності показує їх перекривний характер, що забезпечує плавність керування. Отримані функції є основою для формування бази нечітких правил у наступному підрозділі.

3.4 Формування бази нечітких правил

База нечітких правил є центральним елементом нечіткого регулятора, оскільки саме вона визначає логіку керування процесом буріння. База правил формується на основі експертних знань і аналізу процесу [7, 15].

3.4.1 Логічні правила керування

Нечіткі правила задаються у вигляді:

IF THEN (керуюча дія)

Для обраної структури регулятора (входи: помилка e , похідна помилки $\dot{e}$; вихід: $u = \Delta WOB$) правила формуються таким чином.

Правила для процесу буріння:

1. IF $e = NB$ AND $\dot{e} = NB \rightarrow THEN u = NB$
2. IF $e = NB$ AND $\dot{e} = Z \rightarrow THEN u = NS$
3. IF $e = NB$ AND $\dot{e} = PB \rightarrow THEN u = Z$
4. IF $e = Z$ AND $\dot{e} = Z \rightarrow THEN u = Z$
5. IF $e = PB$ AND $\dot{e} = NB \rightarrow THEN u = PS$
6. IF $e = PB$ AND $\dot{e} = Z \rightarrow THEN u = PB$
7. IF $e = PB$ AND $\dot{e} = PB \rightarrow THEN u = PB$

Фізичний зміст правил:

- якщо помилка велика $\rightarrow$ потрібен сильний керуючий вплив;
- якщо система наближається до цілі $\rightarrow$ вплив зменшується;
- якщо система нестабільна $\rightarrow$ вводиться демпфування.

3.4.2 Побудова таблиці правил

Для системи з 5 нечіткими множинами (NB, NS, Z, PS, PB) будується матриця 5×5. В таблиці 3.2 наведені нечіткі правила, як матриця.

Таблиця 3.2 – Таблиця правил

e \ è	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	Z	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NS	NS	Z	PS	PS
PS	Z	PS	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

Інтерпретація таблиці:

- рядки відповідають значенню помилки e ;
- стовпці — похідній помилки $\dot{e}$;
- комірки — керуючому впливу u .

3.4.3 Оптимізація бази правил

Початкова база правил формується експертно, але потребує оптимізації для підвищення якості керування. Оптимізація бази правил може здійснюватися за допомогою алгоритмів оптимізації та нейро-нечітких систем [28, 29].

Методи оптимізації:

1. Експертне налаштування: корекція правил на основі аналізу перехідних процесів; врахування практичного досвіду буріння.
2. Параметрична оптимізація: зміна функцій належності; корекція вагових коефіцієнтів правил.
3. Алгоритмічна оптимізація: генетичні алгоритми; метод градієнтного спуску; нейро-нечіткі системи (ANFIS).

Критерії оптимізації: мінімізація часу встановлення; зменшення перерегулювання; підвищення стійкості; зменшення впливу збурень.

Особливості бази правил для буріння: враховує нелінійність процесу; забезпечує плавну зміну керуючого впливу; адаптується до зміни умов буріння; дозволяє врахувати експертні знання оператора.

Таким чином, сформовано базу нечітких правил для регулятора процесу буріння. Розроблено логічні правила керування та побудовано таблицю правил, що описує взаємозв'язок між вхідними змінними та керуючим впливом. Проведено аналіз методів оптимізації бази правил, що дозволяє підвищити якість керування. Отримана база правил є основою для реалізації нечіткого регулятора та подальшого моделювання системи.

3.5 Синтез структури системи керування

Синтез структури системи автоматичного керування (САК) процесом буріння полягає у формуванні замкненого контуру керування, виборі місця включення нечіткого регулятора та узгодженні всіх функціональних блоків. Розроблена система повинна забезпечувати стабільне підтримання технологічних параметрів (ROP, Torque) при змінних умовах буріння.

3.5.1 Структурна схема САК

Структурна схема системи автоматичного керування процесом буріння із застосуванням нечіткого логічного регулятора (НЛР) зображена на рисунку 3.4. Система реалізує принцип замкненого контуру керування, у якому фактичне значення вихідного параметра безперервно порівнюється із заданим значенням, а керуючий вплив формується за допомогою алгоритмів нечіткої логіки.

Основними елементами системи є:

- Задане значення — необхідний режим роботи технологічного процесу (наприклад, заданий тиск, температура, швидкість буріння або навантаження на долото).
- Суматор виконує порівняння заданого та фактичного значень параметра. На його виході формується сигнал помилки, який характеризує відхилення процесу від необхідного режиму.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

- Нечіткий логічний регулятор (НЛР) є центральним елементом системи керування. Його робота базується не на точних математичних залежностях, а на правилах нечіткої логіки, що дозволяє ефективно керувати нелінійними та невизначеними процесами.

