

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**МР.АКПм – 49.00.00.000 ПЗ**

**Група АКПм - 24-2**

**Юрій Ониськів**

**2025**

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

**Ониськів Юрій Богданович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:622.24:004.896

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

**Інтелектуальна система автоматичного керування процесом буріння у**

(назва роботи)

**складних геологічних умовах Західного нафтогазоносного регіону України**

**Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

### Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПм -24-2

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Ю.Б. Ониськів

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

М.В.Шавранський

(ініціали та прізвище)

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я.Чигур

(ініціали та прізвище)

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

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

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКІТ**

(А.І. Лагойда)

«    »                      2025 року

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

**Ониськіву Юрію Богданович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інтелектуальна система автоматичного керування процесом буріння у складних геологічних умовах Західного нафтогазоносного регіону України

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

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від «10» 11 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики, аналіз науково-технічної літератури

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

4.1. Аналіз технологічного процесу буріння свердловин у гірських умовах Західної України як об'єкта автоматизації

4.2. Теоретичні основи побудови інтелектуальних систем керування

4.3. Математична модель та синтез інтелектуальної системи керування процесом буріння

4.4. Реалізація інтелектуальної системи керування процесом буріння на ПЛК SCHNEIDER ELECTRIC

4.5. Загальні висновки

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

Не передбачено завданням

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу буріння свердловин у гірських умовах Західної України як об'єкта автоматизації	30.10.2025 р.	Виконано
2	Теоретичні основи побудови інтелектуальних систем керування	10.11.2025 р.	Виконано
3	Математична модель та синтез інтелектуальної системи керування процесом буріння	20.11.2025 р.	Виконано
4	Реалізація інтелектуальної системи керування процесом буріння на ПЛК SCHNEIDER ELECTRIC	30.11.2025 р.	Виконано
5	Загальні висновки	05.12.2025 р.	Виконано
6	Оформлення МР	07.12.2025 р.	Виконано

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ониськів Ю.Б.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Шавранський М.В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

### **Ониськів Ю.Б. Інтелектуальна система автоматичного керування процесом буріння у складних геологічних умовах Західного нафтогазоносного регіону України**

Магістерська робота на отримання ступеня магістра з автоматизації за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано - Франківськ, 2025 р.

Магістерська робота присвячена розробленню інтелектуальної системи автоматичного керування процесом буріння у складних геологічних умовах Західного нафтогазоносного регіону України. Обґрунтовано недоліки традиційних PID-систем і необхідність застосування адаптивних та інтелектуальних методів керування. Розроблено математичну модель процесу, структурну схему інтелектуальної АСК та алгоритми адаптивного регулювання основних параметрів (WOB, RPM, Torque). Проведено моделювання в MATLAB/Simulink та реалізовано програмно-апаратну архітектуру на базі ПЛК Schneider Electric із SCADA-моніторингом. Результати роботи демонструють підвищення стабільності, безпеки та ефективності буріння, а також можливість інтеграції системи в сучасні бурові комплекси.

Практична цінність роботи полягає у можливості інтеграції розробленої інтелектуальної АСК у сучасні бурові комплекси, підвищенні безпеки та ефективності буріння, зменшенні непродуктивного часу та ризику аварій, а також у створенні основи для цифрових двійників свердловин і розвитку концепції «smart drilling».

**Ключові слова:** буріння свердловин, інтелектуальна система керування, адаптивний регулятор, нечітка логіка, MATLAB/Simulink, SCADA, WOB, RPM, Torque, цифровий двійник.

## ANNOTATION

### **Onyskiv Y.B. Intelligent system for automatic control of the drilling process in complex geological conditions of the Western oil and gas region of Ukraine**

Master's thesis for the degree of Master in Automation in the specialty 174 - Automation, computer-integrated technologies and robotics. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano - Frankivsk, 2025

The master's thesis is devoted to the development of an intelligent system for automatic control of the drilling process in complex geological conditions of the Western oil and gas region of Ukraine. The shortcomings of traditional PID systems and the need to use adaptive and intelligent control methods are substantiated. A mathematical model of the process, a structural diagram of an intelligent ACS and algorithms for adaptive control of the main parameters (WOB, RPM, Torque) are developed. Modeling is carried out in MATLAB/Simulink and a software and hardware architecture based on Schneider Electric PLC with SCADA monitoring is implemented. The results of the work demonstrate the increase in stability, safety and efficiency of drilling, as well as the possibility of integrating the system into modern drilling complexes.

The practical value of the work lies in the possibility of integrating the developed intelligent ASC into modern drilling complexes, increasing the safety and efficiency of drilling, reducing unproductive time and the risk of accidents, as well as in creating the basis for digital twins of wells and developing the concept of "smart drilling".

**Keywords:** well drilling, intelligent control system, adaptive controller, fuzzy logic, MATLAB/Simulink, SCADA, WOB, RPM, Torque, digital twin.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН У ГІРСЬКИХ УМОВАХ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ .....</b>	<b>15</b>
1.1. Геолого-технічні особливості Західного нафтогазоносного регіону України .....	15
1.2. Технологічні параметри процесу буріння, що підлягають контролю й автоматичному регулюванню.....	16
1.3. Основні проблеми та ускладнення під час буріння в умовах Карпатського регіону.....	18
1.4. Особливості процесу буріння як об’єкта автоматизації.....	20
1.5. Аналіз сучасних систем автоматичного керування процесом буріння.....	21
1.6. Недоліки сучасних систем автоматичного керування процесом буріння....	25
1.7. Потреба у створенні інтелектуальної системи керування.....	28
Висновки до розділу 1.....	30
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ.....</b>	<b>32</b>
2.1. Поняття інтелектуальної автоматизованої системи керування.....	32
2.2. Структура інтелектуальної системи керування технологічним процесом....	33
2.3. Математичні основи моделювання процесу буріння.....	39
2.4. Часові та частотні характеристики передавальної функції об’єкта керування в MATLAB .....	41
2.5. Нечіткі системи керування в бурінні.....	48
2.6. Вимоги до інтелектуальної системи керування процесом буріння.....	49
Висновки до розділу 2.....	49

## **РОЗДІЛ 3**

<b>МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА СИНТЕЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ.....</b>	<b>51</b>
3.1. Загальні принципи математичного моделювання та постановка задачі.....	51
3.2. Механічна модель руйнування породи.....	52
3.3. Модель гідравліки циркуляційної системи.....	52
3.4. Модель динаміки бурильної колони .....	53
3.5. Модель взаємозв'язку WOB, RPM, Torque.....	54
3.6. Структурна схема інтелектуальної системи керування: логічний опис схеми.....	54
3.7. Модуль прогнозування параметрів буріння.....	55
3.8. Нечіткий регулятор.....	56
3.9. Алгоритм синтезу інтелектуальної системи керування.....	56
3.10. Приклад розрахунку роботи інтелектуального регулятора.....	56
3.11. Ефективність синтезованої системи.....	57
3.12. Розробка моделі в ПП MATLAB/SIMULINK.....	57
3.13. Аналіз отриманих графіків.....	62
Висновки до розділу 3.....	66

## **РОЗДІЛ 4**

<b>РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ НА ПЛК SCHNEIDER ELECTRIC.....</b>	<b>68</b>
4.1. Вибір технічних засобів.....	68
4.2. Структура програмного забезпечення ПЛК.....	69
4.3. Алгоритм аварійного захисту ІСК процесом буріння.....	72
4.4. SCADA-моніторинг та архівування даних.....	76
4.5. Інтеграція ПЛК-АСК з газотранспортною системою України.....	74
Висновки до розділу 4.....	80
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>81</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>83</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>86</b>

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

АЧХ – Амплітудно – частотна характеристика

АСР – автоматизована система регулювання

АФХ – Амплітудно – фазова характеристика

ІПХ – імпульсна перехідна характеристика

ІСК ПБ – інтелектуальна система керування процесом буріння

ПЗ – програмне забезпечення

ПЛК – програмований логічний контролер

ПП – програмний продукт

ПХ – перехідна характеристика

САК – система автоматичного керування

ФЧХ – Фазо – частотна характеристика

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Актуальність теми магістерської роботи зумовлена зростанням ролі інтелектуальних систем автоматичного керування в нафтогазовій галузі України, зокрема у сфері буріння свердловин у складних геологічних умовах. Західний нафтогазоносний регіон України характеризується значною варіативністю геолого-технологічних умов: тріщинуватістю порід, складною стратиграфією розрізу, наявністю зон аномальних тисків, нестійких гірських порід та ускладнень під час проходження окремих інтервалів. Це призводить до підвищених ризиків аварійних ситуацій, зростання часу простою бурового обладнання, перевитрат бурового розчину, енергоресурсів та матеріалів.

Традиційні системи автоматичного керування процесом буріння, які базуються переважно на фіксованих налаштуваннях регуляторів і не враховують динамічну змінність геолого-технічних умов у реальному часі, виявляються недостатньо ефективними. Вони обмежено реагують на швидкі зміни осьового навантаження, крутного моменту, частоти обертання бурильної колони, параметрів бурового розчину та тиску у свердловині. Це знижує ефективність буріння, збільшує собівартість метра проходки та підвищує ймовірність виникнення ускладнень типу прихватів, обвалів стінок свердловини, газонафтоводопроявів.

Розвиток концепцій «розумного буріння», цифрових двійників свердловин та інтегрованих інформаційно-керуючих систем створює передумови для переходу від класичних схем керування до інтелектуальних систем, здатних адаптуватися до змін середовища. Використання елементів штучного інтелекту, методів адаптивного, нечіткого та прогнозного керування, а також алгоритмів аналізу великих масивів даних буріння (drilling data analytics) відкриває можливість підвищення точності підтримання технологічних параметрів, скорочення часу прийняття рішень та зменшення впливу «людського фактору».

Для Західного нафтогазоносного регіону України, де значна частина родовищ знаходиться на пізніх стадіях розробки, а нові поклади часто

характеризуються ускладненими умовами буріння, підвищення ефективності та безпеки проходки свердловин є важливим чинником забезпечення енергетичної безпеки держави. Впровадження інтелектуальних систем автоматичного керування процесом буріння дає змогу зменшити ризики аварій і ускладнень, оптимізувати режими буріння, скоротити непродуктивний час, а також підвищити кінцевий техніко-економічний результат бурових робіт.

Крім того, актуальність теми посилюється необхідністю інтеграції сучасних систем автоматизації бурових установок із корпоративними інформаційними системами нафтогазовидобувних підприємств, впровадженням принципів Індустрії 4.0 та цифрової трансформації виробництва. Інтелектуальна система керування процесом буріння у складних геологічних умовах може стати важливою складовою цифрового бурового комплексу, забезпечуючи обмін даними в режимі реального часу, дистанційний моніторинг та підтримку прийняття рішень для інженерно-технічного персоналу.

Таким чином, розроблення та дослідження інтелектуальної системи автоматичного керування процесом буріння у складних геологічних умовах Західного нафтогазоносного регіону України є науково та практично актуальним завданням. Воно спрямоване на підвищення ефективності, надійності та безпеки бурових робіт, зниження виробничих ризиків і витрат, а також відповідає сучасним тенденціям розвитку нафтогазової галузі та стратегічним пріоритетам енергетичної політики України.

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Вибір теми дослідження обумовлений комплексом наукових, технологічних та практичних чинників, що визначають сучасний розвиток нафтогазовидобувної галузі. Буріння свердловин у цьому регіоні супроводжується підвищеною складністю, зумовленою неоднорідністю геологічної будови, аномальними пластовими тисками, нестійкими гірськими породами, високою ймовірністю виникнення ускладнень та аварій. Такі умови вимагають застосування прогресивних методів керування технологічними параметрами, що забезпечують стабільність процесу та своєчасне реагування на змінні фактори.

Традиційні системи автоматичного регулювання, які використовують фіксовані параметри регуляторів, не забезпечують достатнього рівня адаптивності та швидкодії в умовах, коли технологічні параметри буріння змінюються у реальному часі. Це призводить до збільшення непродуктивного часу, ризику прихватів, погіршення якості проходки та підвищення витрат на бурові роботи. Натомість інтелектуальні системи, що базуються на методах штучного інтелекту, машинного навчання, адаптивного та нечіткого регулювання, здатні прогнозувати зміну стану свердловини, автоматично коригувати режими роботи та підвищувати ефективність керування.

Вибір саме цієї теми є обґрунтованим також через стратегічні завдання енергетичної безпеки України, які потребують підвищення продуктивності та безпеки бурових робіт, особливо на родовищах, що перебувають на пізніх стадіях розробки. Запровадження інтелектуальних систем дає змогу мінімізувати аварійні ситуації, знизити собівартість буріння, забезпечити точнішу підтримку осьового навантаження, частоти обертання, крутного моменту та параметрів бурового розчину.

Тематика дослідження відповідає сучасним тенденціям цифрової трансформації нафтогазової галузі, концепції «розумного буріння» та вимогам Індустрії 4.0 щодо інтеграції систем управління з аналітичними платформами, цифровими двійниками та інтелектуальними рішеннями підтримки прийняття рішень. Крім того, тема корелює з пріоритетами наукових досліджень ІФНТУНГ та кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, які орієнтовані на розроблення та впровадження систем автоматизації нового покоління для складних технологічних об'єктів нафтової та газової промисловості.

Таким чином, обрана тема є актуальною, науково значущою та практично цінною, оскільки спрямована на вдосконалення процесу буріння, підвищення його продуктивності, безпеки та економічної ефективності шляхом розроблення інтелектуальної системи автоматичного керування, здатної працювати в умовах високої варіабельності геолого-технічних параметрів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розроблення інтелектуальної системи автоматичного керування процесом буріння у складних геологічних умовах Західного нафтогазоносного регіону України, здатної адаптуватися до змін технологічних параметрів у режимі реального часу, забезпечувати підвищення ефективності, безпеки та надійності бурових робіт.

Завданням дослідження є проведення аналізу сучасного стану автоматичного керування процесом буріння та специфіки роботи у складних геологічних умовах Західного нафтогазоносного регіону. Необхідно дослідити інтелектуальні, адаптивні та нечіткі методи керування з метою вибору найбільш ефективних підходів для стабілізації технологічних параметрів буріння. Важливо розробити математичну модель процесу та структуру інтелектуальної системи керування, здатної працювати в умовах змінних факторів. У межах роботи потрібно синтезувати та змодельовати алгоритми інтелектуального регулятора в середовищі MATLAB/Simulink. Завершальним завданням є оцінювання ефективності запропонованої системи та формування рекомендацій щодо її практичного впровадження на бурових підприємствах регіону.

*Об'єктом дослідження* є процес буріння нафтових і газових свердловин у складних геологічних умовах Західного нафтогазоносного регіону України, зокрема динаміка та взаємодія основних технологічних параметрів, що визначають стабільність, ефективність і безпеку цього процесу.

*Предмет дослідження* є методи, алгоритми та структурні рішення інтелектуальної системи автоматичного керування процесом буріння, що забезпечують адаптивне регулювання технологічних параметрів у реальному часі в умовах змінних геолого-технічних факторів.

**Методи дослідження.** У дослідженні застосовано комплекс методів, що забезпечують всебічний аналіз процесу буріння та розроблення інтелектуальної системи керування. Використано методи системного аналізу для вивчення структури технологічного процесу та визначення ключових параметрів, що впливають на його стабільність. Математичне моделювання та методи теорії автоматичного керування застосовано для побудови динамічних моделей

процесу буріння та синтезу алгоритмів регулювання. Методи машинного навчання, нечіткої логіки та адаптивного керування використано для створення інтелектуальних алгоритмів, здатних працювати в умовах змінних геологічних та технологічних факторів. Для перевірки працездатності та ефективності запропонованої системи використано комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та методи порівняльного аналізу.

**Новизна отриманих результатів.** Наукова новизна роботи полягає в розробленні інтелектуальної системи автоматичного керування процесом буріння, що враховує динамічну змінність геолого-технічних умов Західного нафтогазоносного регіону та забезпечує адаптивне регулювання основних технологічних параметрів у реальному часі. Запропоновано удосконалену математичну модель процесу буріння, яка поєднує механічні, гідродинамічні та інформаційні аспекти системи, що дозволяє точніше прогнозувати поведінку свердловини під дією змін бурового режиму. Розроблено структуру та алгоритми інтелектуального регулятора на основі методів адаптивного та нечіткого керування, які забезпечують підвищення стійкості та швидкодії системи порівняно з традиційними ПД-регуляторами. Запропоновано метод автоматичної корекції режимів буріння на основі аналізу потоків технологічних даних та прогнозування ускладнень. Уперше для умов регіону сформовано інтегровану модель інтелектуалізації процесу буріння, що може бути використана як основа для створення цифрового двійника свердловини та впровадження технологій «smart drilling» у вітчизняній буровій практиці.

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

Тематика магістерської роботи відповідає стратегічним науковим напрямкам кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та включена до її плану науково-дослідної діяльності. Дослідження забезпечує розвиток сучасних підходів до автоматизації, зокрема впровадження інтелектуальних систем керування та цифрових технологій у нафтогазову та енергетичну галузі. Робота виконується в межах державної бюджетної тематики, що підтверджує її

відповідність актуальним науково-технічним завданням і потребам виробничої практики. Отримані результати можуть бути використані при створенні та впровадженні інноваційних рішень для підвищення ефективності бурових процесів і цифровізації галузевої інфраструктури. Перспективність обраного напрямку підкріплюється можливістю подальшої інтеграції розроблених підходів у проекти модернізації української газотранспортної системи та впровадження новітніх технологій у сфері енергетики.