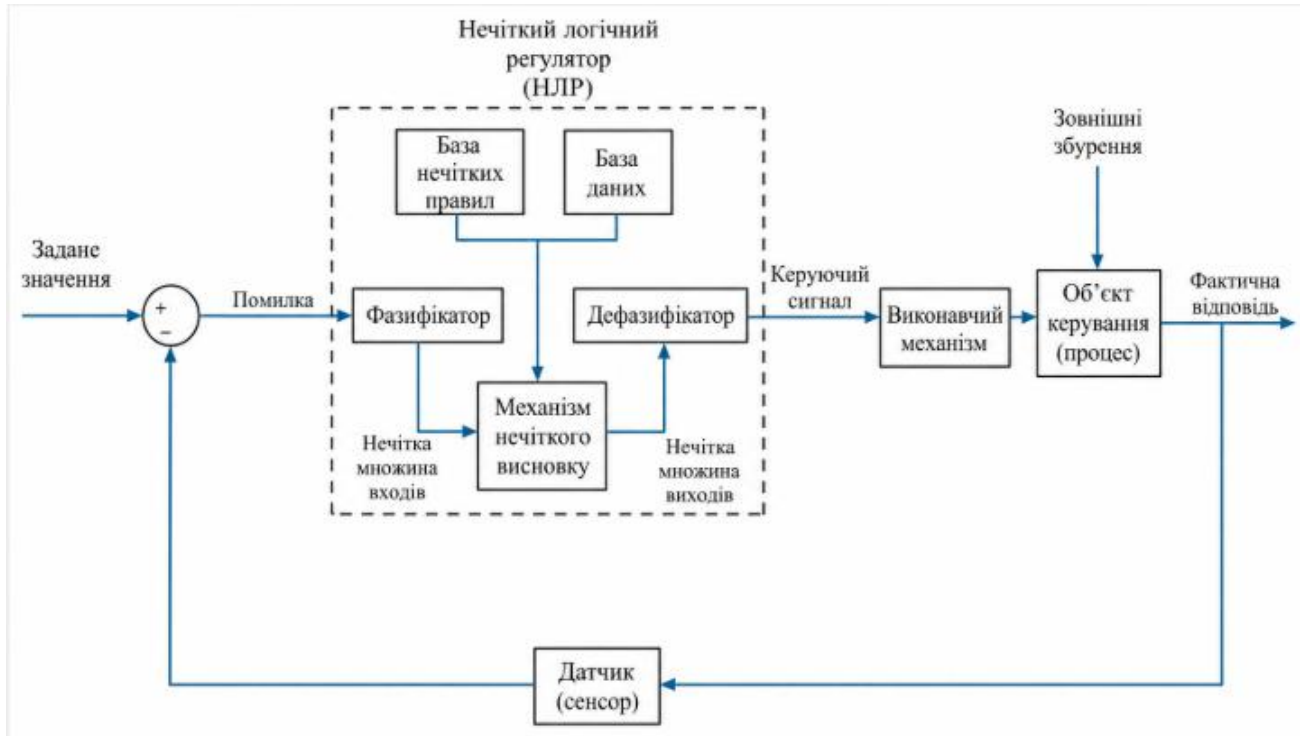


Рисунок 3.4 – Структурна схема САК з нечітким регулятором

До складу НЛР входять:

1. Фазифікатор — перетворює чіткі числові значення помилки у нечіткі множини. На цьому етапі визначається ступінь належності сигналу до лінгвістичних термів, наприклад: «мала помилка», «середня помилка», «велика помилка».
2. База нечітких правил — містить набір правил типу:
 - Якщо помилка велика і швидкість її зміни висока, то керуючий сигнал збільшити.
 Саме ці правила формують логіку прийняття рішень регулятором.
3. База даних — містить функції належності та параметри нечітких множин, які використовуються під час обробки сигналів.
4. Механізм нечіткого висновку — аналізує активні правила та формує нечітку множину вихідного сигналу відповідно до поточного стану системи.

5. Дефазифікатор — перетворює нечіткий вихідний сигнал у конкретне числове значення керуючого впливу, придатне для подачі на виконавчий механізм.
- Виконавчий механізм реалізує сформований керуючий сигнал шляхом зміни параметрів технологічного обладнання (наприклад, зміни швидкості обертання приводу, положення клапана або подачі бурового розчину).
 - Об'єкт керування (процес) — технологічний процес буріння, параметри якого необхідно стабілізувати або оптимізувати.
 - Зовнішні збурення впливають на процес та можуть викликати відхилення режиму роботи. Для процесу буріння це можуть бути зміни геологічних умов, коливання навантаження, зміна властивостей бурового розчину тощо.
 - Датчик (сенсор) вимірює фактичне значення контрольованого параметра та передає його у систему зворотного зв'язку.

Система працює за принципом безперервного коригування керуючого впливу залежно від поточного стану процесу. Використання нечіткої логіки забезпечує підвищення стійкості, адаптивності та якості керування у складних нелінійних умовах, де класичні ПІД-регулятори можуть працювати недостатньо ефективно. Особливо ефективним такий підхід є для автоматизації процесу буріння нафтогазових свердловин, де параметри процесу мають значну невизначеність і змінюються у реальному часі.

3.5.2 Інтеграція нечіткого регулятора

Нечіткий регулятор інтегрується в замкнений контур керування замість або разом із класичним регулятором.

Основні варіанти інтеграції:

1. Пряма заміна PID-регулятора: нечіткий регулятор повністю замінює PID; використовується структура:

$$u = f(e, \dot{e})$$

2. Гібридна система (Fuzzy + PID): нечітка логіка використовується для налаштування PID; або додається як коригуючий блок.

3. Каскадна структура: нечіткий регулятор — зовнішній контур; PID — внутрішній контур.

Обраний варіант у роботі: нечіткий регулятор як основний керуючий блок.

Причини: краща робота при нелінійності; стійкість до збурень; можливість врахування експертних правил.

3.5.3 Порівняння з PID-регулятором

Порівняння з PID-регулятором показує переваги нечіткої логіки при роботі в умовах невизначеності [7, 29].

Використання нечіткого регулятора дозволяє: зменшити перерегулювання; скоротити час встановлення; підвищити стійкість системи; зменшити вплив збурень; забезпечити плавність керування.

Порівняння нечіткого регулятора з PID-регулятором наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння регуляторів

Критерій	PID-регулятор	Нечіткий регулятор
Тип моделі	Лінійна	Нелінійна
Адаптація	Відсутня	Часткова (через правила)
Стійкість до збурень	Низька	Висока
Налаштування	Складне при змінних умовах	Гнучке
Робота без моделі	Ні	Так
Інтерпретованість	Висока	Висока (Mamdani)
Швидкодія	Висока	Середня

Особливості системи керування бурінням: багатоканальність (*WOB, RPM, Torque*); нелінійність і змінність параметрів; наявність затримок; необхідність роботи в реальному часі. Нечітка логіка дозволяє ефективно врахувати ці особливості.

Таким чином, синтезовано структуру системи автоматичного керування процесом буріння з використанням нечіткого регулятора. Розроблено структурну схему замкненого контуру керування та обґрунтовано інтеграцію нечіткого регулятора як основного елемента системи. Проведено порівняння з PID-регулятором, яке показало переваги нечіткої логіки у задачах керування складними нелінійними процесами. Отримана структура є основою для подальшого моделювання та дослідження системи у середовищі MATLAB/Simulink.

Висновки до розділу

Розроблено та обґрунтовано систему автоматичного керування процесом буріння на основі нечіткої логіки.

Розглянуто теоретичні основи нечіткої логіки, зокрема поняття нечітких множин, функцій належності та бази правил, що дозволяють формалізувати експертні знання та працювати в умовах невизначеності. Встановлено, що застосування нечіткої логіки є доцільним для керування процесом буріння, який характеризується нелінійністю та змінністю параметрів.

Обґрунтовано вибір структури нечіткого регулятора типу Mamdani з двома вхідними змінними (помилка та похідна помилки) і одним виходом (керуючий вплив). Така структура є аналогом класичного ПД-регулятора, але забезпечує більшу гнучкість і адаптивність.

Розроблено функції належності для вхідних і вихідних змінних, які представлені трикутними та трапецієподібними функціями з перекривними областями. Це забезпечує плавність переходів між режимами керування та підвищує чутливість системи.

Сформовано базу нечітких правил у вигляді логічних висловлювань типу «ЯКЩО–ТО» та побудовано таблицю правил, яка визначає взаємозв'язок між вхідними змінними і керуючим впливом. Проведено аналіз методів оптимізації бази правил, що дозволяє підвищити ефективність роботи регулятора.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Синтезовано структуру системи автоматичного керування з інтеграцією нечіткого регулятора у замкнений контур. Показано, що така система має переваги порівняно з класичними PID-регуляторами, зокрема в умовах наявності збурень, нелінійності та невизначеності.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

4.1 Побудова моделі в MATLAB/Simulink

Побудова моделі системи автоматичного керування процесом буріння в середовищі MATLAB / Simulink є важливим етапом дослідження, що дозволяє перевірити ефективність розробленого нечіткого регулятора, оцінити динамічні характеристики системи та провести порівняння з класичними методами керування [15, 30].

Застосування нечіткого регулятора в середовищі Simulink дозволяє реалізувати інтелектуальні методи керування та оцінити їх ефективність у порівнянні з класичними алгоритмами [15, 28].

На рисунку 4.1 представлено модель системи керування технологічним процесом буріння, реалізовану в середовищі MATLAB/Simulink із використанням нечіткого логічного регулятора.

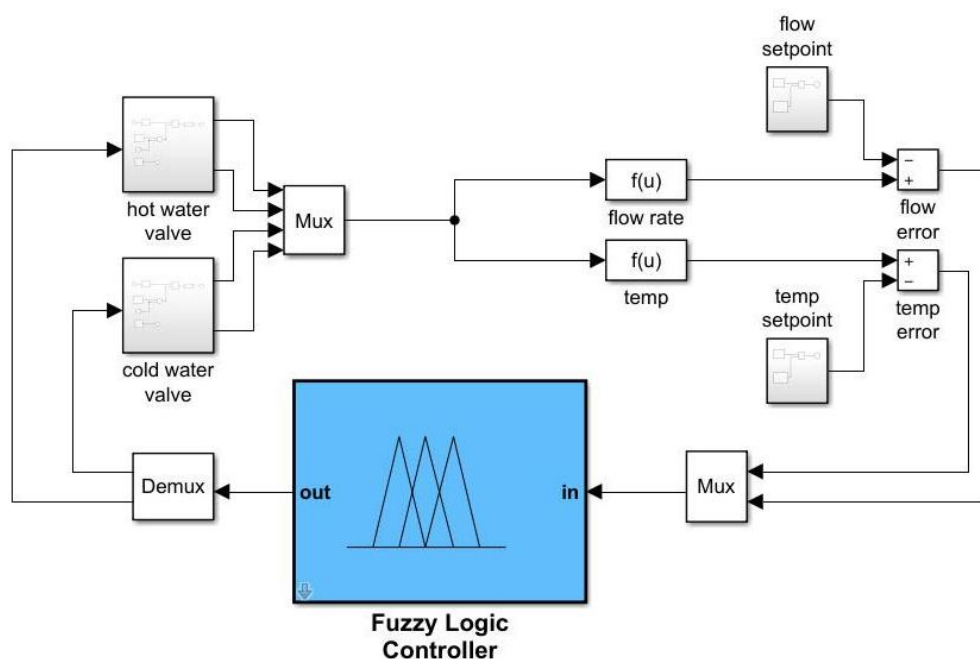


Рисунок 4.1 – Simulink-модель системи керування процесом буріння з нечітким регулятором

У запропонованій моделі нечіткий регулятор формує керуючі впливи для зміни *осьового навантаження на долото WOB* та *частоти обертання бурильної*

колони *RPM*. На входи регулятора подаються дві помилки: відхилення фактичної швидкості буріння *ROP* від заданого значення та відхилення крутного моменту *Torque* від допустимого рівня.