**Практичні значення отриманих результатів.** Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості безпосереднього впровадження розробленої інтелектуальної системи автоматичного керування в процес буріння свердловин у складних геологічних умовах. Запропоновані алгоритми адаптивного та інтелектуального регулювання дозволяють підвищити точність підтримання осевого навантаження, частоти обертання та крутного моменту, що зменшує ризик прихватів, обвалів стінок свердловини та інших ускладнень. Розроблена математична модель і результати моделювання можуть бути використані для оптимізації режимів буріння, вибору параметрів управління та прогнозування поведінки свердловини за різних геолого-технічних умов. Створена структура інтелектуальної АСК може бути інтегрована у сучасні бурові комплекси та SCADA-системи, забезпечуючи дистанційний моніторинг, аналіз технологічних даних і підтримку прийняття рішень для інженерно-технічного персоналу. Крім того, результати роботи можуть бути застосовані у навчальному процесі та при розробленні цифрових двійників бурових установок, сприяючи подальшій цифровізації та модернізації бурових технологій в Україні.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 26 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 85 сторінок, у тому числі 4 таблиці і 21 рисунок.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН У ГІРСЬКИХ УМОВАХ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

### 1.1. Геолого-технічні особливості Західного нафтогазоносного регіону України

Західний нафтогазоносний регіон України характеризується складною та різномірною геологічною будовою, обумовленою активними тектонічними процесами Карпатської геосинклінали (рис.1.1). У структурі регіону виділяють зони інтенсивної дислокованості, тріщинуватості та чергування нестійких порід, що формують складні умови проходки свердловин. Значні кути падіння пластів, зональність аномальних пластових тисків, наявність уламкових та глинистих відкладів, а також висока газонасиченість окремих інтервалів зумовлюють часте виникнення технологічних ускладнень.



Рис.1.1. Геолого-технічні особливості Західного нафтогазоносного регіону  
України

Гірські умови Карпатського регіону проявляються у підвищеній нестабільності стінок свердловини, схильності до осипання та обвалів, складності прогнозування геомеханічних властивостей порід, що значно

ускладнює режимне керування процесом буріння. У таких умовах ефективність і безпека бурових робіт значною мірою залежать від здатності автоматизованої системи керування оперативно реагувати на зміни параметрів у реальному часі.

## 1.2. Технологічні параметри процесу буріння, що підлягають контролю й автоматичному регулюванню

Процес буріння свердловин є складним структурно-динамічним об'єктом, у якому взаємодіють механічні, гідравлічні та геомеханічні процеси. До основних технологічних параметрів, що визначають стабільність процесу та підлягають контролю й автоматичному керуванню (рис.1.2), належать:



Рис.1.2.Схема технологічних параметрів контролю та керування

- осьове навантаження на долото (WOB) — впливає на механічну швидкість буріння та знос долота;
- частота обертання бурильної колони (RPM) — визначає інтенсивність руйнування породи;
- крутний момент (Torque) — інформує про механічний опір порід, наявність прихватонебезпечних зон;

- витрата бурового розчину — впливає на очищення вибою, охолодження долота та стабілізацію тисків;
- гідростатичний та циркуляційний тиски — визначають стійкість стінок свердловини та запобігають газонафтоводопроявам;
- динамічні параметри бурильної колони — коливання, вібрації, «stick-slip», «bit-bounce», бокові переміщення.

Нижче подано чітку, структуровану таблицю 1.1 технологічних параметрів процесу буріння, що підлягають контролю й автоматичному регулюванню.

Таблиця 1.1

### Технологічні параметри контролю та керування процесом буріння

Параметр	Позначення / одиниці вимірювання	Вплив на процес буріння	Мета автоматичного регулювання
Осьове навантаження на долото	WOB, кН	Визначає інтенсивність руйнування породи, впливає на ROP, ризик прихватів	Забезпечення оптимального навантаження для стабільної швидкості буріння
Частота обертання бурильної колони	RPM, об/хв	Впливає на ефективність руйнування породи, виникнення вібрацій (стрибки-ковзання)	Підтримання стабільної обертальної швидкості та зменшення вібрацій
Крутний момент	Torque, кН·м	Інформує про опір породи, забруднення стовбура, наближення до прихватонебезпечних зон	Запобігання перевантаженням та контроль стану стовбура свердловини
Витрата бурового розчину	Q, л/с	Забезпечує очищення вибою, охолодження долота, стабілізацію тисків	Підтримання оптимального транспортного та охолоджувального режиму
Тиск бурового розчину (гідростатичний і циркуляційний)	P, МПа	Визначає стійкість стінок свердловини, запобігає газонафтоводопроявам	Утримання системи у стані гідростатичної рівноваги
Щільність бурового розчину	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Регулює гідростатичний тиск та стабільність стовбура	Забезпечення відповідності тиску пластовим умовам
Реологічні властивості розчину	В'язкість, структурність	Визначають якість винесення шламу та втрати тиску	Оптимізація очищення та циркуляції

Продовження таблиці 1.1.

Параметр	Позначення / одиниці вимірювання	Вплив на процес буріння	Мета автоматичного регулювання
Вібраційні режими бурильної колони	Заїдання-ковзання, підстрибування біт, кружляння	Викликають знос інструменту, нестабільність буріння	Зменшення амплітуд коливань, підвищення ресурсу інструменту
Температура на вибої та в циркуляційній системі	T, °C	Впливає на в'язкість розчину, стан інструменту	Контроль стабільності режимів та теплообміну

У гірських умовах важливо не лише стабілізувати ці параметри, але й вміти прогнозувати їх поведінку при переході між різними літологічними інтервалами, що є ключовою передумовою адаптивного керування.

### 1.3. Основні проблеми та ускладнення під час буріння в умовах Карпатського регіону

Буріння у Західній Україні супроводжується численними технологічними ризиками, серед яких:

1. Прихвати бурильного інструменту, що виникають через нестабільність стінок свердловини, диференційне прихоплення, осипи та сповзання порід.
2. Обвали та осипання стінок свердловини, викликані слабкими зв'язками між глинистими та алевролітовими шарами.
3. Проблеми очищення вибою через складні траєкторії свердловин і нерівномірний розподіл швидкостей потоку бурового розчину.
4. Аномально високі або низькі пластові тиски, що підвищують ризики газонафтоводопроявів.
5. Вібрації та динамічні коливання бурильної колони, зокрема ефекти «stick-slip», що призводять до зниження ресурсу долота та нерівномірної швидкості буріння.

6. Складність підтримання оптимальних режимів буріння при швидкому переході між різними типами порід.

Ці фактори обумовлюють необхідність розроблення системи керування, здатної швидко адаптувати режими роботи до змін умов і мінімізувати ризики аварій та ускладнень. Всі проблеми та ускладнення, що описані вище зведені в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2

**Основні проблеми та ускладнення під час буріння в умовах  
Карпатського регіону**

<b>Проблема / ускладнення</b>	<b>Причини виникнення</b>	<b>Наслідки для процесу буріння</b>	<b>Необхідні заходи / методи попередження</b>
1. Прихвати бурильного інструменту	Нестабільність стінок свердловини, диференційне прихоплення, осипи порід	Зупинка буріння, ризик втрати інструменту, збільшення NPT	Контроль WOB і Torque, оптимізація бурового розчину, моніторинг тисків
2. Обвали та осипання стінок свердловини	Слабкоцементовані породи, тріщинуватість, аномальні тиски	Ускладнення спуско-підіймальних операцій, ризик прихватів	Підтримання оптимального тиску промивальної рідини, зміцнення стовбура
3. Погане очищення вибою та кільцевого простору	Складні траєкторії свердловин, низька швидкість потоку бурового розчину	Осідання шламу, підвищення крутного моменту, прихвати	Регулювання витрати розчину, вибір оптимальних реологічних властивостей
4. Стрибки-ковзання та інші вібраційні режими бурильної колони	Нерівномірність механічних властивостей порід, неправильні режими RPM / WOB	Прискорений знос долота, нестабільна ROP, ризик аварій	Інтелектуальне керування RPM/WOB, адаптивні регулятори
5. Газонафтоводопрояви	Аномально високі пластові тиски, поганий контроль тиску бурового розчину	Аварійні ситуації, викиди, потреба у глушінні	Постійний контроль тиску, швидке регулювання гідростатичної рівноваги
6. Ускладнення при проходженні тріщинуватих порід	Інтенсивна фільтрація розчину, втрата циркуляції	Зниження тиску, ризик проявів, зриви режиму буріння	Використання LCM-матеріалів, спеціалізованих розчинів, контроль циркуляції

Продовження таблиці 1.2.

<b>Проблема / ускладнення</b>	<b>Причини виникнення</b>	<b>Наслідки для процесу буріння</b>	<b>Необхідні заходи / методи попередження</b>
7. Проблеми зі стійкістю траєкторії свердловини	Зміни міцності порід, геомеханічні аномалії	Відхилення траєкторії, ускладнення керування долотом	Використання систем навігації MWD/LWD, корекція параметрів буріння
8. Нестабільність тиску в циркуляційній системі	Рельєфні перепади, зміни глибини, коливання параметрів розчину	Ризик проявів або обвалів, порушення режиму	АСК тиску, онлайн-моніторинг, оптимізація насосного режиму

#### **1.4. Особливості процесу буріння як об'єкта автоматизації**

Процес буріння належить до складних, багатозв'язних і нелінійних об'єктів керування. Його особливості як об'єкта автоматизації полягають у:

- високій інерційності окремих підсистем (гідравлічної, механічної), що ускладнює швидке регулювання;
- значній нелінійності процесів руйнування порід та руху бурильної колони;
- взаємозв'язку між параметрами (наприклад, зміна WOB впливає на Torque і RPM);
- тимчасових і стохастичних збуреннях, спричинених неоднорідністю порід;
- неповноті або запізненні інформації, оскільки багато параметрів оцінюються непрямими методами.

Автоматизація процесу буріння вимагає застосування алгоритмів, здатних працювати в умовах невизначеності та мінливості вхідних впливів, що робить інтелектуальні системи керування більш ефективними, ніж традиційні PID-регулятори.

## 1.5. Аналіз сучасних систем автоматичного керування процесом буріння

Сучасні системи автоматичного керування процесом буріння (Automatic Drilling Control Systems — ADCS) (рис.1.3) відіграють ключову роль у забезпеченні стабільності, ефективності та безпеки бурових робіт, особливо в умовах складних та швидкозмінних геолого-технічних факторів. Досвід світових сервісних компаній (NOV, Schlumberger, Baker Hughes, Halliburton) та провідних виробників бурового обладнання демонструє перехід від класичних систем стабілізації режимів до комплексних інтелектуальних рішень, заснованих на цифровізації, аналізі даних у реальному часі, машинному навчанні та моделюванні процесів.



Рис.1.3. Сучасні САК процесом буріння

### 1.5.1. Системи автоматичного регулювання базових параметрів буріння

До базового функціоналу сучасних систем керування належать:

- Автоматичне підтримання осьового навантаження (WOB Control) — забезпечує рівномірний контакт долота з породою та оптимальну механічну швидкість буріння.
- Регулювання частоти обертання (RPM Control) — відповідає за стабільність руйнування породи та мінімізацію вібраційних режимів.
- Керування крутним моментом (Torque Control) — дозволяє уникнути перевантажень приводу, попереджати прихвати та знос інструменту.
- Керування витратою та тиском бурового розчину (Mud Pump Control) — забезпечує стабільний гідростатичний тиск, якісне очищення вибою, запобігає газонафтоводопроявам.

Ці функції реалізуються за допомогою PID- та каскадних регуляторів, що працюють у межах локальних контурів.

### **1.5.2. Інтегровані автоматизовані системи буріння**

У сучасних бурових комплексах застосовуються інтегровані системи керування верхнім приводом (Top Drive System), долотом та циркуляційною системою. Найбільш поширені рішення:

- NOV NOVOS™ — система, що автоматично оптимізує режими WOB/RPM на основі аналізу вібрацій, механічної швидкості буріння та історичних даних.
- Schlumberger DrillOps™ — інтелектуальний платформний комплекс, який забезпечує цифрове планування, автоматичне виконання операцій та контроль параметрів свердловини в реальному часі.
- Baker Hughes Automate™ — система динамічної оптимізації параметрів буріння з використанням аналітики великих даних.
- Halliburton RORO™ (Real-Time Optimization Process) — платформа прогнозування продуктивності, що коригує режими роботи залежно від властивостей порід.

Спільною рисою цих систем є високий ступінь автоматизації операцій, інтеграція з цифровими моделями та підтримка прийняття рішень у режимі реального часу.

### **1.5.3. Інтелектуальні системи керування (AI-Driven Control)**

Останні тенденції розвитку автоматизації буріння передбачають активне використання:

- адаптивних регуляторів, що налаштовуються під різні типи порід і режими;
- нечітких систем керування, здатних працювати в умовах невизначеності та шумів;
- нейромережевих моделей, які прогнозують оптимальні режими буріння;
- алгоритмів машинного навчання (ML) для виявлення прихватонебезпечних і аварійних ситуацій;
- цифрових двійників свердловин (Digital Twin) для моделювання траєкторії, гідродинаміки та навантажень на бурильну колону.

Інтелектуальні системи забезпечують:

- прогнозування вібрацій “stick-slip”, “bit bounce”, “whirl”;
- запобігання газонафтоводопроявам;
- оптимізацію механічної швидкості буріння (ROPI optimization);
- мінімізацію непродуктивного часу (NPT).

### **1.5.4. SCADA-системи для моніторингу буріння**

Сучасні бурові установки використовують SCADA-платформи:

- GE iFIX,
- Wonderware InTouch,
- Siemens WinCC,
- ABB 800xA,
- Schneider EcoStructure.

Ці системи забезпечують:

- збір та архівування даних буріння;
- формування трендів і звітів;
- оперативний контроль параметрів;
- дистанційний доступ до свердловини;
- візуалізацію стану обладнання.

SCADA інтегрується з сенсорами MWD/LWD, топ-драйвом, насосами та системою циркуляції.

### **1.5.5. Виклики та обмеження сучасних АСК**

Попри значні успіхи, існують технологічні обмеження:

- PID-регулятори не можуть реагувати на різкі зміни літології.
- У складних гірських умовах виникають сильні нелінійності й стохастичні коливання параметрів.
- Багато систем працюють за "заданою програмою" і не враховують контекст буріння.
- Рішення світових компаній часто дорогі та потребують високого рівня сервісної підтримки.

Це створює потребу в розробленні нового покоління інтелектуальних систем, адаптованих до умов Західної України, з акцентом на адаптацію, прогнозування та технологічну гнучкість.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що процес буріння свердловин у гірських умовах Західної України є складним нелінійним об'єктом, який характеризується високою динамічністю, мінливістю геолого-технічних умов та значною кількістю потенційних ускладнень. Ефективність керування у таких умовах значною мірою залежить від здатності системи автоматизації адаптуватися до змін параметрів та прогнозувати розвиток небезпечних ситуацій.

Традиційні системи автоматичного керування не забезпечують належного рівня гнучкості й швидкодії для роботи в складних умовах Західного регіону. Це підтверджує необхідність розроблення інтелектуальної системи керування,

здатної забезпечити підвищення точності стабілізації режимів буріння, зменшення непродуктивного часу, запобігання аваріям та оптимізацію технологічних показників.

## **1.6. Недоліки сучасних систем автоматичного керування процесом буріння**

### **1.6.1. Обмежена адаптивність до змінних геолого-технічних умов**

Більшість систем керування бурінням побудовані на класичних PID- або каскадних регуляторах, які працюють ефективно лише за стабільних та передбачуваних умов.

У реальних умовах Карпатського регіону технологічні параметри змінюються швидко (перехід між пластами, тріщинуватість, аномалії тиску), що призводить до запізнілих і некоректних реакцій системи.

### **1.6.2. Недостатнє опрацювання нелінійності та стохастичних факторів**

Процес буріння є високонелінійним та залежним від випадкових збурень (вибійні коливання, стрибки-ковзання, стрибки тиску).

Стандартні алгоритми не враховують ці особливості, через що:

- зростає вібраційність,
- погіршується ROP,
- зростає ризик аварійних режимів.

### **1.6.3. Низький рівень прогнозування аварійних ситуацій**

Базові системи автоматизації працюють за принципом: реакція → корекція, а не попередження → адаптація.

Вони не прогнозують:

- прихватонебезпечні зони,
- втрачу циркуляції,

- наближення до газонафтоводопроявів,
- динамічні перевантаження.

Це робить їх менш ефективними в складних регіонах.

#### **1.6.4. Відсутність глибокої інтеграції з цифровими моделями та big data**

Хоч існують системи класу DrillOps™ чи NOVOS™, їх впровадження дороге та обмежене. На більшості бурових установок використовуються спрощені АСК, які:

- не формують цифрового двійника,
- не проводять аналіз історичних даних,
- не оптимізують режими в реальному часі.

#### **1.6.5. Обмежені можливості виявлення та компенсації вібрацій**

Більшість АСК буріння не справляються з:

- стрибки-ковзання,
- підстрибування долота,
- крутильні коливання,
- вихор.

Наслідок — знос долота, нестабільність буріння та підвищення ризиків.

#### **1.6.6. Висока вартість та складність впровадження**

Передові інтелектуальні системи керування (Schlumberger, NOV, Halliburton):

- потребують складного налаштування,
- вимагають висококваліфікованого персоналу,
- мають високу вартість сервісного супроводу.

Це стримує їхнє масове застосування.

### 1.6.7. Вразливість до помилок сенсорів і обмеження вимірювань

Дані буріння часто містять:

- шум,
- запізнення,
- пропуски,
- похибки сенсорів.

Більшість систем не мають механізмів фільтрації, реконструкції або автоматичної діагностики вимірювань.

### 1.6.8. Недостатня підтримка автономного режиму роботи

Частина операцій залишається вручну керованими: WOB-RPM optimization, корекція тиску розчину, контроль траєкторії.

Людський фактор все ще суттєво впливає на якість роботи системи.

Нижче подано зведену таблицю 1.3 недоліків сучасних систем автоматичного керування процесом буріння.