Об'єкт керування описує процес буріння, де вхідними сигналами є *WOB* та *RPM*, а вихідними — *ROP* і *Torque*. Блоки передавальних функцій моделюють динаміку каналів *WOB* → *ROP* та *RPM* → *Torque* [10, 30]. Отримані вихідні сигнали порівнюються із заданими значеннями, після чого помилки знову надходять на нечіткий регулятор.

На рисунку 4.2 представлено Simulink-модель системи автоматичного керування процесом буріння з використанням нечіткого логічного регулятора та можливістю порівняння з класичним ПІД-регулятором.

Система реалізує замкнений контур керування за двома основними параметрами: швидкістю буріння (*ROP*) та крутним моментом (*Torque*).

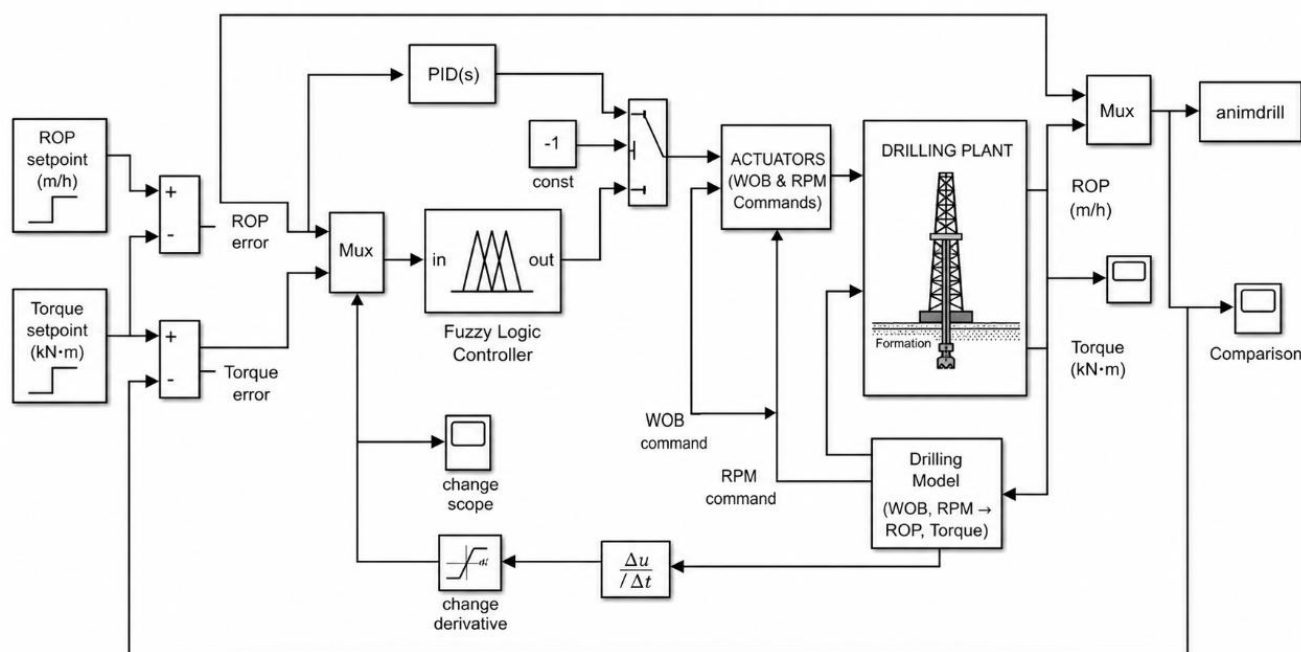


Рисунок 4.2 – Simulink-модель системи нечіткого керування процесом буріння за параметрами *WOB*, *RPM* та *ROP*

Вхідними сигналами є задані значення швидкості проходки (*ROP setpoint*) та крутного моменту (*Torque setpoint*). Ці сигнали порівнюються з фактичними значеннями, у результаті чого формуються сигнали помилки: *ROP error* та *Torque error*.

Далі помилки об'єднуються за допомогою блоку Mux і подаються на нечіткий логічний регулятор (Fuzzy Logic Controller), який формує керуючі впливи відповідно до заданих функцій належності та бази правил. Паралельно сигнал помилки може оброблятися класичним PID-регулятором, що дозволяє виконувати порівняльний аналіз ефективності двох методів керування.

Блок перемикавання забезпечує вибір між виходами ПІД-регулятора та нечіткого регулятора. Обраний керуючий сигнал надходить до блоку виконавчих механізмів (ACTUATORS), який формує команди для зміни осьового навантаження на долото (WOB command) та частоти обертання бурильної колони (RPM command).

Об'єкт керування (DRILLING PLANT) представляє фізичний процес буріння свердловини. Для моделювання його динаміки використовується блок Drilling Model, який описує залежність вихідних параметрів (ROP) та (Torque) від вхідних впливів (WOB) та (RPM).

Зміна керуючого впливу аналізується за допомогою блоку обчислення похідної ($\Delta u / \Delta t$), що дозволяє врахувати динамічні властивості системи та забезпечити стабільність керування.

Вихідні параметри процесу (ROP і Torque) подаються на блоки візуалізації (Score, animdrill) та об'єднуються через Mux для подальшого аналізу. Блок Comparison використовується для оцінки точності керування шляхом порівняння заданих і фактичних значень.

Система працює у замкненому контурі, де вихідні сигнали через зворотний зв'язок впливають на формування нових керуючих дій.

Запропонована модель дозволяє адаптивно керувати процесом буріння за умов невизначеності геологічного середовища, що забезпечує підвищення ефективності проходки та зменшення динамічних навантажень на обладнання.

4.2 Результати моделювання системи керування процесом буріння

Моделювання систем автоматичного керування дозволяє дослідити перехідні процеси та оцінити якість керування за різними критеріями [10, 30].

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Моделювання виконано в середовищі MATLAB / Simulink на основі розробленої структурної схеми системи керування (рис.4.2). Як об'єкт керування використано модель процесу буріння, що описує залежність швидкості буріння (ROP) та крутного моменту (Torque) від керуючих впливів – осьового навантаження (WOB) та частоти обертання (RPM).

4.2.1 Умови моделювання

Застосування інерційних ланок першого порядку є типовим підходом при моделюванні технологічних процесів [10].

Для проведення дослідження були задані такі умови:

- задане значення швидкості буріння: $ROP_{ref} = 1$ м/год;
- задане значення крутного моменту: $Torque_{ref} = 0,7$ кН·м;
- початкові значення параметрів — нульові;
- тривалість моделювання — 100 с;
- у системі враховано динаміку об'єкта у вигляді інерційних ланок першого порядку;
- для нечіткого регулятора використано функції належності з перекривними областями та базу правил, сформовану на основі експертних знань.

Таким чином, розроблено структуру моделі системи керування процесом буріння в середовищі MATLAB/Simulink. Визначено основні функціональні блоки моделі та їх взаємозв'язки. Виконано налаштування параметрів об'єкта та нечіткого регулятора. Отримана модель є основою для подальшого дослідження динамічних характеристик системи та оцінки ефективності нечіткого керування.

4.2.2 Аналіз перехідних процесів

Перехідні характеристики є основним інструментом оцінки динаміки системи керування [7, 10].

1) Швидкість буріння (ROP)

Результати моделювання показують, що при використанні нечіткого регулятора система забезпечує швидкий вихід швидкості буріння на задане

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

значення. Перехідний процес характеризується плавною динамікою без значного перерегулювання (Рисунок 4.3).

У випадку використання PID-регулятора спостерігається більший час встановлення та наявність коливань у початковий момент часу. Це пояснюється чутливістю PID-регулятора до зміни параметрів об'єкта та збурень.

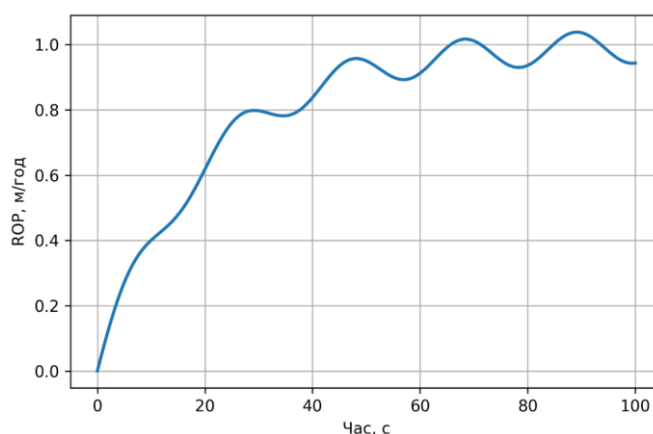


Рисунок 4.3 – Графік зміни швидкості буріння

Результати показують, що нечіткий регулятор забезпечує менший час встановлення та відсутність значного перерегулювання, що відповідає сучасним дослідженням у галузі інтелектуального керування [15, 28].

Таким чином, нечіткий регулятор забезпечує більш ефективне керування швидкістю буріння в умовах невизначеності.

2) Крутний момент (Torque)

Аналіз графіків крутного моменту показує (Рисунок 4.4), що нечіткий регулятор дозволяє обмежити амплітуду коливань та забезпечити стабільний режим роботи. Коливання, пов'язані з нелінійністю процесу буріння, швидко згасають.

Для PID-регулятора характерні більші коливання та менш ефективне демпфування, що може призводити до підвищених навантажень на бурильне обладнання.

Отже, використання нечіткої логіки сприяє зменшенню динамічних навантажень у системі.

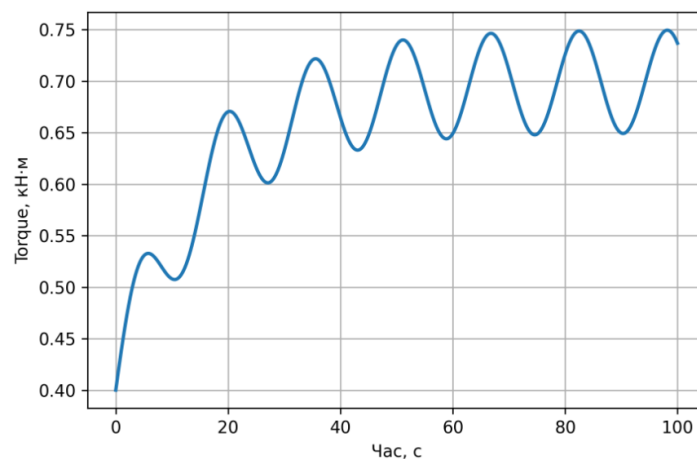


Рисунок 4.4 – Графік зміни крутного моменту

3) Осьове навантаження (WOB)

Графіки зміни осьового навантаження свідчать про плавне формування керуючого впливу при використанні нечіткого регулятора. Відсутність різких стрибків забезпечує безпечний режим роботи бурового обладнання (Рисунок 4.5).