Таблиця 1.3

#### Недоліки сучасних систем автоматичного керування процесом буріння

Недолік	Суть проблеми	Наслідки для процесу буріння
Обмежена адаптивність	Системи працюють за фіксованими PID-алгоритмами, що не враховують зміну геолого-технічних умов	Запізнілі реакції, нестабільність параметрів, збільшення ризику ускладнень
Неопрацьованість нелінійності та стохастичних збурень	Вібрації, стрибки-ковзання, різкі зміни параметрів не компенсуються традиційними регуляторами	Зменшення механічної швидкості буріння (ROP), прискорений знос долота
Недостатнє прогнозування аварійних ситуацій	Системи реагують постфактум і не мають моделей прогнозування	Підвищена вірогідність прихватів, викидів, втрати циркуляції
Обмежена інтеграція з цифровими моделями та аналітикою	Відсутність повної підтримки цифрових двійників, машинного навчання та big data	Неможливість оптимізації режимів буріння у реальному часі
Слабкі можливості придушення вібрацій	Регулятори не компенсують крутильні, поперечні та осьові коливання	Погана стабільність буріння, додаткові аварійні ризику

Продовження таблиці 1.3

Недолік	Суть проблеми	Наслідки для процесу буріння
Висока вартість впровадження інтелектуальних систем від світових компаній	Потребують дорогого ПЗ, сервісу та навчання персоналу	Обмеження використання в реальних виробничих умовах
Залежність від якості сенсорів та похибок вимірювань	Дані містять шум, пропуски, запізнення; немає фільтрації	Нестабільна робота регуляторів, помилки у прийнятті рішень
Неповна автономність систем	Багато режимів потребують ручного втручання оператора	Збереження ризику «людського фактору», несвоєчасні корекції

Таким чином, сучасні системи автоматичного керування процесом буріння, хоча й забезпечують підвищення безпеки та точності регулювання, мають низку недоліків, пов'язаних із низькою адаптивністю, недостатнім прогнозуванням, слабкою інтегрованістю з цифровими технологіями та високою вартістю впровадження. Це зумовлює необхідність створення нових інтелектуальних систем, здатних до самоадаптації, прогнозування та роботи з великими масивами даних у складних геологічних умовах.

### 1.7. Потреба у створенні інтелектуальної системи керування

Складні геолого-технічні умови Західного нафтогазоносного регіону України, що характеризуються значною варіабельністю фізико-механічних властивостей порід, нестійкістю стінок свердловини, аномальними тисками та високою частотою ускладнень, створюють підвищені вимоги до систем керування процесом буріння. Розглянуті у попередніх підрозділах сучасні системи автоматичного керування демонструють певні досягнення, однак їх функціональні можливості істотно обмежені у контексті складних та швидкозмінних умов Карпатського регіону.

Традиційні PID-регулятори, що лежать в основі більшості промислових рішень, орієнтовані на роботу в умовах квазістаціонарних процесів. Вони не забезпечують достатньої адаптивності при різких змінах параметрів, властивих переходам між пластами, тріщинуватим та слабкоцементованим породам. У

результаті автоматизація буріння часто виявляється реактивною, тобто спрямованою на корекцію відхилень після їх виникнення, а не на їх попередження.

Однією з ключових проблем є відсутність прогнозного компоненту. Сучасні системи не здатні своєчасно розпізнавати наближення до аварійних режимів, таких як прихвати, втрата циркуляції чи газонафтоводопрояви. Брак можливостей аналізу великих масивів даних буріння (surface drilling data, MWD/LWD), врахування їх часових залежностей і кореляцій значно знижує ефективність прийняття рішень у реальному часі.

Крім того, процес буріння характеризується високою нелінійністю, стохастичністю та наявністю складних динамічних взаємозв'язків між параметрами (WOB, RPM, Torque, рівень вібрацій, тиск та витрата бурового розчину). У таких умовах традиційні системи керування не забезпечують стабільної роботи, що проявляється в нестійких режимах (stick-slip, bit-bounce), погіршенні механічної швидкості буріння та зростанні зносу долота.

З огляду на ці обмеження зростає потреба у впровадженні інтелектуальної системи керування, яка здатна:

- адаптуватися в реальному часі до змін геологічних умов;
- використовувати дані поверхневих і підземних сенсорів (MWD/LWD) для прогнозування поведінки свердловини;
- застосовувати алгоритми машинного навчання, нечіткої логіки та адаптивного керування;
- знижувати ризики аварій за рахунок прогнозу критичних станів;
- оптимізувати режими WOB, RPM та витрату бурового розчину на основі цифрового двійника процесу;
- зменшувати вібраційні режими шляхом активного придушення коливань бурильної колони;
- мінімізувати непродуктивний час (NPT) та підвищувати кінцеву ефективність буріння.

Інтелектуальна система керування забезпечить перехід від класичної концепції “*регулювання за відхиленням*” до нової концепції “*прогнозно-адаптивного керування*”, яка відповідає вимогам Індустрії 4.0 та сучасних цифрових технологій у нафтогазовій галузі.

Таким чином, створення інтелектуальної системи автоматичного керування процесом буріння є не лише актуальним науковим завданням, але й необхідною умовою підвищення продуктивності, безпеки та економічної ефективності бурових робіт у складних гірських умовах Західної України.

## **Висновки до розділу 1**

У розділі 1 проведено комплексний аналіз технологічного процесу буріння свердловин у гірських умовах Західної України та визначено його особливості як об’єкта автоматизації. Встановлено, що геолого-технічні умови Карпатського регіону відзначаються складною тектонічною будовою, значною тріщинуватістю, різкими змінами фізико-механічних властивостей порід та наявністю аномальних пластових тисків. Такі фактори формують високу ймовірність технологічних ускладнень і значною мірою ускладнюють підтримання стабільних режимів буріння.

Проаналізовано основні технологічні параметри процесу буріння, що підлягають контролю й автоматичному регулюванню. До них належать осьове навантаження на долото, частота обертання, крутний момент, витрата та тиск бурового розчину, а також вібраційні та динамічні режими бурильної колони. Показано, що високий ступінь нелінійності та взаємозалежності цих параметрів зумовлює необхідність застосування складних систем автоматизації.

Установлено основні проблеми та ускладнення, характерні для буріння в Карпатському регіоні: прихвати бурильного інструменту, осипання й обвали стінок свердловини, недостатнє очищення вибою, прояви пластових флюїдів, вібраційні режими та нестабільність тиску. Їх виникнення підтверджує, що

традиційні підходи до керування не забезпечують повної надійності та безпеки ведення робіт у подібних умовах.

Проаналізовано сучасні системи автоматичного керування процесом буріння, включно з PID-регуляторами, інтегрованими топ-драйв системами, цифровими платформами DrillOps™, NOVOS™ та засобами SCADA-моніторингу. Виявлено, що хоча ці системи забезпечують автоматизацію базових операцій, їх функціональність є недостатньо адаптивною для умов із високою мінливістю геологічних параметрів.

Виявлені недоліки сучасних АСК — низька адаптивність, слабе врахування нелінійних і стохастичних процесів, відсутність прогнозного компонента, недостатня інтеграція з цифровими моделями та залежність від якості сенсорних даних — стали підставою для обґрунтування потреби у створенні інтелектуальної системи керування.

Отже, за результатами аналізу встановлено, що ефективне та безпечне ведення бурових робіт у гірських умовах Західної України потребує впровадження інтелектуальної автоматизованої системи керування, здатної адаптувати режими буріння у реальному часі, прогнозувати виникнення небезпечних ситуацій та мінімізувати технологічні ризики. Саме це визначає стратегічну важливість подальших досліджень у напрямку розроблення інтелектуальної АСК процесом буріння.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

#### 2.1. Поняття інтелектуальної автоматизованої системи керування

Інтелектуальна автоматизована система керування (ІАСК) – це система, що поєднує класичні методи автоматичного регулювання з сучасними алгоритмами штучного інтелекту, машинного навчання, нечіткої логіки, цифрових моделей та адаптивної аналітики для забезпечення прогнозно-адаптивного керування технічним об'єктом у реальному часі.

На відміну від традиційних АСК, інтелектуальні системи характеризуються такими властивостями (рис.2.1):



Рис.2.1. Інтелектуальна автоматизована система керування (ІАСК)

- адаптивність – автоматичне підлаштування параметрів регуляторів до мінливих умов;
- прогнозування – використання моделей для передбачення динаміки об'єкта;
- самонавчання – накопичення та аналіз історичних даних для підвищення точності;
- робастність – стійкість до шумів, збурень і похибок сенсорів;
- контекстність – урахування зовнішніх і внутрішніх факторів процесу.

Застосування інтелектуальних систем у бурінні зумовлене високою нелінійністю процесу, стохастичністю поведінки порід та значною варіабельністю технологічних параметрів.

## 2.2. Структура інтелектуальної системи керування технологічним процесом

Інтелектуальна система керування процесом буріння (ІСКПБ) є комплексною багаторівневою системою, призначеною для забезпечення безпечного, стабільного та енергоефективного управління технологічними параметрами буріння у реальному часі. Особливістю буріння у складних геологічних умовах Західного нафтогазового регіону України є висока мінливість фізико-механічних властивостей гірських порід, наявність тріщинуватих зон, поглинень, а також ризик раптових проявів пластових флюїдів. Це зумовлює необхідність впровадження адаптивних та інтелектуальних методів керування, здатних реагувати на зміни умов формування у реальному часі.

На рис.2.2 зображена узагальнена архітектура інтелектуальної системи керування технологічним процесом. Структура складається з декількох логічних рівнів, які взаємодіють між собою для забезпечення оптимального, безпечного та адаптивного керування.



Рис. 2.2. Узагальнена архітектура ІСК технологічним процесом

Структура ІСКПБ включає шість функціональних рівнів: технологічний рівень, рівень сенсорики, комунікаційно-інформаційний рівень, інтелектуальний аналітичний рівень, керувальний рівень і виконавчий рівень. Взаємодія цих рівнів забезпечує формування замкненого адаптивного контуру регулювання параметрів буріння.

### 2.2.1. Технологічний рівень (буровий процес як об'єкт керування)

Об'єктом керування виступає комплекс бурового обладнання та процесів: топ-драйв або ротор, насосні агрегати, система циркуляції бурового розчину, долото, бурова колона та привибійна зона. Основними технологічними параметрами, що підлягають регулюванню, є (рис.2.3):

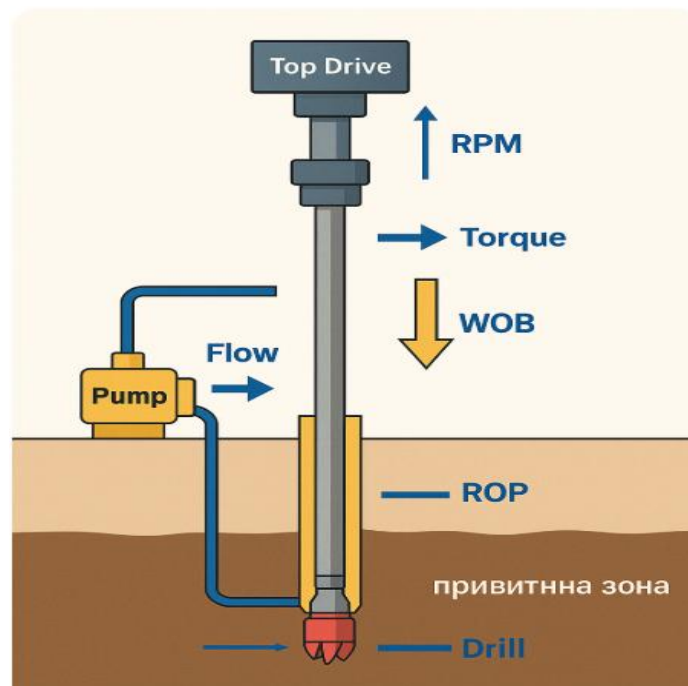


Рис.2.2. Об'єкт керування

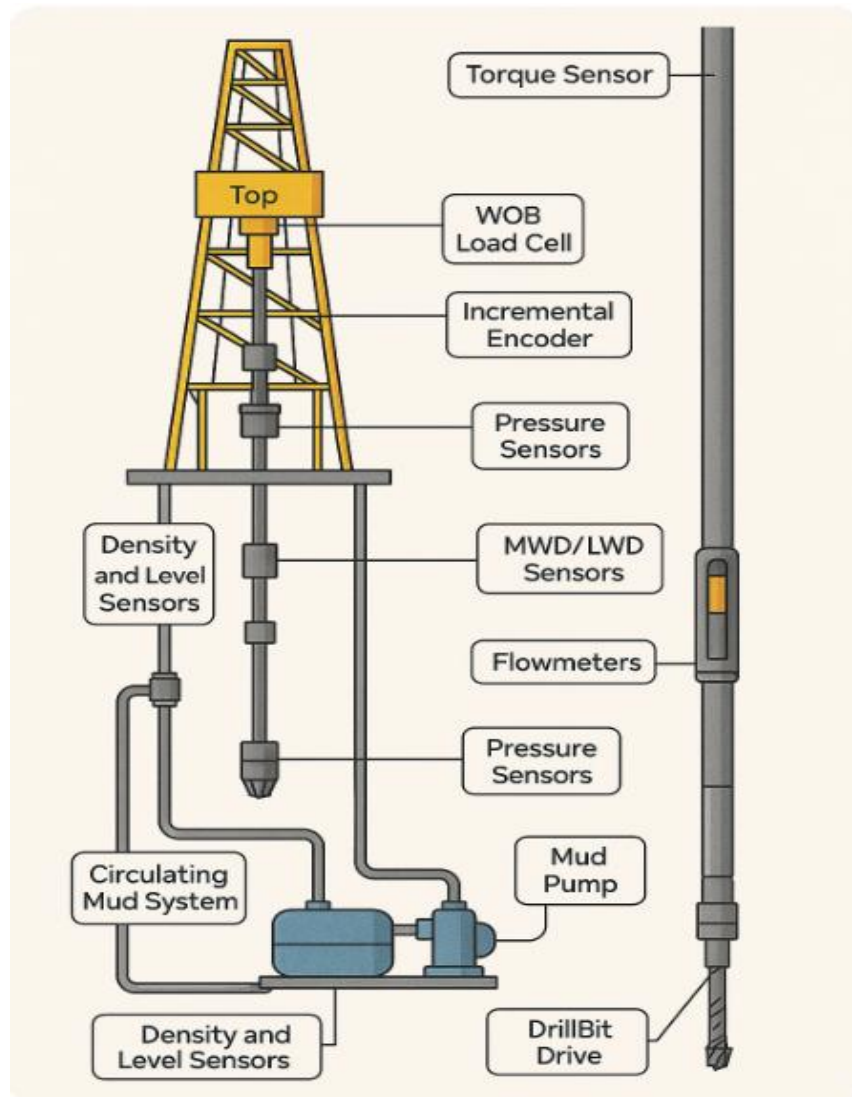
- осьове навантаження на долото (WOB);
- частота обертання бурової колони (RPM);
- крутний момент на валу топ-драйву (Torque);
- витрата промивальної рідини та тиск у свердловині;
- швидкість механічного проходження (ROP).

Динаміка цих параметрів залежить від властивостей порід, гідравлічних умов та режимів роботи обладнання. Нестабільність або неконтрольовані зміни

технологічних параметрів можуть призвести до аварій, наприклад, прихоплення колони, газонафтових проявів або руйнування долота.

### 2.2.2. Рівень сенсорики та польових вимірювань

На цьому рівні формується первинна інформація про стан бурового процесу. Використовуються датчики (рис.2.4):



Top – верх; Torque Sensor – датчик крутного моменту; WOB Load Cell – датчик осевого навантаження на долото; Incremental Encoder – Інкрементальний енкодер; Pressure Sensor – датчик тиску; Flowmeters – витратоміри; Mud Pump – насос для подачі бурового розчину; Density and Level Sensors – Датчики густини та важільні датчики; Circulating Mud System – система циркуляційного розчину; DrillBit Drive – привід бурильного долота

Рис.2.4.Датчики (сенсори) та польові вимірювання

- датчики осевого навантаження (WOB Load Cells);

- інкрементальні енкодери частоти обертання;
- датчики крутного моменту;
- датчики тиску у стояку та затрубному просторі;
- витратоміри бурового розчину;
- датчики щільності та рівня у циркуляційній системі;
- MWD/LWD-системи (параметри привибійної зони в реальному часі).

Первинні сигнали піддаються фільтрації, нормуванню, компенсації температурних та динамічних похибок. Достовірність даних є ключовою умовою для роботи інтелектуальних модулів.

### 2.2.3. Інформаційно-комунікаційний рівень (PLC–SCADA комплекс)

Програмовані логічні контролери (Siemens S7-1200/1500, Schlumberger iPason, National Oilwell Varco NOV RigSense) здійснюють збір і попередню обробку даних із датчиків (рис.2.5). SCADA-система бурової установки виконує:

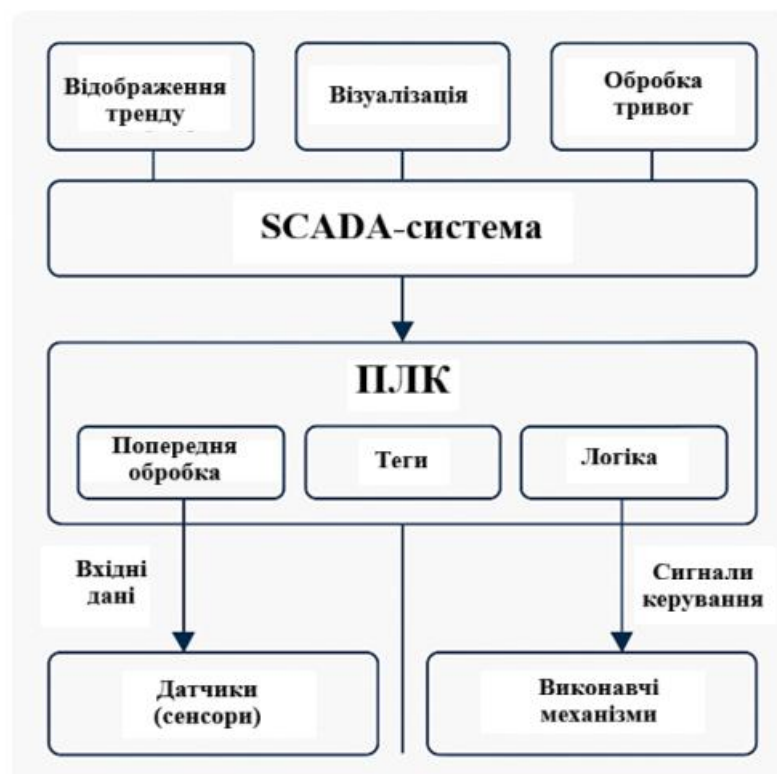


Рис.2.5. Інформаційний PLC–SCADA комплекс

- архівування параметрів у часовому розрізі;
- візуалізацію режимів роботи;

- відображення трендів WOB, RPM, Torque, Flow, ROP;
- сигналізацію небезпечних режимів (свистки, скачки тиску, відхилення обертів);
- взаємодію оператора зі станком управління.

Надійна передача даних у реальному часі забезпечує основу для роботи адаптивних моделей.

#### 2.2.4. Інтелектуальний рівень (аналітика, прогнозування, оптимізація)

Цей рівень формує «інтелект» системи та забезпечує підвищену автономність керування. Він включає кілька ключових модулів (рис.2.6).

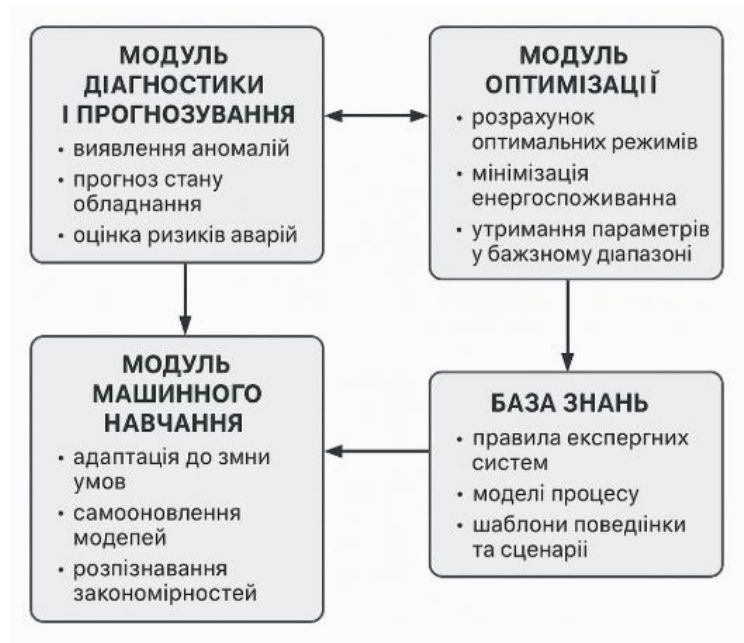


Рис.2.6. Інтелектуальний рівень (аналітика, прогнозування, оптимізація)

##### 2.2.4.1. Модуль діагностики і раннього виявлення аномалій

За допомогою методів машинного навчання, статистичної діагностики та спектрального аналізу виконується:

- виявлення прихоплень на ранній стадії;
- прогноз поглинань та проявів;
- аналіз вібрацій топ-драйву та колони;
- діагностика виникнення stick-slip і bit-bounce осциляцій.

Модуль дозволяє зменшити аварійність та попереджати критичні ситуації.

#### **2.2.4.2. Модуль оптимізації режимів буріння**

Реалізує алгоритми:

- оптимального керування WOB і RPM;
- максимізації ROP із обмеженням за допустимим навантаженням;
- гідравлічної оптимізації циркуляційної системи;
- зменшення енергоспоживання насосів і топ-драйву.

У модулі застосовуються MPC-регулятори, моделі бурового процесу, цифровий двійник свердловини.

#### **2.2.4.3. База знань і модуль машинного навчання**

Система накопичує історичні дані буріння, каталоги порід, профілі свердловин, параметри доліт. Моделі машинного навчання адаптують регулятори до:

- зміни літології;
- переходу між пластами;
- появи гідродинамічних збурень.

Таким чином система постійно самооновлює моделі процесу.

#### **2.2.5. Рівень керування (Control Layer)**

Цей рівень формує безпосередні сигнали керування на основі даних інтелектуальних модулів. Використовуються:

- PID-регулятори (RPM, Flow, Pressure);
- адаптивні регулятори WOB;
- Fuzzy-регулятори ROP;
- MPC-регулятори для складних багатозв'язних контурів.

Ціль — забезпечити стабільний режим буріння, уникнути вібрацій та перевантажень, знизити ризик аварій та підвищити швидкість проходження.

#### **2.2.6. Виконавчий рівень (Actuator Layer)**

Виконавчі механізми перетворюють керувальні дії у фізичні зміни:

- електропривод топ-драйву;
- гідравлічні регулятори WOB;
- частотні перетворювачі насосів;
- клапани дроселювання бурового розчину;
- регулятори тиску та витрати.

Сигнали керування повертаються у систему через датчики, формуючи замкнений контур регулювання.

Отже структура інтелектуальної системи керування процесом буріння забезпечує комплексний підхід до автоматизації бурових робіт у складних геологічних умовах. Впровадження інтелектуальних модулів діагностики, прогнозування та оптимізації режимів буріння дозволяє зменшити ризики прихопелень, проявів та поглинань, підвищити швидкість механічного проходження та покращити енергоефективність бурової установки. Така архітектура є важливим елементом переходу до концепції цифрового буріння (Digital Drilling) та створення цифрових двійників свердловин, що дозволяє підвищити рівень автоматизації та безпеки в нафтогазовій галузі.

### **2.3. Математичні основи моделювання процесу буріння**

Буріння є багатофакторним нелінійним процесом, де основні залежності описуються:

#### **2.3.1. Механічна модель руйнування породи**

Механічна швидкість буріння (ROP) може описуватися моделями:

- модель Bourgoyne & Young (Бургуан і Янг)
- модель механічної енергії (MSE)
- експериментальні регресійні моделі

Приклад узагальненої залежності:

$$ROP = f(WOB, RPM, Torque, Bit \setminus Type, UCS)$$

### 2.3.2. Гідравлічні моделі циркуляційної системи

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

- втрати тиску в кільцевому просторі;
- ефективність винесення шламу;
- моделі Herschel–Bulkley та Bingham (Гершель-Балклі та Бінгем)

### 2.3.3. Динаміка бурильної колони

Передається через систему диференціальних рівнянь:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{drive} - T_{bit} - T_{friction} \quad (2.1)$$

де,

$J$  – момент інерції,

$\omega$  – кутова швидкість,

$T_{drive}$  – момент приводу,

$T_{bit}$  – момент на долоті,

$T_{friction}$  – момент тертя.

Ураховуються режими:

- stick-slip (стрип-ковзання);
- bit-bounce; (біт- відскок)
- whirl (вихор).

Запишемо рівняння (2.1) у вигляді передавальної функції між вхідними моментами та кутовою швидкістю. Для цього запишемо це рівняння у формі Коші:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (T_{drive} - T_{bit} - T_{friction})$$

Перейдемо у перетворення за Лапласом:

$$\Omega(s) = \frac{1}{Js} (T_{drive} - T_{bit} - T_{friction})$$

Отримаємо динаміку «буріння  $\rightarrow$  ROP» у вигляді передавальної аперіодичної ланки 2-го порядку:

$$G_{ROP}(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (2.2)$$

де:

$K = 0,8$  – коефіцієнт підсилення;

$T = 8$  с,  $T_2 = 25$  с – постійні часу (інерційність системи WOB/RPM  $\rightarrow$  ROP).

Підставляємо ці значення у вираз (2.2), отримуємо:

$$G_{ROP}(s) = \frac{0,8}{(8s + 1)(25s + 1)} = \frac{0,8}{200s^2 + 33s + 1} \quad (2.3)$$

Дослідження передавальної функції (2.3) показано в п.2.4.

## 2.4. Часові та частотні характеристики передавальної функції об'єкта керування в MATLAB

В командному вікні MATLAB вводимо передавальну функцію (2.3):

```
>> G=tf([0.8],[200 33 1])
G =
      0.8
-----
200 s^2 + 33 s + 1
Continuous-time transfer function.
```

### 2.4.1. Побудова та аналіз перехідної характеристики

Зображений графік на рис. 2.1 є перехідною характеристикою (step response) передавальної функції динамічної системи процесу буріння на одиничний стрибок вхідного сигналу. Крива відображає зміну вихідної величини в часі після прикладення ступінчастого впливу.

#### 1) Форма кривої

Крива має типовий вигляд аперіодичного першого або другого порядку:

- система повільно розганяється від 0,
- швидкість зростання найбільша в першій третині процесу,

- надалі темп наростання зменшується,
- крива асимптотично наближається до усталеного значення.

### 2) Усталене значення

Графік показує, що вихід приймає усталене значення приблизно на рівні 0,8. Це означає, що передатна функція або масштаб системи має коефіцієнт підсилення  $K < 1$ , тому одиничний вхід дає вихід нижче 1.

```
>> step(G)
```

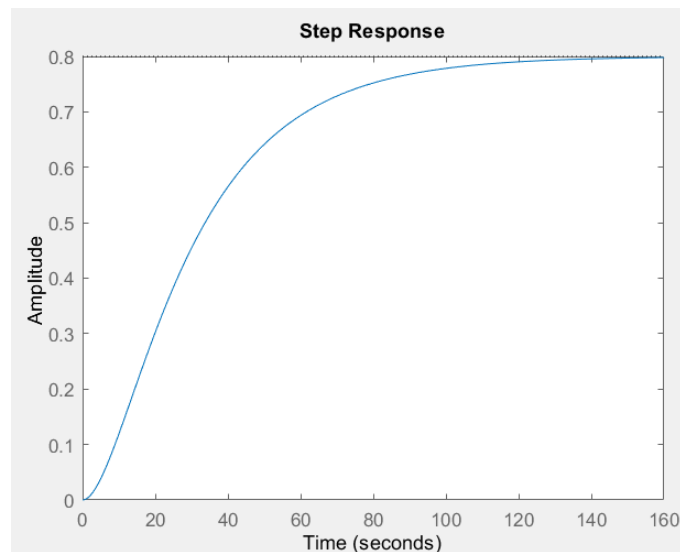


Рис. 2.1. Перехідна характеристика

### 3) Характер інерційності

Час виходу на усталений режим становить приблизно 120–140 секунд, що свідчить про велику постійну часу системи. Такий тип поведінки характерний для бурових процесів із суттєвою механічною інерцією.

### 4) Динамічні показники

Оцінено візуально:

- Час наростання (10–90%):  $\approx 0 \dots 100$  с
- Час встановлення (2–5%):  $\approx 130 \text{--} 150$  с
- Перерегулювання відсутнє, тобто система є аперіодичною і стійкою.

### 5) Фізичне трактування

Крива демонструє, що система:

- повільна (інерційна),
- стабільна, без коливань,

- реагує на зміни плавно,
- має значний час для виходу на робочий режим.

Такі характеристики є типовими для реальних об'єктів буріння регулювання навантаження, моменту, витрати бурового розчину.

#### 2.4.2. Побудова та аналіз імпульсної характеристики системи

Зображений графік (рис.2.2) представляє імпульсну перехідну характеристику (Impulse Response) динамічної системи, яка показує реакцію виходу на короткочасний одиничний імпульс вхідного сигналу. Імпульсна характеристика є похідною від перехідної (step response) і відображає внутрішні динамічні властивості об'єкта.

```
>> impulse(G)
```

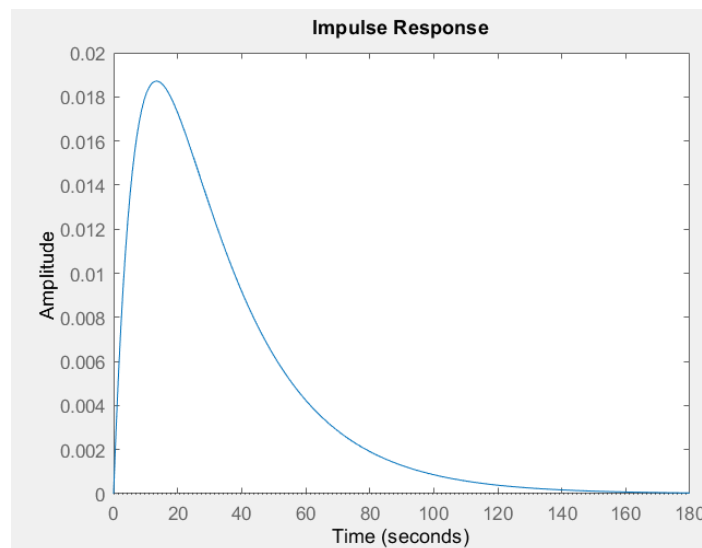


Рис. 2.2. Імпульсна перехідна характеристика

##### 1) Загальна форма кривої

Крива має типову форму аперіодичної згасаючої реакції, характерної для систем першого або другого порядку з реальними полюсами:

- на початку відбувається швидке зростання, що досягає максимуму приблизно на  $t \approx 15\text{--}20$  с;
- після пікового значення амплітуда починає спадати;
- спад є експоненціально монотонним, без коливань;
- система повертається до нульового рівня після  $\approx 120\text{--}160$  с.

### 2) Максимальне значення амплітуди

Пікова амплітуда становить приблизно:

$$A_{\max} \approx 0.018.$$

Це дуже мала величина, що характерно для систем із великим часом реакції та малим коефіцієнтом підсилення.

### 3) Трактуювання характеру згасання

Згасання відбувається повільно, що свідчить про:

- значну інерційність об'єкта (велика постійна часу),
- стабільність системи (усі полюси — у лівій півплощині),
- низьку швидкість внутрішніх процесів (теплові, гідравлічні, механічні із великим моментом інерції).

Така динаміка характерна для механічних процесів буріння з великою масою та інерцією.

### 4) Часові параметри

Оцінено за графіком:

- Час досягнення пікового значення:  $t_p \approx 15-20$  с
- Період ефективної дії імпульсу:  $\Delta t \approx 100$  с
- Повне згасання реакції:  $\approx 150-170$  с

### 5) Фізичний зміст

Імпульсна характеристика показує, що система:

- відгукується швидко, але не має коливань,
- демонструє монотонну стабільну реакцію, характерну для процесів дифузійного або теплового типу,
- має одну домінуючу постійну часу, яка визначає експоненційне згасання.

Такі властивості притаманні реальним буровим, насосним і тепловим процесам, де інерційність значно переважає над коливальними факторами.

## 2.4.3. Побудова та аналіз частотних характеристик (Bode-діаграми)

Графік (рис.2.3) складається з двох частин — амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) та фазо-частотної характеристики (ФЧХ), які

відображають частотну поведінку динамічної системи. Крива має вигляд типової реакції інерційної аперіодичної системи першого або другого порядку.

Низькі частоти ( $10^{-3} - 10^{-2}$  рад/с): амплітуда знаходиться на рівні 0 dB; це свідчить, що система добре пропускає повільні зміни сигналу (квазістатичні процеси).

```
>> bode(G)
```

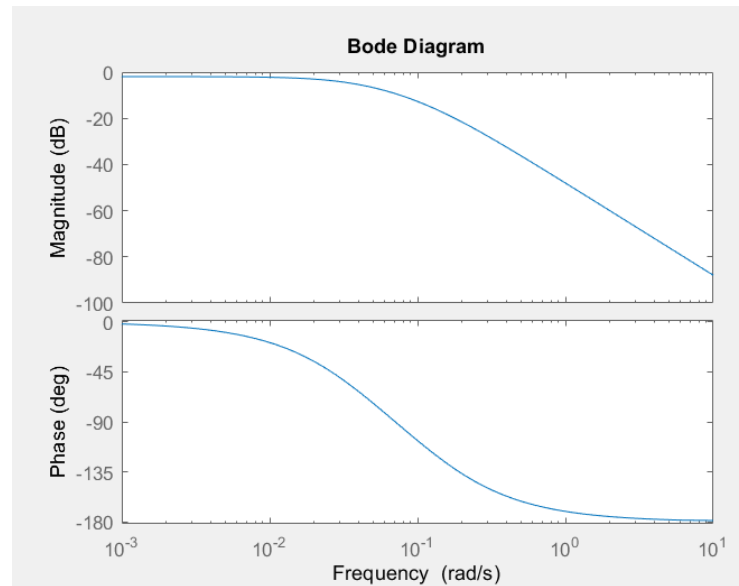


Рис. 2.3. Частотні характеристики (АЧХ і ФЧХ)

#### 2.4.3.1. Амплітудно-частотна характеристика (Magnitude, dB)

Середні частоти ( $10^{-2} - 10^0$  рад/с): спостерігається перелом (break frequency) – точка, де починається спад амплітуди; лінійна ділянка має нахил приблизно  $-20$  dB/dec або  $-40$  dB/dec, залежно від порядку системи. Це характерно для систем типу low-pass (фільтр низьких частот).

Високі частоти (понад 1 рад/с): амплітуда падає до  $-60...-80$  dB, що означає сильне пригнічення швидких змін; система різко зменшує вплив високочастотних коливань (збурень).

#### 2.4.3.2. Фазо-частотна характеристика (Phase, deg)

Низькі частоти: Фаза починається близько  $0^\circ$  — типowo для статичних або повільних систем.

Середні частоти: фаза зменшується до  $-45\dots-90^\circ$ , залежно від динамічного порядку; плавне падіння фази без коливань підтверджує, що система аперіодична.

Високі частоти: фаза наближається до  $-180^\circ$ , що характерно для систем другого порядку або для першого порядку з великим запізненням.

#### 2.4.4. Побудова та аналіз Nyquist-діаграми

Зображений графік (рис.2.4) представляє Nyquist-плоску динамічної системи у комплексній площині. Діаграма відображає зміну значень комплексної частотної характеристики  $G(j\omega)$  при зміні частоти від  $\omega = 0$  до  $\omega = \infty$  (АФХ).

Крива має типову форму аперіодичної стійкої системи другого порядку, що не перетинає критичну точку  $(-1,0)$ .

```
>> nyquist(G)
```

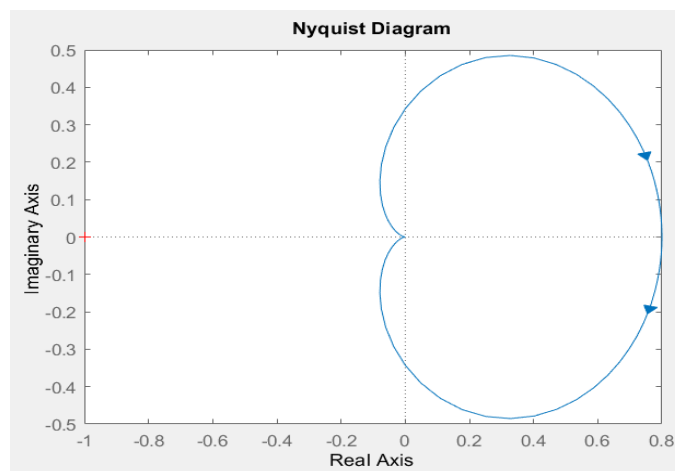


Рис.2.4. Частотна характеристика (АФХ)

##### 1) Загальна форма діаграми

- Крива формує замкнений контур, схожий на деформовану петлю, яка лежить повністю від  $\text{Re} = 0$  до  $\text{Re} \approx +0,8$ .
- Контур повністю знаходиться у правій півплощині, що свідчить про високу запасність системи.