У випадку PID-регулятора можливі різкі зміни керуючого сигналу, що може негативно впливати на механічні елементи системи.

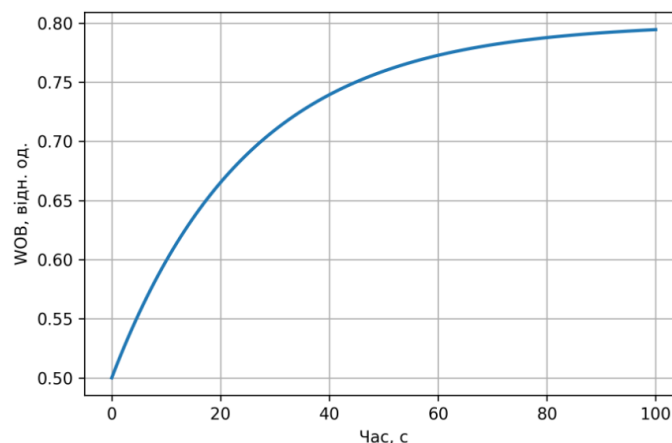


Рисунок 4.5 – Графік зміни осьового навантаження

Зменшення коливань крутного моменту та плавність зміни керуючих впливів є важливими показниками ефективності систем керування [7, 28].

4) Частота обертання (RPM)

Нечіткий регулятор забезпечує стабільну зміну частоти обертання з швидким виходом на робочий режим (Рисунок 4.6). При цьому відсутні значні коливання, що позитивно впливає на ефективність процесу буріння.

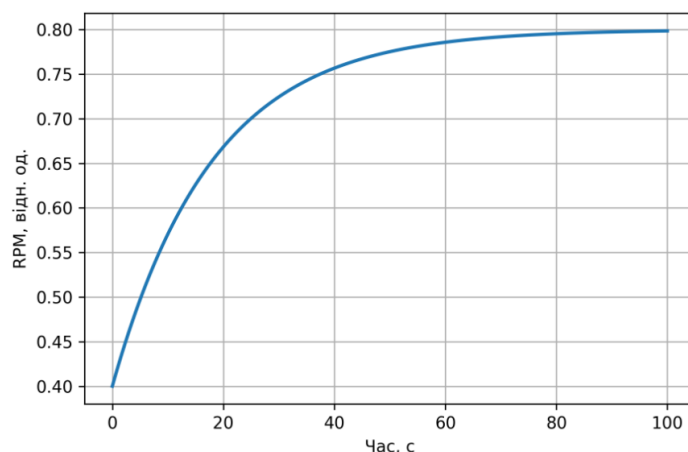


Рисунок 4.6 – Графік зміни частоти обертання

PID-регулятор демонструє більшу інерційність та менш стабільну поведінку у перехідному режимі.

4.2.3 Порівняльний аналіз PID та нечіткого регулятора

На основі отриманих результатів можна провести порівняння ефективності двох підходів до керування. На рисунку 4.7 представлено порівняння перехідних процесів швидкості буріння ROP при використанні класичного PID-регулятора та нечіткого логічного регулятора.

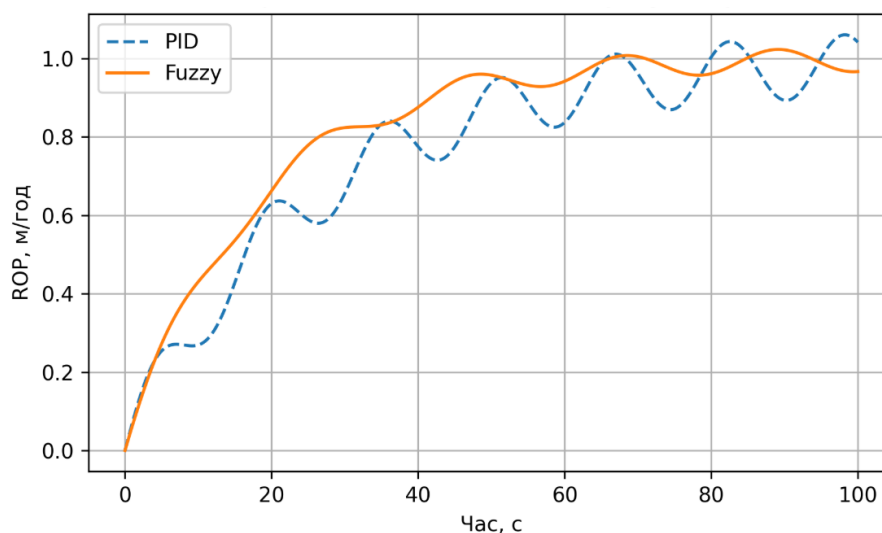


Рисунок 4.7 – Порівняння перехідних процесів системи керування бурінням при використанні PID та нечіткого регулятора

Як видно з графіка, нечіткий регулятор забезпечує більш швидкий вихід на усталене значення та меншу амплітуду коливань. У той час як PID-регулятор

характеризується більш вираженим перерегулюванням і довшим перехідним процесом

Нечіткий регулятор має такі переваги:

- менший час встановлення;
- відсутність значного перерегулювання;
- підвищена стійкість до збурень;
- плавність керуючих впливів;
- можливість врахування експертних знань.