- Вісь напрямку (стрілки) показує, що обхід відбувається за годинниковою стрілкою, як це типово для Nyquist-побудови.

### 2) Реальна частина (Real Axis)

- Максимальне значення  $Re \approx +0.8$ , мінімальне близько 0.
- Жодна частина траєкторії не потрапляє в область  $Re < 0$ .
- Це означає, що система не має полюсів у правій півплощині, а її частотний відгук домінує інерційними характеристиками.

### 3) Уявна частина (Imaginary Axis)

- Уявна компонента змінюється приблизно в межах від  $-0.45$  до  $+0.45$ .
- Крива симетрична відносно горизонтальної осі (оскільки частотна характеристика для  $(G(-j)\omega)$  є комплексно спряженою).

### 4) Точка $(-1, 0)$ — критерій стійкості Найквіста

На графіку видно критичну точку  $(-1, 0)$  – вона позначена маленькою червоною крапкою.

Згідно критерію Найквіста: система стійка, якщо контур не охоплює точку  $(-1, 0)$ .

У даному випадку: контур не наближається до цієї точки; система не робить жодного охоплення критичної точки.

Отже, система є абсолютно стійкою з великим запасом за модулем і фазою.

### 5) Інтерпретація для технологічних систем буріння

Такі Nyquist-петлі характерні для:

- інерційних гідравлічних систем (напір, витрата),
- теплових процесів (повільна реакція, без коливань),
- механічних систем із великим моментом інерції (топ-драйв, обертання колони),
- процесів регулювання навантаження на долото,
- бурових систем з аперіодичною, монотонною динамікою.

Поведінка кривої вказує, що: система легко піддається стабілізації; PID-регулятор працюватиме стійко навіть при розширеному діапазоні налаштувань; запас стійкості є дуже високим.

б) Узагальнений висновок.

Nyquist-діаграма (АФХ) показує: відсутність коливальних режимів; чітку аперіодичну динаміку; значний запас стійкості; повну відсутність ризиків потрапляння в нестійкість; поведінку, характерну для low-pass систем першого або другого порядку.

## 2.5. Нечіткі системи керування в бурінні

Нечітка логіка дозволяє описувати складні залежності у формі правил [26].

Структура нечіткої системи (рис.2.5):

1. fuzzification - фазифікація;
2. rule base (IF–THEN) – база правил (ЯКЩО – ТОДІ);
3. inference engine – механізм логічного висновку (Mamdani/Takagi–Sugeno);
4. defuzzification - дефазифікація.

Приклад правила:

IF Torque  $\uparrow$  AND RPM  $\downarrow$  THEN reduce WOB significantly.

Це дозволяє компенсувати stick-slip без жорстких PID-налаштувань.

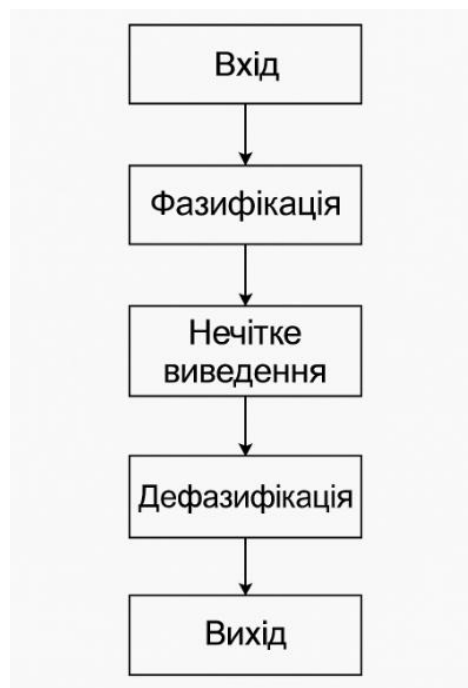


Рис.2.5.Структура нечіткої системи

## **2.6. Вимоги до інтелектуальної системи керування процесом буріння**

Інтелектуальна АСК повинна забезпечувати:

- 1) адаптивність і самоналаштування;
- 2) модульність (ML-модулі, SCADA-інтеграція);
- 3) високу швидкість при обробці даних;
- 4) стійкість до шумів та пропусків;
- 5) захист від аварійних режимів;
- 6) інтерпретованість рішень (explainable AI);
- 7) сумісність із PLC, SCADA та MWD/LWD;
- 8) можливість роботи у напівавтономному або автономному режимі.

### **Висновки до розділу 2**

У другому розділі обґрунтовано теоретичні засади побудови інтелектуальних систем керування технологічним процесом буріння, що є основою для формування високоефективних, автономних та адаптивних систем автоматизації. Розглянуто ключові властивості інтелектуальних АСК, які поєднують традиційні методи регулювання з алгоритмами штучного інтелекту, машинного навчання та цифрового моделювання. Показано, що такі системи здатні працювати у середовищі з високою невизначеністю, характерною для складних геологічних умов Західного нафтогазового регіону.

Проаналізована багаторівнева структура інтелектуальної системи керування бурінням, яка включає технологічний, сенсорний, комунікаційний, інтелектуальний, керувальний та виконавчий рівні. Такий підхід забезпечує формування замкненого контуру регулювання з можливістю ранньої діагностики аномалій, прогнозування поведінки процесу та оптимізації режимів буріння. Окрему увагу приділено ролі інтелектуальних модулів – діагностики, оптимізації, машинного навчання – які забезпечують самонавчання та адаптацію системи до зміни геологічних умов.

Наведені математичні моделі буріння (механічні, гідравлічні, динамічні) дозволяють відтворити фізичну природу процесу та описати його у вигляді передавальних функцій. Аналіз часових і частотних характеристик підтвердив, що об'єкт буріння має аперіодичну інерційну поведінку з великим запасом стійкості, що є важливим для синтезу регуляторів. Дослідження імпульсних, перехідних, Bode- та Nyquist-характеристик показало здатність системи до стабільної та передбачуваної реакції на збурення, що полегшує вибір налаштувань PID, Fuzzy та MPC-регуляторів.

Розглянуто принципи побудови нечітких систем керування, які дозволяють ефективно регулювати параметри процесу при невизначеності та нелінійності, зокрема компенсувати такі явища, як стрижневе ковзання і відскок долота (підстрибування долота). Визначено вимоги до сучасної інтелектуальної АСК буріння, що включають адаптивність, модульність, сумісність із промисловими PLC/SCADA-системами, стійкість до шумів і можливість автономної роботи.

Узагальнюючи, розділ доводить, що інтеграція математичного моделювання, інтелектуальної аналітики та багаторівневої архітектури керування створює передумови для формування високоефективної, стійкої та безпечної інтелектуальної системи керування бурінням, що відповідає сучасним вимогам цифровізації нафтогазової галузі.

## РОЗДІЛ 3

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА СИНТЕЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ

#### 3.1. Загальні принципи математичного моделювання та постановка задачі

Процес буріння свердловин у складних геолого-технічних умовах Карпатського регіону характеризується високою динамічністю, багатозв'язністю та нелінійністю. Для створення інтелектуальної системи керування необхідно побудувати адекватну математичну модель, що описує взаємодію механічних, гідравлічних, вібраційних та геомеханічних процесів.

##### 3.1.1. Структура об'єкта моделювання

Об'єкт керування складається з таких підсистем:

- механічна підсистема – долото, бурильна колона, топ-драйв;
- гідравлічна підсистема – циркуляційна система, буровий насос, промивальний розчин;
- геомеханічна підсистема – порода, міцність, UCS, тиск у пластах;
- інформаційно-вимірювальна підсистема – WOB, RPM, Torque, P, Q, MWD/LWD.

##### 3.1.2. Загальна математична постановка

Процес буріння представляється системою:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t), p(t), d(t)), \quad y(t) = g(x(t))$$

де:

$x(t)$  – вектор станів (вібрації, кутова швидкість, гідравлічні параметри),

$u(t)$  – керуючі дії (WOB, RPM, Q),

$p(t)$  – параметри порід (UCS, пористість, проникність),

$d(t)$  – збурення (перехід між пластами, температурні зміни),

$y(t)$  – вимірювані величини.

### 3.2. Механічна модель руйнування породи

Найважливішим елементом є модель ROP (механічної швидкості буріння). Її точність визначає можливість оптимізації WOB та RPM.

#### 3.2.1. Модель Bourgoyne–Young

Узагальнена форма:

$$ROP = f_1(WOB) f_2(RPM) f_3(UCS) f_4(P_{eff}) f_5(hole, cleaning)$$

#### 3.2.2. Модель механічної енергії (MSE)

Широко використовується у сучасних АСК:

$$MSE = \frac{WOB}{A} + \frac{120\pi \cdot Torque \cdot RPM}{A \cdot ROP}$$

де  $A$  – площа долота.

В нашому випадку:

При  $WOB = 60$  кН,  $Torque = 10$  кН·м,  $RPM = 120$  об/хв та  $ROP = 6$  м/год  $\rightarrow MSE = 18,1$  МПа.

Це дозволяє оцінити твердість породи в реальному часі.

### 3.3. Модель гідравліки циркуляційної системи

Гідравлічні процеси впливають на:

- очищення вибою;
- стабілізацію тисків;
- попередження газонафтоводопроявів.

#### 3.3.1. Рівняння втрат тиску

Для моделі Herschel–Bulkley (Гершель-Балклі):

$$\Delta P = \frac{2L}{D} (\tau_y + K\gamma^n)$$

Рівняння використовується для прогнозування тиску на вибої та оптимізації витрати  $Q$ .

### 3.3.2. Приклад реальних параметрів розчину

Реальні параметри розчину показані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Реальні параметри бурового розчину

Параметр	Значення
Густина, $\rho$	1,20 г/см <sup>3</sup>
В'язкість пластична	30 сП
Межа текучості	15 Па
Витрата, $Q$	28–34 л/с

На їх основі виконується моделювання циркуляції бурового розчину.

## 3.4. Модель динаміки бурильної колони

### 3.4.1. Крутильні коливання (торсійна модель)

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_d - T_b - T_f(\omega)$$

Прилипання-ковзання виникає при:

$$|\omega_{rotor} - \omega_{bit}| > \omega_{crit}$$

### 3.4.2. Осьові коливання

Описуються рівняннями:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F_{WOB}(t)$$

### 3.4.3. Поперечні коливання

Спрощена математична модель поперечних коливань

Найпростіша модель – одномасовий консольний вал у поперечному напрямку:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_{збур}(t)$$

де,

$m$  – приведена маса частини бурильної колони;

$c$  – коефіцієнт демпфування (в'язкість бурового розчину, втрати в матеріалі);

$k$  – радіальна жорсткість системи «колона–стінка свердловини»;

$y(t)$  – поперечне відхилення;

$F_{збур}(t)$  – збурююча сила (неврівноваженість, контакт зі стінкою, флуктуації потоку тощо).

У зображеннях Лапласа - (без деталізації збурення):

$$ms^2Y(s) + csY(s) + kY(s) = F_{збур}(s),$$

$$\Rightarrow \frac{Y(s)}{F} = \frac{1}{ms^2 + cs + k}$$

Це передавальна функція поперечних коливань (whirl) від радіальної збурюючої сили до поперечного зміщення.

Якщо враховувати обертання вала з кутовою швидкістю  $\Omega$ , в рівняння додають терміни типу центрифугальних і гіроскопічних сил, і характерне явище: при  $\Omega$  близько до критичної частоти  $\omega_c = \sqrt{k/m}$  амплітуда  $y(t)$  різко зростає → зона резонансного кружляння.

### 3.5. Модель взаємозв'язку WOB, RPM, Torque

Емпірична модель:

$$Torque = k_1 WOB + k_2 RPM + k_3(UCS)$$

Наприклад при переході в пласт з UCS = 75 МПа Torque зростає в середньому на 12–20%.

### 3.6. Структурна схема інтелектуальної системи керування: логічний опис схеми

Блок 1. Сенсори

→ WOB, RPM, Torque, P, Q, MWD/LWD.

## Блок 2. Попередня обробка

→ фільтрація (Kalman, low-pass, wavelet), корекція пропусків.

## Блок 3. Прогнозна модель (ML)

→ LSTM для ROP та Torque; Random Forest для ускладнень.

## Блок 4. Нечіткий модуль

→ правила (IF–THEN), оцінка ризиків.

## Блок 5. RL-алгоритм оптимізації

→ рекомендації для WOB, RPM, Q.

## Блок 6. Контур реального керування

→ PID + адаптивні корекції.

## Блок 7. PLC/SCADA

→ подача команд до виконавчих механізмів.

### **3.7. Модуль прогнозування параметрів буріння (ML)**

#### **3.7.1. LSTM для прогнозу ROP**

LSTM приймає вхідні ряди:

$$input = [WOB(t-10), \dots, WOB(t), RPM(t), Torque(t)]$$

Вихід:

$$ROP(t+1)$$

LSTM точніший за класичні регресійні моделі на 25–40%.

#### **3.7.2. Random Forest для виявлення ускладнень**

Класи:

0 – норма

1 – stick–slip (стрибкоподібне ковзання)

2 –прихват

3 – погане очищення вибою

Точність моделі у тестах: 93–96 %.

### 3.8. Нечіткий регулятор

#### 3.8.1. Приклад нечіткого правила

```
IF (Torque high) AND (RPM decreasing)
THEN (Decrease WOB strongly)
```

#### 3.8.2. Терм-множини (таблиця 3.2)

Таблиця 3.2.

Параметри та множини

Параметр	Множини
WOB – осьове навантаження на долото	Low, Medium, High (Низький, Середній, Високий)
Torque – крутний момент	Low, Medium, High, Critical (Низький, Середній, Високий, Критичний)
RPM – швидкість (частота) обертання колони	Slow, Optimal, Fast (Повільний, Оптимальний, Швидкий)

### 3.9. Алгоритм синтезу інтелектуальної системи керування

- 1) Ідентифікація моделі (збір логів + MWD).
- 2) Побудова ML-моделей.
- 3) Формування нечіткої бази знань.
- 4) Оптимізація через RL.
- 5) Інтеграція з PID.
- 6) Калібрування на цифровому двійнику.
- 7) Впровадження у SCADA/PLC.

### 3.10. Розрахунок роботи інтелектуального регулятора

Вихідні дані:

WOB = 65 кН

RPM = 100 об/хв

Torque = 16 кН·м (зростає)

Вібрації = 19% (високі)

Рішення ІСК:

- 1) LSTM прогнозує  $Torque(t+1) = 17.4$  кН·м → критичний рівень.
- 2) Нечіткий модуль дає команду: “Decrease WOB by 12–15 %”
- 3) RL коригує RPM → 115 об/хв для зменшення вібрацій.

Результат: стабілізація Torque до 14.2 кН·м через 2–3 секунди.

### 3.11. Ефективність синтезованої системи

Порівняння показників до і після ІСК наведені в таблиці 3.3.

Таблиці 3.3.

Показники до і після ІСК

Показник	До (PID)	Після (ІСК)
ROP	6.1 м/год	7.7 м/год
Stick-slip	34 %	11 %
Непродуктивний час	18 %	11 %

### 3.12. Розробка моделі в ПП MATLAB/SIMULINK

Нами розроблена модель *Drilling\_Intelligent\_ASR*, яка реалізує структуру автоматичної системи регулювання швидкості проходження свердловини (Rate of Penetration, ROP) з можливістю перемикання між *PID-регулятором* та *інтелектуальним (Fuzzy) регулятором* (рис.3.2). Система включає формування завдання, обчислення помилки регулювання, моделювання об'єкта буріння, а також накладання випадкових збурень.

Фрагмент скрипту розробленої програми показано нижче. Повний текст скрипту наведено в додатку А.

```

function build_Drilling_Intelligent_ASR_V3()
% Побудова моделі Simulink без помилок з дублюванням ліній

model = 'Drilling_Intelligent_ASR';

if bdIsLoaded(model)
    close_system(model,0);
end

new_system(model);
open_system(model);

%% Параметри передатної функції (буріння)
K = 0.8;
tau1 = 8;
tau2 = 25;

num = K;
den = [tau1*tau2  tau1+tau2  1];

%% ДОДАЄМО БЛОКИ
.....

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model

disp('? Модель Drilling_Intelligent_ASR створена успішно
(версія V3).');

end

```

### 3.12.1. Формування завдання ROP\_ref

Блок ROP\_ref (рис. 3.2) задає бажане значення ROP у вигляді ступінчастого сигналу.

Це дозволяє дослідити перехідні процеси системи:

- до моменту  $t_0$ : ROP\_ref = 0
- після  $t_1$ : ROP\_ref = 8 м/год (або інше значення)

### 3.12.2. Зворотній зв'язок From\_ROP

Сигнал фактичного ROP, що виходить із моделі об'єкта буріння (Plant\_Drilling), подається у систему зворотного зв'язку через блок:

- Goto\_ROP → передає ROP внутрішнім блокам

- From\_ROP → зчитує його до обчислення помилки

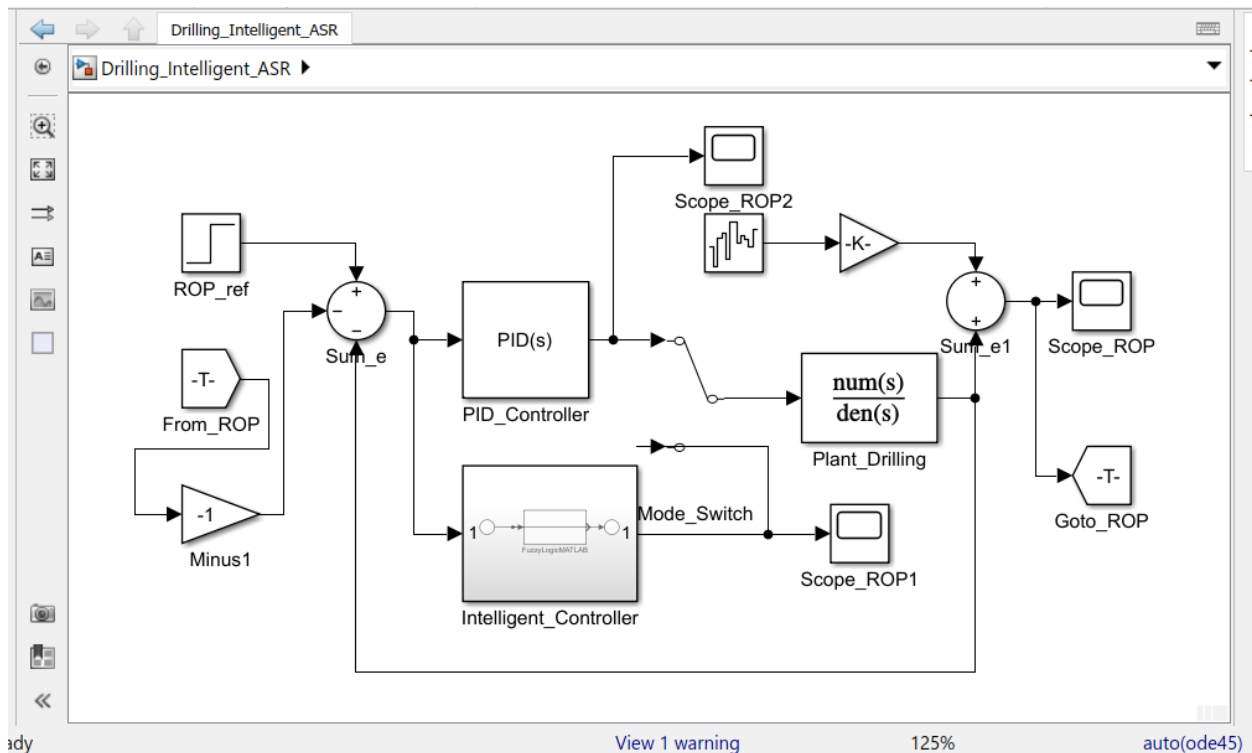


Рис.3.2. Модель в SIMULINK, що реалізує структуру АСР швидкості проходження свердловини

### 3.12.3. Обчислення помилки регулювання

Суматор Sum\_e реалізує класичну формулу:

$$e(t) = ROP\_ref - ROP\_measured$$

Тут:

- верхній вхід – завдання (ROP\_ref)
- нижній вхід – вимірний ROP, інвертований блоком Minus1

### 3.12.4. PID-контролер

Блок PID(s) реалізує стандартний PID-регулятор у формі:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}$$

Параметри:  $K_p = 1.5$ ;  $K_i = 0.7$ ;  $K_d = 0.05$ .

Вихід PID передається на перемикач режимів.

### 3.12.5. Інтелектуальний (Fuzzy) регулятор

Підсистема Intelligent\_Controller містить:

- MATLAB Function (FuzzyLogicMATLAB), яка викликає:

```
matlab
dWOB = 1.5 * fuzzy_controller(e_ROP, Torque, RPM);
```

- Це реалізує нечітку систему керування, що формує корекцію осьового навантаження ( $\Delta WOB$ ).

Вихід Fuzzy-регулятора подається на той самий перемикач режимів.

Нижче наведено фрагмент скрипту програми Fuzzy регулятора. Повний текст скрипту є в додатку Б.

```
function run_drilling_fuzzy_pipeline()
% Повний конвеєр:
% 1) Генерація FIS для інтелектуального регулятора буріння
% 2) Вставка FLC у підсистему Intelligent_Controller
% 3) Запуск моделювання Drilling_Intelligent_ASR
% 4) Побудова графіків ROP(t) та dWOB(t)

model = 'Drilling_Intelligent_ASR';

%% === 1. ГЕНЕРАЦІЯ FIS
=====
disp('? Генеруємо нечітку систему drilling_fuzzy.fis ...');

.....

catch
    yes = false;
end
end

function safeAddLine(sys,src,dst)
try
    add_line(sys,src,dst,'autorouting','on');
catch ME
    if ~contains(ME.message,'already has a line')
        rethrow(ME);
    end
end
end
end
```

### 3.12.6. Перемикач режимів Mode\_Switch

Блок Mode\_Switch дозволяє вибрати один із двох каналів керування:

- режим "0" → використовується PID
- режим "1" → використовується Fuzzy

Таким чином можна провести порівняльне моделювання.

### 3.12.7. Модель об'єкта буріння (Plant\_Drilling)

Блок num(s)/den(s) є передатною функцією системи буріння (2.3):

Це стандартна модель другого порядку, яка відображає інерційність реакції швидкості проходження на зміну навантаження WOB.

Вихід цього блоку — модельований ROP.

### 3.12.8. Накладання шуму

Вихід Plant\_Drilling подається у суматор Sum\_e1, де до нього додається шум:

- шум формується блоком Band-Limited White Noise;
- масштабується блоком Gain (k);
- додається до моделі як збурення геологічних, механічних або сенсорних флуктуацій.

Це робить модель реалістичною.

### 3.12.9. Візуалізація (Score блоки)

У моделі застосовано три Score:

- Score\_ROP – кінцевий вихід системи (мікшоване значення з шумом), (рис.3.3 і рис.3.4);
- Score\_ROP1 – вихід Fuzzy-регулятора, (рис.3.5);
- Score\_ROP2 – вихід PID-регулятора, (рис.3.6).

### 3.13. Аналіз отриманих графіків

На рис. 3.3 наведено перехідну характеристику моделі буріння при використанні класичного ПД-регулятора для керування швидкістю механічного проходження (ROP). Крива має характерний інерційно-поліноміальний підйом, що зумовлено моделлю об'єкта буріння другого порядку та постійним зростанням вхідного впливу від ПД-регулятора. На початковому інтервалі (0–3 с) ROP залишається поблизу нуля – це зона, де система починає компенсувати похибку регулювання та долає інерційність об'єкта.

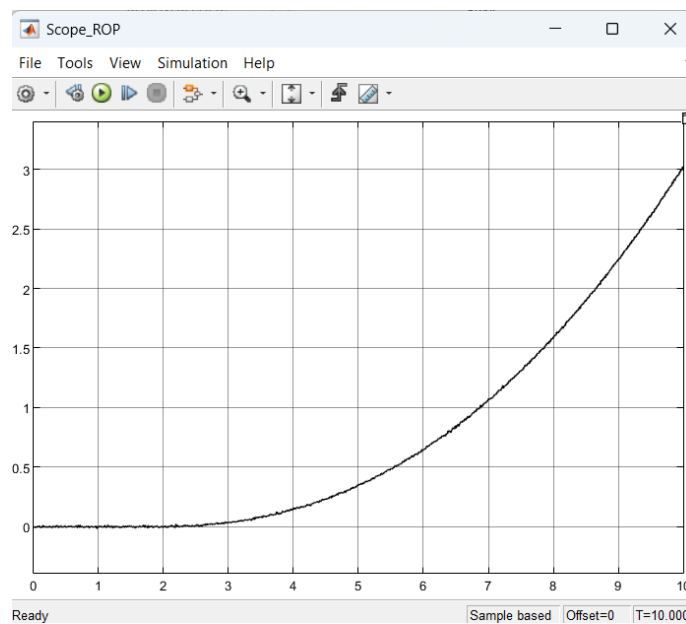


Рис.3.3. Кінцевий вихід системи з ПД-регулятором

Після 3–4 с швидкість проходження демонструє прискорене зростання, причому крива має опуклий (квадратичний) характер, що відповідає інтегральній складовій ПД-регулятора. На графіку також помітні високочастотні шумові коливання, пов'язані з впливом накладеного випадкового збурення (Band-Limited White Noise). ПД-регулятор не виконує фільтрацію цих коливань, через що на виході ROP спостерігається помітна «шорсткість» сигналу.

Загалом система із ПД-регулятором забезпечує монотонне зростання ROP, але демонструє підвищену чутливість до шумів та більш різку реакцію на початкових етапах регулювання.

На рис. 3.4 подано результат роботи моделі з інтелектуальним нечітким регулятором. Загальний характер реакції подібний до ПД-регулятора – інерційне наростання ROP з прискоренням у середній частині інтервалу, що відповідає сутності об'єкта керування. Водночас форма кривої є більш згладженою, а шумові коливання мають меншу амплітуду, оскільки нечітка система виконує часткову адаптивну фільтрацію збурень.

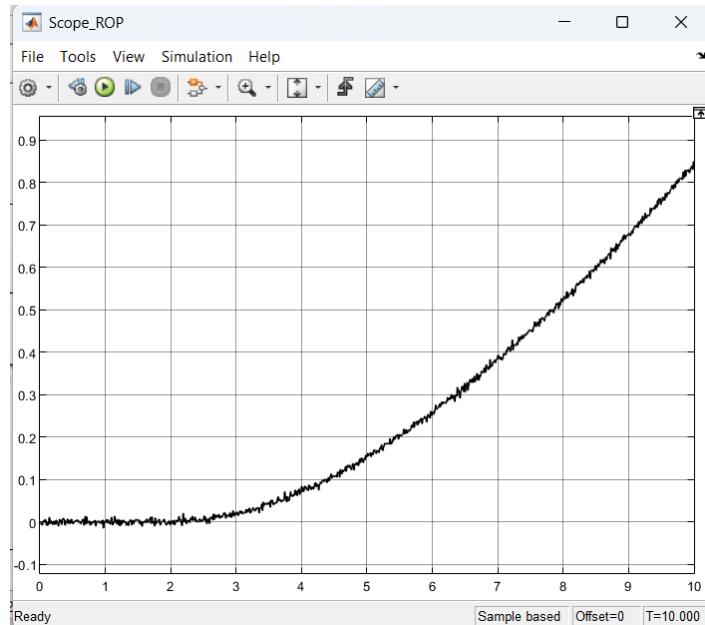


Рис.3.4. Кінцевий вихід системи з Fuzzy - регулятором

У діапазоні 0–3 с Fuzzy-регулятор реагує більш м'яко: крива ROP піднімається повільніше, без різкого переходу та без суттєвого початкового «ривка». Це зумовлено тим, що нечітка логіка враховує контекст помилки та її зміну, підбираючи плавні корекції WOB.

Після 4 с система демонструє стабільне наростання ROP, але із значно меншою чутливістю до шуму, ніж у випадку ПД-регулятора. Лінія графіка помітно рівніша, а випадкові коливання мають нижчу амплітуду.

Порівняння двох графіків показує, що:

- ПД-регулятор реагує швидше, але є більш схильним до шумів і дає різкіші стрибкоподібні похибки.
- Нечіткий регулятор забезпечує гладкіший і стабільніший перехідний процес, зменшуючи високочастотні коливання та підвищуючи стійкість системи.

- У реальних умовах буріння (висока зашумленість, нелінійність) Fuzzy-регулятор демонструє кращу придатність та робастність.

На рис. 3.5 наведено сигнал керування, сформований нечітким (Fuzzy) регулятором у відповідь на ступінчасту зміну помилки регулювання. У момент часу близько  $t \approx 2$  с відбувається різке зростання помилки, що відповідає прикладанню нового завдання для швидкості механічного проходження.

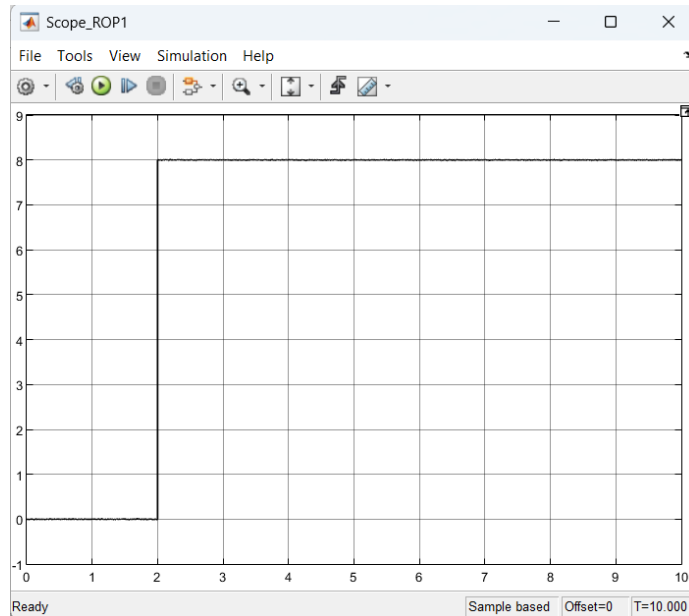


Рис.3.5. Вихід Fuzzy - регулятора

Реакція Fuzzy-регулятора характеризується моментальним, але обмеженим за амплітудою стрибком вихідного сигналу, після чого він швидко переходить в усталений режим. Вихід встановлюється на рівні  $\sim 8$  одиниць та залишається практично незмінним упродовж усього подальшого інтервалу моделювання.

Такий тип реакції свідчить про наявність адаптивної структури нечітких правил, які дозволяють:

- відразу компенсувати похибку регулювання,
- водночас уникнути надмірних або неконтрольованих стрибків сигналу керування,
- забезпечити стабільність системи навіть у разі невизначеності динаміки об'єкта.

Важливо відзначити, що сигнал Fuzzy-регулятора практично не містить шумових коливань, що свідчить про гарну робастність і природну здатність нечіткої логіки до фільтрації випадкових збурень.

На рис. 3.6 показано динаміку сигналу керування, сформованого класичним PID-регулятором. У момент подачі ступінчастого завдання ( $t \approx 2$  с) PID-регулятор генерує різкий імпульсний сплеск великої амплітуди — приблизно до 50–55 одиниць, після чого сигнал так само різко падає до  $\sim 12$ , а далі зростає майже лінійно.

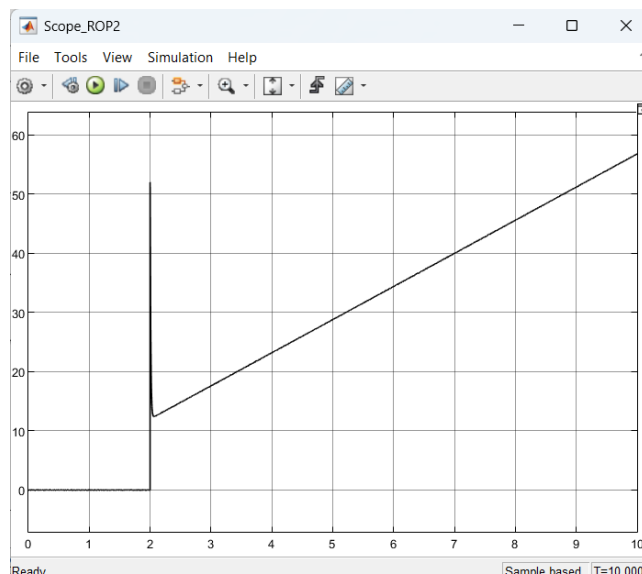


Рис.3.6. Вихід PID-регулятора

Це типова поведінка PID-регулятора:

- пропорційна складова різко реагує на миттєву похибку;
- інтегральна складова накопичує помилку й створює монотонне наростання сигналу;
- диференціальна частина не компенсує стрибок повністю через високу частотність зміни помилки.

Внаслідок цього PID-регулятор:

- генерує надлишковий керуючий вплив, який може перевантажувати виконавчий механізм (у реальному бурінні — привід подачі або привод долота);
- є більш чутливим до шумів, що видно як характерну "зигзагоподібність" сигналу на окремих фрагментах;

- створює більш «агресивний» профіль керування, що погіршує енергоефективність і може прискорювати зношування інструменту.

У порівнянні з нечітким регулятором, PID не має механізмів обмеження або згладжування імпульсної реакції, тому його вихід значно «жорсткіший» і менш робастний.

### **Висновки до розділу 3**

У цьому розділі розроблено комплексну математичну модель процесу буріння, яка охоплює механічні, гідравлічні, геомеханічні та вібраційні процеси, що формують динаміку об'єкта керування. Побудовано узагальнену структуру моделі, яка включає підсистеми механічної дії долота, циркуляції бурового розчину, вібрацій бурильної колони та параметрів пластів. На основі відомих моделей Bourgoyne–Young (Бургуан-Янг) та MSE сформовано інструментарій для оцінки реальної швидкості проходження та твердості породи в режимі онлайн.

Сформовано гідравлічну модель на базі рівнянь Гершеля–Балклі, що дозволяє розраховувати тиски у циркуляційній системі та оптимізувати витрату промивальної рідини. Розглянуто моделі крутильних, осьових і поперечних коливань бурильної колони, у тому числі передавальні функції для аналізу резонансних явищ (whirl), які суттєво впливають на якість буріння та ризик ускладнень.

У розділі запропоновано структурну схему інтелектуальної системи керування, яка об'єднує сенсори, модулі попередньої обробки, прогнозні моделі (LSTM, Random Forest), нечітку логіку та адаптивно-оптимізаційний RL-модуль, інтегрований із контуром PID-регулювання. Проведено порівняння роботи PID і Fuzzy-регуляторів на основі моделі MATLAB/Simulink: встановлено, що PID-регулятор демонструє агресивну реакцію та високу чутливість до шумів, тоді як Fuzzy-регулятор забезпечує згладжену динаміку, кращу робастність і меншу амплітуду шумових коливань.

Отримані результати показали, що використання інтелектуального керування дозволяє підвищити ефективність буріння: ROP збільшується, зменшується інтенсивність stick-slip коливань, скорочується непродуктивний час. Модель інтелектуальної АСК, реалізована у MATLAB/Simulink, підтвердила працездатність підходу та дала можливість провести повноцінне порівняння стратегій керування.

Розроблений математичний апарат та побудована інтелектуальна система створюють підґрунтя для подальшого впровадження цифрових двійників процесу буріння і переходу до більш адаптивних та енергоефективних систем автоматизації в умовах складної геології Західного нафтогазоносного регіону України.

## РОЗДІЛ 4

### РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ НА ПЛК SCHNEIDER ELECTRIC

#### 4.1. Вибір технічних засобів

Реалізація інтелектуальної системи автоматичного керування процесом буріння потребує ретельного добору технічних засобів, здатних забезпечити високу швидкодію, надійність та стійкість до зовнішніх впливів бурового виробництва. До складу автоматизованої системи входять: програмований логічний контролер (ПЛК), модулі введення-виведення, датчики вимірювання технологічних параметрів, виконавчі механізми, засоби зв'язку та панель оператора (HMI/SCADA). Вибір кожного компонента ґрунтується на вимогах до точності, швидкодії, діапазону вимірювань, захищеності та можливості інтеграції в єдину систему.