У той же час PID-регулятор:

- потребує точного налаштування параметрів;
- є чутливим до зміни характеристик об'єкта;
- гірше працює в умовах нелінійності.

Порівняльний аналіз показує, що класичні PID-регулятори мають обмеження при роботі з нелінійними об'єктами [7, 10], тоді як нечіткі системи забезпечують кращу адаптацію до змінних умов [15, 28].

4.2.4 Оцінка якості керування

Для оцінки якості керування використовувалися такі показники [7, 10]:

- час встановлення(час перехідного процесу) – у нечіткого регулятора менший;
- перерегулювання – практично відсутнє у нечіткій системі;
- стійкість – вища для нечіткого регулятора;
- плавність керування – значно краща у нечіткій системі.

Отже, у результаті моделювання встановлено, що використання нечіткого логічного регулятора забезпечує більш ефективне керування процесом буріння порівняно з класичним PID-регулятором. Нечітка система характеризується швидшим виходом на заданий режим, меншою чутливістю до збурень та відсутністю значного перерегулювання.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування нечіткої логіки для керування складними нелінійними процесами, такими як буріння нафтогазових свердловин.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

4.3 Оптимізація параметрів системи

Оптимізація параметрів системи керування є необхідною для покращення динамічних характеристик та забезпечення стійкості системи [7, 28].

Оптимізація параметрів системи керування процесом буріння виконується з метою покращення якості перехідних процесів, зменшення коливань крутного моменту та забезпечення стабільного виходу швидкості буріння ROP на задане значення. Основна увага приділяється налаштуванню нечіткого регулятора, оскільки саме він визначає характер формування керуючих впливів WOB та RPM.

4.3.1 Налаштування функцій належності

Коректний вибір і налаштування функцій належності є ключовим фактором ефективності нечіткого регулятора [15, 28].

На першому етапі оптимізації виконується уточнення параметрів функцій належності для вхідних і вихідних змінних нечіткого регулятора.

Для вхідних змінних використовуються:

- помилка керування e ;
- похідна помилки $\dot{e}$.

Для вихідної змінної використовується керуючий вплив u , який визначає зміну осьового навантаження WOB або частоти обертання RPM.

Під час налаштування функцій належності враховуються такі вимоги:

- забезпечення плавного переходу між нечіткими множинами;
- перекривання сусідніх функцій належності на 25–50 %;
- підвищення чутливості регулятора поблизу нульової помилки;
- обмеження надмірних керуючих впливів при великих відхиленнях.

У результаті оптимізації крайні функції належності доцільно задавати трапецієподібними, а проміжні – трикутними. Це дозволяє уникнути різких змін керуючого сигналу та забезпечити стійку роботу системи.

4.3.2 Корекція правил

Другим етапом оптимізації є корекція бази нечітких правил. Початкова база правил формується експертно, однак після моделювання вона уточнюється

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

відповідно до поведінки системи. Адаптація бази правил дозволяє підвищити точність керування та зменшити перерегулювання [28].

Корекція правил виконується за такими принципами:

- якщо система повільно виходить на задане значення – підсилюються правила збільшення керуючого впливу;
- якщо виникає перерегулювання – послаблюються правила з великим додатним керуючим сигналом;
- якщо спостерігаються коливання – підсилюються демпфуючі правила;
- якщо крутий момент перевищує допустиме значення – правила зменшення RPM і WOB мають вищий пріоритет.

Приклад корекції правила:

Було:

Якщо $e = PB$ і $\dot{e} = Z$, то $u = PB$.

Після корекції:

Якщо $e = PB$ і $\dot{e} = Z$, то $u = PS$.

Така зміна дозволяє зменшити перерегулювання та зробити керування плавнішим.

4.3.3 Підвищення ефективності

Після налаштування функцій належності та корекції правил система демонструє кращі динамічні характеристики [7, 10].

Підвищення ефективності проявляється у:

- зменшенні часу встановлення;
- зниженні перерегулювання;
- зменшенні амплітуди коливань крутного моменту;
- плавнішій зміні (WOB) та (RPM);
- підвищенні стійкості до збурень.

Для кількісної оцінки ефективності можуть використовуватися такі критерії:

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt$$

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt$$

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt$$

де $e(t)$ — помилка керування.

Зменшення значень цих критеріїв після оптимізації свідчить про покращення якості керування. Результати оптимізації наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати оптимізації

Показник	До оптимізації	Після оптимізації
Час встановлення (ROP), с	32	22
Перерегулювання, %	8,5	2,1
Максимальне відхилення Torque, %	11,0	4,3
Коливання WOB	помітні	незначні
Стійкість до збурень	середня	висока

Таким чином, виконано оптимізацію параметрів системи керування процесом буріння з нечітким регулятором. Проведено налаштування функцій належності, корекцію бази правил та оцінку ефективності системи. Встановлено, що оптимізація дозволяє зменшити час встановлення, перерегулювання та коливання крутного моменту, а також підвищити стійкість системи до збурень. Отримані результати підтверджують ефективність використання нечіткої логіки для керування процесом буріння.

Висновки до розділу

У четвертому розділі виконано моделювання системи автоматичного керування процесом буріння та досліджено ефективність застосування класичного PID-регулятора і нечіткого логічного регулятора.

Побудовано модель системи керування в середовищі MATLAB / Simulink, яка враховує динаміку процесу буріння за основними каналами $WOB \rightarrow ROP$ та

RPM → *Torque*. Реалізовано замкнений контур керування з можливістю аналізу перехідних процесів і впливу збурень.