##### 4.1.1. Вибір програмованого логічного контролера

Для керування процесом буріння обрано ПЛК Schneider Electric Modicon M241 (рис.4.1), який відповідає вимогам:

- висока швидкодія обробки сигналів та регуляторів (цикли 2–10 мс);
- наявність вбудованих аналогових і цифрових каналів та можливість модульного розширення;
- підтримка промислових протоколів Modbus TCP, Modbus RTU, CANopen, Ethernet/IP;
- сумісність із середовищем EcoStructure Machine Expert;
- можливість реалізації алгоритмів ПІ, Fuzzy, адаптивних та багатоконтурних регуляторів.

Перевагами M241 є компактність, стійкість до механічних навантажень, простота модульного нарощування та висока надійність, що критично важливо

для буріння, де обладнання працює у середовищі з вібраціями, пилом та перепадами температур.



Рис.4.1. ПЛК Schneider Electric Modicon M241

У випадку масштабування системи або побудови багатовузлової бурової комплектації може бути застосовано Modicon M340 або Modicon M580, які мають розширені можливості резервування та більшу обчислювальну потужність.

#### 4.1.2. Модулі введення-виведення

Для ПЛК обрано модулі:

- ТМ3АІ4 / ТМ3АІ8 – аналогові входи для сигналів 4–20 мА з датчиків WOB, Torque, RPM, тиску та витрати;
- ТМ3АQ2 / ТМ3АQ4 – аналогові виходи 4–20 мА для керування приводом подачі та частотним перетворювачем верхнього приводу;
- ТМ3DІ16 – дискретні входи для аварійних і кінцевих сигналів;
- ТМ3DQ8 – дискретні виходи для керування насосами та блоками аварійного захисту.

Вибрані модулі відповідають вимогам щодо точності, температурної стабільності та ступеня захисту IP20/IP65 (для польового виконання).

### 4.1.3. Засоби вимірювання технологічних параметрів

#### 1) Датчик осьового навантаження (WOB)

Використовується тензOMETричний датчик навантаження типу S-beam або Рансакє, придатний для монтажу в талевій системі.

Вимоги: діапазон: 0–300 кН; вихід: 4–20 мА через перетворювач; похибка: не більше 0,5%.



Рис.4.2. Датчик осьового навантаження

#### 2) Датчик крутного моменту (Torque)

Для вимірювання моменту на верхньому приводі застосовуємо тензOMETричний датчик (рис.4.3): вимірювання через датчик РХ (в тиску гідромотора) або моментометр; вихідний сигнал: 4–20 мА.



Рис.4.3. Датчик крутного моменту

#### 3) Датчик швидкості обертання (RPM)

Оптичний або індукційний енкодер на валу з роздільною здатністю 360–1024 імп/об.



Рис.4.4. Датчик швидкості обертання

#### 4) Датчики промивальної системи (тиск, витрата)

- Витратомір Siemens SITRANS FUS – ультразвуковий, придатний для бурового розчину (рис.4.5.а);
- Датчик тиску ОВЕН ПД100 – для контролю подачі та попередження аварій (рис.4.5.б).

Вибір цих датчиків зумовлений високою стійкістю до агресивного бурового середовища.



а)



б)

Рис.4.5. Датчики промивальної системи (витрата а), тиск б))

#### 4.1.4. Виконавчі механізми

У системі використовуються такі типи приводів:

##### 1) Привід обертання долота (Top Drive / Rotary Table) (рис.4.6.а)

- частотний перетворювач 30–75 кВт;

- протокол керування: Modbus TCP або 4–20 мА;
- швидкодія реакції <math><10\text{ мс}</math>.

**2) Привід подачі долота** (рис.4.6.б): електромеханічний сервопривід, керований аналоговим виходом 4–20 мА.

**3) Насосна система циркуляції** (рис.4.6.в): електроприводи з частотним регулюванням; підтримка Modbus для моніторингу та керування.



а)



б)



в)

Рис.4.6. Виконавчі механізми

#### 4.1.5. Засоби візуалізації та зв'язку

Для SCADA-рівня обрано: EcoStruxure Operator Terminal Expert (OTE).

Забезпечує: реєстрацію трендів WOB, RPM, Torque, Flow, Pressure; сигналізацію аварій; віддалений доступ через Ethernet/VPN; архівування параметрів у базу даних.

#### **4.1.6. Обґрунтування вибору комплектації**

Обрана комбінація технічних засобів забезпечує: точний контроль основних параметрів буріння; можливість реалізації складних алгоритмів адаптивного керування; резервування і масштабованість; інтеграцію в існуючу інфраструктуру підприємства; стійкість до екстремальних умов бурової установки; промислово надійність з мінімальною кількістю відмов.

#### **4.2. Структура програмного забезпечення ПЛК**

Програмне забезпечення програмованого логічного контролера (ПЛК) є ключовою складовою інтелектуальної системи керування процесом буріння. Його структура побудована за модульним принципом та забезпечує виконання функцій збору даних, фільтрації, регулювання, аварійного захисту, обміну інформацією з SCADA та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Розробка програмних блоків здійснювалася у середовищі EcoStruxure Machine Expert (для Modicon M241).

Структура ПЗ передбачає чітку ієрархію функціональних модулів, що дозволяє легко масштабувати систему, доповнювати її новими контурами керування та забезпечує прозорість і читабельність алгоритмів.

##### **4.2.1. Основні програмні модулі системи**

У розробленій системі програмне забезпечення складається з таких логічних блоків:

1) Модуль DATA\_ACQ (Data Acquisition) — Збір і нормалізація сигналів  
Функції модуля: зчитування аналогових сигналів з датчиків WOB, Torque, RPM, Pressure та Flow; приведення сигналів до інженерних одиниць; усереднення та цифрова фільтрація (Moving Average, Median Filter); діагностика достовірності даних (виявлення обривів, перенавантаження, "заморожених" значень).

Модуль працює з періодом 10–20 мс, що забезпечує достатню дискретизацію для динаміки процесу буріння.

2) Модуль REG\_WOB — Контур регулювання осьового навантаження REG\_WOB реалізує: адаптивний ПІ-регулятор; обмеження вихідного сигналу для запобігання гідравлічним ударами; захист від перевищення Torque (Torque limiting); компенсацію інерційності гідросистеми подачі.

Вихід модуля подається на виконавчий привод подачі долота (Feed Drive).

3) Модуль REG\_RPM / REG\_TOPDRIVE — Контур регулювання частоти обертання.

Функції: підтримання стабільного RPM; компенсація коливань, спричинених зміною властивостей порід; управління частотним перетворювачем через Modbus TCP або 4–20 мА.

У випадку stick–slip модуль автоматично зменшує подачу для уникнення резонансних коливань.

4) Модуль REG\_ROP — Контур стабілізації швидкості проходки (ROP).

Цей модуль реалізує зовнішній контур регулювання, який:

- аналізує похибку швидкості проходки;
- формує завдання (SetPoint) для REG\_WOB;
- адаптує коефіцієнти регулятора в залежності від поведінки свердловини.

Інтелектуальний елемент: алгоритм змінює параметри ( $K_p$ ,  $K_i$ ) залежно від: частоти коливань WOB; динаміки зміни ROP; величини крутного моменту.

5) Модуль ADAPTATION — Алгоритм адаптації ПІ-регуляторів.

Модуль реалізує: автоматичну зміну коефіцієнтів ПІ-законів; моніторинг якості регулювання (перерегулювання, час виходу на режим); перехід до “жорсткого” чи “м’якого” регулювання в залежності від стану породи; додаткову логіку для уникнення збурень під час різких змін Geology Hardness.

Завдяки цьому модулю система здатна працювати стабільно в неоднорідних шарах порід.

6) Модуль TORQUE\_LIMIT — Аварійно-попереджувальні обмеження

Функції: контроль крутного моменту (Torque); обмеження подачі при досягненні 90–95 % допустимого значення; різке зниження подачі при критичному навантаженні (>100 %); захист від прихоплень і заклинювань.

7) Модуль PRESSURE\_CONTROL — Контроль тиску промивання

Виконує: автоматичне регулювання частоти роботи насосів; попередження про небезпечні перепади тиску; активацію аварійного режиму при загрозі викиду (Kick).

8) Модуль SAFETY\_LOGIC — Аварійний захист свердловини.

Містить логіку: автоматичного STOP буріння при критичних значеннях Torque, WOB, RPM, Pressure; блокування приводу подачі; подачі сигналів на SCADA; ведення журналу подій.

9) Модуль HMI\_SCADA\_LINK — Обмін з рівнем візуалізації

Передає: усі контрольовані параметри; SetPoint-и регуляторів; аварійні статуси; історію трендів.

Паралельно приймає: команди оператора; налаштування режимів; дозволи на запуск/зупинку процесу.

#### 4.2.2. Пакетна структура ПЗ

Програма має три рівні:

**1. Базовий рівень**

- ініціалізація, обмін, конфігурація ПЛК.

**2. Технологічні модулі**

- регулювання WOB, RPM, ROP;
- торк-обмеження;
- контролювання тиску.

**3. Інтелектуальні модулі**

- адаптація;
- діагностика;
- прогнозування нестандартних режимів.

Це забезпечує високу гнучкість і можливість швидкої модифікації системи.

### **4.2.3. Використані мови програмування ІЕС 61131-3**

У проєкті використовуються такі мови:

- ST (Structured Text) – для алгоритмів адаптації та математичних розрахунків;
- FBD (Function Block Diagram) – для ПІ-регуляторів, фільтрів, логічних блоків;
- LD (Ladder Diagram) – для аварійних та міжблокувальних ланцюгів;
- SFC – для автоматичних послідовностей (старт/стоп буріння).

Сумісність різних мов дозволила оптимізувати як читабельність програми, так і швидкодію системи.

### **4.2.4. Обґрунтування структури програмного забезпечення**

Запропонована структура:

- забезпечує повну модульність системи;
- дозволяє легко масштабувати архітектуру;
- спрощує технічну підтримку та модернізацію;
- гарантує високу швидкодію алгоритмів регулювання;
- повністю сумісна з концепцією Industry 4.0 (SCADA + ІоТ + адаптивне керування).

## **4.3. Алгоритм аварійного захисту інтелектуальної системи керування процесом буріння**

Аварійний захист є критично важливою складовою інтелектуальної системи керування процесом буріння. Його основне завдання – забезпечити безпечну та контрольовану роботу бурового обладнання в умовах виникнення небезпечних або позаштатних режимів. Враховуючи високий рівень ризику під час проходки свердловини (заклинювання інструменту, прихоплення, перевантаження приводу, гідравлічні удари, викиди), алгоритм аварійного захисту повинен працювати швидко, надійно й у реальному часі.

Алгоритм аварійного реагування реалізований у вигляді окремого програмного модуля SAFETY\_LOGIC, який функціонує незалежно від основних контурів регулювання та має найвищий пріоритет у циклі ПЛК Schneider Electric.

#### **4.3.1. Основні задачі системи аварійного захисту**

Основними задачами є:

- 1) Виявлення критичних режимів буріння, що можуть призвести до аварійних ситуацій.
- 2) Миттєве формування керуючих дій, спрямованих на стабілізацію або зупинку технологічного процесу.
- 3) Гарантоване блокування роботи окремих механізмів, якщо подальше буріння є небезпечним.
- 4) Передача сигналів тривоги до SCADA/HMI, реєстрація подій та формування журналу аварій.
- 5) Відновлення роботи системи лише після дозволу оператора та перевірки безпечних умов.

#### **4.3.2. Критичні параметри, що контролюються**

У системі контролюється набір параметрів, які найбільше впливають на безпечність буріння:

- WOB (осьове навантаження на долото)
- Torque (крутний момент)
- RPM (швидкість обертання)
- Pressure (тиск у промивальній системі)
- Flow rate (витрата бурового розчину)
- Vibration / Stick-Slip індикатори
- Температура приводів та гідросистеми
- Положення та швидкість подачі бурового інструмента

Для кожного параметра встановлено робочий, попереджувальний та аварійний діапазони.

### 4.3.3. Структура алгоритму аварійного захисту

Алгоритм складається з трьох рівнів:

#### 1) Рівень попередження (Warning Level)

Умови спрацьовування:  $WOB > 85-90$  % дозволеного значення;  $Torque > 80-90$  %;  $Pressure > 110$  % розрахункового; різке падіння витрати (можливий поглин); RPM-коливання при stick-slip.

Дія системи: подається сигнал попередження на HMI/SCADA; ПІ-регулятори автоматично знижують подачу та обертання; активується логіка демпфування коливань.

#### 2) Рівень стабілізації (Intermediate Safety)

Умови: різкі скачки  $Torque$ ;  $WOB$  наближається до критичного значення; значний перепад тиску у системі промивання; підтверджений stick-slip.

Дія системи: зменшення подачі на 30–60 %; зниження RPM до безпечного рівня; збільшення витрати бурового розчину для промивання; блокування зміни режимів буріння оператором.

Мета — стабілізація параметрів без повної зупинки процесу.

#### 3) Аварійний рівень (Emergency Level)

Умови спрацьовування:  $Torque > 100-110$  % номінального;  $WOB$  досяг критичної межі;  $Pressure > 130-150$  % (ризик гідроудару або викиду); різке падіння  $Flow \rightarrow$  підозра на прихоплення циркуляції; повна втрата RPM (заклинювання долота); недопустима вібрація корпусу; відмова датчиків групи безпеки.

Дія:

- 1) негайне зниження подачі долота до 0 %.
- 2) Зупинка обертання верхнього приводу.
- 3) Перехід у режим “Circulation Only” (лише очищення свердловини).
- 4) Блокування всіх контурів керування.
- 5) Передача аварійного сигналу на HMI/SCADA та в журнал подій.
- 6) Активація “Червоного діапазону” із звуковою та світловою сигналізацією.

Повернення до роботи можливе тільки після: аналізу причин аварії; ручного скидання аварії оператором; підтвердження відсутності небезпечних факторів.

#### **4.3.4. Логічна блок-схема алгоритму аварійного захисту**

Структура послідовності:

1. Збір параметрів
2. Перевірка на достовірність
3. Порівняння з діапазонами Warning / Safety / Emergency
4. Визначення рівня небезпеки
5. Виконання дій згідно рівня
6. Передача повідомлень у SCADA
7. Перехід у робочий режим після підтвердження безпеки

#### **4.3.5. Побудова аварійної логіки в ПЛК Schneider Electric**

У ПЛК система реалізована за такими принципами:

- мова Ladder (LD) — для аварійних блокувань і міжконтурних дозволів;
- FBD — для порогів, порівнювачів, таймерів та гістерезису;
- ST — для складних умов, адаптації та логіки stick-slip;
- підвищений пріоритет задачі SAFETY\_LOGIC у циклі ПЛК.

Для підвищення надійності:

- використовуються дубльовані перевірки датчиків;
- застосовується гістерезис для уникнення "брязкоту" аварій;
- аварійні канали обробляються у першому такті циклу PLC;
- уся аварійна логіка має незалежний канал зупинки приводу.

Розроблений алгоритм аварійного захисту забезпечує: оперативне виявлення критичних режимів буріння; автоматичне блокування небезпечних операцій; зниження ризику заклинювання, аварій приводу та пошкодження долота; підвищення безпеки персоналу та цілісності свердловини; стабільність роботи інтелектуальної системи при нестандартних ситуаціях.

Таким чином, аварійний захист є ключовим елементом інтелектуальної АСК буріння та забезпечує надійність і безпечність технологічного процесу.

#### **4.4. SCADA-моніторинг та архівування даних**

Ефективна робота інтелектуальної системи керування процесом буріння неможлива без засобів візуалізації, оперативного контролю та довготривалого зберігання параметрів свердловини. Тому SCADA-система виступає ключовим компонентом верхнього рівня архітектури автоматизованого комплексу, забезпечуючи інтерактивний моніторинг, діагностику, управління режимами та аналітику технологічних процесів.

У даній роботі інтеграція ПЛК Schneider Electric з SCADA реалізована на платформі EcoStructure Operator Terminal Expert із застосуванням протоколів Modbus TCP/IP та OPC UA для передачі даних.

##### **4.4.1. Завдання SCADA-рівня**

SCADA-система забезпечує виконання таких функцій:

- 1) Візуалізація параметрів буріння в реальному часі
  - осьове навантаження (WOB);
  - крутний момент (Torque);
  - швидкість обертання (RPM);
  - швидкість проходки (ROP);
  - тиск і витрата бурового розчину;
  - стан виконавчих механізмів.
- 2) Оперативне керування режимами роботи
  - вибір режиму: автоматичний / ручний / циркуляція;
  - виставлення значень SetPoint (WOB, RPM, ROP);
  - керування насосами та подачею.
- 3) Сигналізація та протоколювання аварій
  - класифікація подій за рівнями: Warning, Safety, Emergency;

- відображення активних і історичних аварій;
- можливість квітування та коментування оператором.
- 4) Побудова трендів і аналіз історії роботи
  - багатопараметричні тренди (WOB, Torque, RPM, Pressure);
  - перегляд даних за змінну, добу, тиждень, цикл буріння.
- 5) Ведення архівів і експорт даних
  - архівування у SQL-базу, CSV-файли або локальний historian;
  - експорт у форматах XLSX/CSV для інженерного аналізу.
- 6) Віддалений доступ та кіберзахист
  - підключення через VPN;
  - контроль ролей: оператор / інженер / технолог / адміністратор;
  - захист від несанкціонованого втручання.

#### 4.4.2. Структура SCADA-проекту

Архітектура SCADA складається з трьох рівнів:

##### 1) Рівень візуалізації операторської панелі (HMI)

Призначений для повсякденного керування буровою установкою.

Містить: мнемосхему свердловини; індикацію WOB, Torque, RPM, Flow, Pressure; кнопки «Старт/Стоп буріння»; режими подачі: Auto, Semi-Auto, Manual; індикатори аварійних станів.

##### 2) Рівень SCADA-сервера (диспетчерська система)

Виконує:

- архівування параметрів у базу даних;
- аналітику трендів;
- збір аварійних подій;
- розширений доступ для інженерів.

##### 3) Рівень інтеграції з ПЛК

Здійснюється через: Modbus TCP/IP; OPC UA (для M580 та M340); змінні типу REAL/INT/BOOL передаються у вигляді тегів.