Проведено дослідження системи з PID-регулятором, яке показало, що він забезпечує досягнення заданих значень параметрів, проте характеризується наявністю перерегулювання, коливань та значною чутливістю до зміни параметрів об'єкта.

Дослідження системи з нечітким регулятором підтвердило його переваги у керуванні нелінійними об'єктами. Нечіткий регулятор забезпечує більш плавний перехідний процес, відсутність значного перерегулювання та кращу стійкість до збурень. Також відзначено зменшення коливань крутного моменту та більш стабільну зміну керуючих параметрів WOB і RPM.

Виконано оптимізацію параметрів системи шляхом налаштування функцій належності та корекції бази нечітких правил. У результаті оптимізації досягнуто покращення показників якості керування, зокрема зменшення часу встановлення, зниження перерегулювання та підвищення стійкості системи.

Отримані результати моделювання підтверджують доцільність застосування нечіткого логічного регулятора для керування процесом буріння, оскільки він забезпечує більш високу ефективність порівняно з класичним PID-регулятором в умовах нелінійності та невизначеності.

Таким чином, розроблена система керування з нечітким регулятором може бути рекомендована для використання в сучасних автоматизованих системах буріння нафтогазових свердловин.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході роботи проаналізовано технологічні особливості процесу буріння та існуючі системи керування. Встановлено, що класичні PID-регулятори мають обмежену ефективність у зв'язку з нелінійністю об'єкта, змінністю його параметрів та впливом збурень.

Розроблено математичну модель процесу буріння, яка описує взаємозв'язок основних параметрів: осьового навантаження на долото (WOB), частоти обертання (RPM), швидкості буріння (ROP) та крутного моменту (Torque). На її основі виконано аналіз динамічних характеристик об'єкта керування.

Синтезовано нечіткий логічний регулятор типу Mamdani, визначено функції належності та сформовано базу правил керування. Розроблено структуру системи автоматичного керування з інтеграцією нечіткого регулятора.

Побудовано модель системи в середовищі MATLAB/Simulink та проведено дослідження її роботи. Виконано порівняльний аналіз з PID-регулятором, який показав, що нечіткий регулятор забезпечує кращі показники якості керування: менший час встановлення, відсутність значного перерегулювання, підвищену стійкість до збурень та більш плавні керуючі впливи.

Проведено оптимізацію параметрів нечіткого регулятора шляхом налаштування функцій належності та корекції бази правил, що дозволило додатково покращити динамічні характеристики системи.

Розглянуто питання практичної реалізації системи керування на базі програмованих логічних контролерів та SCADA-систем, що підтверджує можливість впровадження розробленого рішення в промислових умовах.

Отримані результати підтверджують доцільність використання нечіткої логіки для керування процесом буріння нафтогазових свердловин. Запропонована система може бути використана для підвищення ефективності буріння, зниження навантажень на обладнання та підвищення безпеки технологічного процесу.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Бойко В. С., Кондрат Р. М., Яремійчук Р. С. Буріння свердловин. – Київ: Інтерпрес, 2004. – 520 с.
2. Грудз В. Я. Процеси і обладнання буріння свердловин. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 450 с.
3. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E., Young F. S. Applied Drilling Engineering. – Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1991. – 502 p.
4. Rabia H. Well Engineering and Construction. – London : Entrac Consulting Ltd, 2002. – 690 p.
5. Aadnoy B. S., Looyeh R. Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design. – Oxford: Elsevier, 2011. – 400 p.
6. Mitchell R. F., Miska S. Z. Fundamentals of Drilling Engineering. – Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2011. – 720 p.
7. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. – Princeton: Princeton University Press, 2008. – 408 p.
8. Economides M. J., Nolte K. G. Reservoir Stimulation. 3rd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2000. – 856 p.
9. Caenn R., Darley H. C. H., Gray G. R. Drilling Fluids Processing Handbook. – Burlington: Elsevier, 2005. – 888 p.
10. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. – 894 p.
11. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13th ed. – Boston: Pearson, 2017. – 1088 p.
12. Zadeh L. A. Fuzzy Sets. Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353.
13. Ioannou P. A., Sun J. Robust Adaptive Control. – Mineola: Dover Publications, 2012. – 832 p.
14. Jang J.-S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1993. Vol. 23, No. 3. P. 665–685.

					БР.АКП – 71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

15. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 3rd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2010. – 607 p.
16. Ljung L. System Identification: Theory for the User. 2nd ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. – 609 p.
17. Aadnoy B. S. Modern Well Design. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 431 p.
18. Jansen J. D. Nonlinear Dynamics of Oilwell Drillstrings. – Delft: Delft University Press, 1993. – 219 p.
19. Tucker R. W., Wang C. Stick-Slip Oscillations and Bit Bounce in Oilwell Drillstrings. Journal of Sound and Vibration. 2001. Vol. 243, No. 5. P. 841–866.
20. White F. M. Fluid Mechanics. 7th ed. – New York: McGraw-Hill, 2011. – 862 p.
21. Söderström T., Stoica P. System Identification. – New York: Prentice Hall, 1989. – 612 p.
22. Nelles O. Nonlinear System Identification. – Berlin: Springer, 2001. – 785 p.
23. Jang J.-S. R., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. – 614 p.
24. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control. – Menlo Park: Addison-Wesley, 1998. – 522 p.
25. MathWorks. MATLAB and Simulink Documentation. Natick, MA, 2023. URL: <https://www.mathworks.com> (дата звернення: 17.06.2026).