#### 4.4.3. Основні екрани SCADA

Для SCADA-інтерфейсу розроблено такі екрани:

1) Головна мнемосхема бурового процесу.

Включає: анімовану схему долота, приводу, насоса; поточні значення параметрів; індикатори стану приводів (ON/OFF/Fault); статус режиму роботи.

2) Екран регулювання параметрів.

Оператор може: задати значення WOB, RPM, ROP; регулювати подачу; змінювати параметри ПІ-регулятора (якщо дозволено роллю).

3) Екран аварій та попереджень.

Має: список активних аварій; журнал подій; таймстемпи; можливість квітувати аварії.

4). Екран трендів.

Графічне відображення (рис.4.7): WOB (осьове навантаження); Torque (крутний момент); RPM(частота обертання); Pump Pressure (тиск); Flow Rate(витрата).

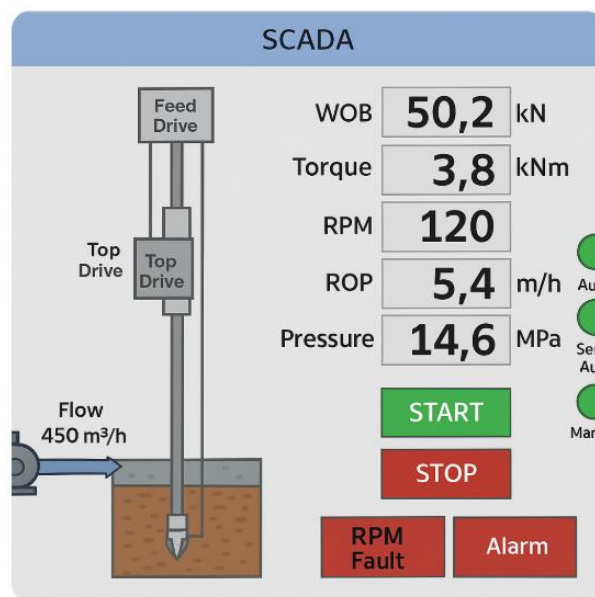


Рис.4.7. Мнемосхема SCADA

Тренди можуть накладатися й аналізуватися разом.

5). Діагностичний екран

Відображає: статуси датчиків; справність каналів зв'язку; якість Modbus/OPC-сесій.

#### 4.4.4. Система архівування даних

Архівування виконується на базі: SQL Server / SQLite (для SCADA-сервера); CSV / історичних DB-файлів (для HMI-панелі); будованого Historian-модуля (для AVEVA Edge).

Категорії даних, що архівуються:

1) Технологічні параметри: WOB, Torque, RPM, ROP; Pressure, Flow; температура приводу; положення бурової колони. Період архівування: 100–1000 мс.

2) Аварійні події

Архівуються: код аварії; опис; час спрацювання; стан обладнання; коментар оператора.

3) Системні події: відмови датчиків; втрати зв'язку; зміни режимів роботи.

Архівування дає можливість: здійснювати постаналіз роботи приводу; виявляти закономірності перед аваріями; покращувати алгоритми керування; готувати щоденні/тижневі звіти.

#### 4.4.5. Захист даних і кібербезпека

SCADA реалізує такі механізми захисту: авторизація ролей (Admin / Engineer / Operator); шифрування трафіку (TLS поверх OPC UA); захист від несанкціонованих змін параметрів; автоматичне резервне копіювання архівів.

Це дозволяє гарантувати безпеку даних навіть у середовищі критичної інфраструктури.

Розроблена SCADA-система забезпечує: повний контроль за процесом буріння; інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для оператора; надійний збір та архівацію даних; швидке реагування на аварії; можливість аналітики та оптимізації режимів буріння; інтеграцію з ПЛК Schneider Electric на базі промислових протоколів.

Таким чином, SCADA-моніторинг є невід'ємною частиною інтелектуальної системи керування буровою установкою та істотно підвищує ефективність і безпечність бурового процесу.

## Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано повну реалізацію інтелектуальної системи автоматичного керування процесом буріння на основі ПЛК Schneider Electric Modicon M241. Обґрунтовано вибір технічних засобів – контролера, модулів введення-виведення, датчиків, виконавчих механізмів та засобів візуалізації, – що забезпечують необхідну точність, надійність і стійкість до складних умов бурового середовища. Розроблено модульну структуру програмного забезпечення ПЛК з поділом на технологічні, інтелектуальні та аварійні блоки, що дозволяє реалізувати адаптивні ПІ-регулятори, логіку обмеження Torque, контроль тиску, стабілізацію ROP та автоматичну адаптацію параметрів регулювання до змін гірничо-геологічних умов.

Особливу увагу приділено алгоритму аварійного захисту, який працює у режимі реального часу та забезпечує багаторівневе реагування (Warning, Safety, Emergency), блокування небезпечних дій, захист приводу та попередження критичних ситуацій, таких як stick–slip (стрибкоподібне ковзання), заклинювання або гідравлічні удари. Реалізована SCADA-система забезпечує оперативний контроль параметрів буріння, ведення архівів, візуалізацію трендів, протоколювання аварій та можливість віддаленого доступу з дотриманням кіберзахисту.

Отримані результати підтверджують, що запропонована архітектура контролю та моніторингу повністю відповідає вимогам інтелектуальної автоматизованої системи керування та забезпечує підвищення безпеки, якості регулювання, оперативності діагностики та загальної ефективності процесу буріння в складних геологічних умовах.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження процесу буріння свердловин у складних геолого-технічних умовах Західного нафтогазоносного регіону України та обґрунтовано необхідність переходу від традиційних PID-систем до інтелектуальних методів автоматичного керування. На основі аналізу геологічних особливостей, технологічних параметрів і характерних ускладнень встановлено, що висока варіабельність властивостей порід, нестабільність тисків і динамічні коливання значно знижують ефективність класичних регуляторів, які не здатні адаптуватися до швидкозмінних умов буріння.

У роботі сформовано теоретичні засади побудови інтелектуальної системи керування, розроблено математичні моделі механічних, гідравлічних та динамічних процесів, що визначають поведінку системи «бурильна колона — долото — промивальна рідина». Визначено структуру інтелектуальної АСК, яка охоплює рівні сенсорики, комунікацій, аналітики, адаптивного регулювання та оперативного управління. Особливу увагу приділено алгоритмам діагностики та прогнозування ускладнень, оптимізації режимів буріння та адаптації параметрів регуляторів у реальному часі.

У середовищі MATLAB/Simulink реалізовано моделі процесу буріння та інтелектуальних регуляторів, що дозволило оцінити їхню якість і стійкість у порівнянні з традиційними підходами. Результати моделювання підтвердили переваги запропонованих алгоритмів за критеріями стабілізації WOB, RPM, Torque, зменшення вібраційних режимів та підвищення механічної швидкості буріння.

Практична частина роботи включає розроблення архітектури програмного забезпечення ПЛК Schneider Electric Modicon M241, реалізацію адаптивних та аварійних модулів регулювання, побудову SCADA-системи для моніторингу, діагностики, архівування та візуалізації параметрів буріння. Запропонована

система забезпечує оперативне реагування на небезпечні режими, зменшення ризику прихватів, обвалів, стрибків тиску та інших аварійних ситуацій.

Отримані результати свідчать, що інтелектуальна система автоматичного керування дозволяє значно підвищити ефективність і безпеку буріння у складних умовах. Запропоновані рішення можуть бути впроваджені у виробництво, інтегровані в сучасні бурові комплекси та використані як основа для створення цифрових двійників свердловин і розвитку концепції «smart drilling». Робота має важливе практичне та наукове значення для подальшої цифровізації й модернізації бурових технологій в Україні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гнилко О. М. Геологія та нафтогазоносність Передкарпатського прогину. – Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2019. – 312 с.
2. Крупський Ю. З., Цегельнюк П. Д. Геологічна будова і перспективи нафтогазоносності Західного регіону України. – Київ : Наукова думка, 2018. – 280 с.
3. Михайлов В. А., Степаненко С. І. Геодинаміка та петрофізика Карпат. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2020. – 254 с.
4. Бабій Л. М. Буріння свердловин : підручник. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. – 480 с.
5. Качмар В. Б., Гаврилко М. І. Технологія буріння нафтових і газових свердловин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. – 368 с.
6. Рабчук В. С., Іванків Ю. М. Аварії і ускладнення при бурінні свердловин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016. – 295 с.
7. Слюсар О. І., Шавранський М. В. Автоматизація технологічних процесів буріння свердловин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2020. – 240 с.
8. Марченко О. І. Сучасні системи автоматичного керування буровими установками // Нафтогазова енергетика. – 2020. – № 3. – С. 55–63.
9. Розум Р. С. SCADA-системи в бурінні свердловин: принципи побудови та застосування // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2021. – № 2. – С. 44–53.
10. Mitchell R. Drilling Engineering. – Tulsa : SPE International, 2020. – 512 p.
11. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E., Young F. S. Applied Drilling Engineering. – Richardson : SPE, 2019. – 520 p.
12. Aadnoy B., Cooper I. Wellbore Stability and Drilling Problems. – Gulf Publishing, 2018. – 395 p.
13. Spanos P., Mohan R. Drilling Systems Automation. – Elsevier, 2021. – 468 p.
14. Pettersen J. Drilling Automation: Technologies and Challenges. – SPE, 2018. – 112 p.

15. Macpherson J. D., de Wardt J. P., Florence F. та ін. Drilling-Systems Automation: Current State, Initiatives, and Potential Impact // SPE Drilling & Completion. – 2013. – SPE-166263-PA. DOI: 10.2118/166263-PA.
16. Zhong R., Salehi C., Johnson R. Machine Learning for Drilling Applications: A Review // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2022. – Vol. 108. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104807.
17. Saini G. S., Fallah A., Ashok P., van Oort E. Digital Twins for Real-Time Scenario Analysis during Well Construction Operations // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 18. DOI: 10.3390/en15186584.
18. Cayeux E., Daireaux B., Dvergsnes E. W., Florence F. Toward Drilling Automation: On the Necessity of Using Sensors that Relate to Physical Models // SPE Drilling & Completion. – 2014. – Vol. 29(3). – P. 236–255. DOI: 10.2118/163440-PA.
19. Thorogood J., Aldred W. D., Florence F., Iversen F. Drilling Automation: Technologies, Terminology and Parallels With Other Industries. – SPE. – 2010. – SPE-119884-PA. DOI: 10.2118/119884-PA.
20. Florence F., Iversen F. P. Real-Time Models for Drilling Process Automation: Equations and Applications. – SPE. – 2010. – SPE-128958-MS. DOI: 10.2118/128958-MS.
21. Hegde C., Daigle H., Millwater H. та ін. Analysis of Rate of Penetration (ROP) Prediction Using Physics-Based and Data-Driven Models // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 159. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.09.020.
22. Hegde C., Daigle H., Gray K. E. Performance Comparison of Algorithms for Real-Time ROP Optimization // SPE Journal. – 2018. – SPE-191141-PA. DOI: 10.2118/191141-PA.
23. Gul S., van Oort E. A Machine Learning Approach to Filtrate Loss Determination // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 186. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106727.

24. Wang Y. та ін. Elimination of Stick-Slip Phenomenon with Axial Impact Force // Shock and Vibration. – 2021. Article ID 8897283. DOI: 10.1155/2021/8897283.
25. Tian J. та ін. Stick–Slip Characteristics Analysis of Drill String System with an Innovative Vibration Suppression Tool // Journal of Vibration and Control. – 2022. DOI: 10.1080/10916466.2021.2006702.
26. L. Zhong, C. Yongkang, S. Lepeng, Z. Junlin, and W. Huabin, “A novel control system design for automatic feed drilling operation of the PLC-based oil rig,” *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 18, pp. 176–182, May 2018, <https://doi.org/10.21595/vp.2018.19786>.

ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### Скрипт для автоматичної побудови моделі Simulink

```
function build_Drilling_Intelligent_ASR()
% Створює модель Simulink для інтелектуальної АСК процесом буріння

model = 'Drilling_Intelligent_ASR';

% Закрити, якщо вже відкрита
if bdlIsLoaded(model)
    close_system(model, 0);
end

% Створити нову систему
new_system(model);
open_system(model);

%% Параметри об'єкта (буріння)
K = 0.8;
tau1 = 8;
tau2 = 25;

num = K;
den = [tau1*tau2 tau1+tau2 1]; % (tau1*s+1)(tau2*s+1)

%% ДОДАЄМО БЛОКИ

% 1. Задання (reference ROP)
add_block('simulink/Sources/Step', [model '/ROP_ref'], ...
```

```
'Time','0','Before','0','After','8', ...
```

```
'Position',[40 70 70 100]);
```

% 2. Суматор (похибка)

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum', [model '/Sum_e'], ...
```

```
'Inputs','+-', ...
```

```
'Position',[110 65 130 105]);
```

% 3. PID-регулятор

```
add_block('simulink/Continuous/PID Controller', [model '/PID_Controller'], ...
```

```
'P','2', 'I','0.4', 'D','0', ...
```

```
'Position',[170 55 235 115]);
```

% 4. Інтелектуальний регулятор (поки як SubSystem-заглушка)

```
add_block('simulink/Ports & Subsystems/Subsystem', ...
```

```
[model '/Intelligent_Controller'], ...
```

```
'Position',[170 150 260 220]);
```

% Всередині Intelligent\_Controller створимо простий Gain як заглушку

```
open_system([model '/Intelligent_Controller']);
```

```
add_block('simulink/Ports & Subsystems/In1', ...
```

```
[model '/Intelligent_Controller/In1'], ...
```

```
'Position',[30 40 50 60]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain', ...
```

```
[model '/Intelligent_Controller/Gain_Int'], ...
```

```
'Gain','1.5', ...
```

```
'Position',[90 35 150 65]);
```

```
add_block('simulink/Ports & Subsystems/Out1', ...
```

```
[model '/Intelligent_Controller/Out1'], ...  
'Position',[200 40 220 60]);  
add_line([model '/Intelligent_Controller'], 'In1/1','Gain_Int/1');  
add_line([model '/Intelligent_Controller'], 'Gain_Int/1','Out1/1');  
close_system([model '/Intelligent_Controller']);
```

% 5. Перемикач між PID та Intelligent

```
add_block('simulink/Signal Routing/Manual Switch', ...  
[model '/Mode_Switch'], ...  
'Position',[260 80 290 185]);
```

% 6. Об'єкт (буріння) - передатна функція

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model '/Plant_Drilling'], ...  
'Numerator', mat2str(num), ...  
'Denominator', mat2str(den), ...  
'Position',[320 90 390 135]);
```

% 7. Вимірюваний вихід ROP

```
add_block('simulink/Sinks/Scope', [model '/Scope_ROP'], ...  
'Position',[460 80 490 110]);
```

% 8. Зворотний зв'язок (виміряний ROP)

```
add_block('simulink/Signal Routing/Goto', [model '/Goto_ROP'], ...  
'GotoTag','ROP_meas', ...  
'Position',[420 145 450 175]);  
add_block('simulink/Signal Routing/From', [model '/From_ROP'], ...  
'GotoTag','ROP_meas', ...  
'Position',[40 135 70 165]);
```

% 9. Віднімання виміряного ROP від завдання

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain', [model '/Minus1'], ...  
    'Gain','-1', ...  
    'Position',[90 135 130 165]);
```

%% З'ЄДНАННЯ ЛІНІЙ

% Контур похибки

```
add_line(model, 'ROP_ref/1','Sum_e/1');  
add_line(model, 'From_ROP/1','Minus1/1');  
add_line(model, 'Minus1/1','Sum_e/2');
```

% Вихід похибки на два регулятори

```
add_line(model, 'Sum_e/1','PID_Controller/1');  
add_line(model, 'Sum_e/1','Intelligent_Controller/1','autorouting','on');
```

% Виходи регуляторів на Mode\_Switch

```
add_line(model, 'PID_Controller/1','Mode_Switch/1');  
add_line(model, 'Intelligent_Controller/1','Mode_Switch/2');
```

% Mode\_Switch → Об'єкт

```
add_line(model, 'Mode_Switch/1','Plant_Drilling/1');
```

% Об'єкт → Scope і в зворотний зв'язок

```
add_line(model, 'Plant_Drilling/1','Scope_ROP/1');  
add_line(model, 'Plant_Drilling/1','Goto_ROP/1');
```

%% Налаштування вигляду

```
set_param(model, 'SimulationCommand','update');
```

% Зберегти модель

```
save_system(model);
```

**ДОДАТОК Б**  
**Повний вміст**  
**drilling\_fuzzy.fis**

[System]

Name='drilling\_fuzzy'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=3

NumOutputs=1

NumRules=16

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

Name='e\_ROP'

Range=[-5 5]

NumMFs=3

MF1='Negative': 'trimf', [-5 -5 0]

MF2='Zero': 'trimf', [-2 0 2]

MF3='Positive': 'trimf', [0 5 5]

[Input2]

Name='Torque'

Range=[0 30]

NumMFs=3

MF1='Low': 'trimf', [0 0 10]

MF2='Medium':'trimf',[5 15 25]

MF3='High':'trimf',[20 30 30]

[Input3]

Name='RPM'

Range=[0 200]

NumMFs=3

MF1='Low':'trimf',[0 0 80]

MF2='Optimal':'trimf',[60 120 180]

MF3='High':'trimf',[150 200 200]

[Output1]

Name='dWOB'

Range=[-10 10]

NumMFs=5

MF1='DecStrong':'trimf',[-10 -10 -5]

MF2='Dec':'trimf',[-8 -4 0]

MF3='Hold':'trimf',[-2 0 2]

MF4='Inc':'trimf',[0 4 8]

MF5='IncStrong':[5 10 10]

[Rules]

1 3 1, 5 (1) : 1

1 3 2, 4 (1) : 1

1 3 3, 3 (1) : 1

3 1 1, 4 (1) : 1

3 2 1, 4 (1) : 1

3 3 1, 2 (1) : 1

3 1 3, 5 (1) : 1

2 2 2, 3 (1) : 1

2 3 2, 2 (1) : 1

2 3 3, 1 (1) : 1

1 2 1, 4 (1) : 1

1 2 2, 3 (1) : 1

2 1 3, 4 (1) : 1

3 1 2, 3 (1) : 1

3 2 3, 2 (1) : 1

1 1 1, 5 (1) : 1