

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ

Група АКПз -22-1

Ігор Логай

2026

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

Логай Ігор Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5: 622.24:004.94

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Удосконалення системи прогнозування ускладнень (прихвати, обвали)

(назва роботи)

процесу буріння

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

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

Здобувач освітнього ступеня

АКПз-22-1 І.Р.Логай
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

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

Рецензент

асистент І.І.Чигур
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту **Завідувач кафедри**

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І.Лагойда

202__ року

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

Логай Ігор Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення системи прогнозування ускладнень (прихвати, обвали) процесу буріння

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

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 29 » 04 2026 року № 38/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2026

3. Вихідні дані до роботи матеріали практики, технологічний регламент

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

4.1. Аналіз сучасного стану проблеми виникнення та прогнозування ускладнень під час буріння свердловин

4.2. Математичне та алгоритмічне забезпечення системи прогнозування

4.3. Проектування технічного забезпечення системи

4.4 Програмне забезпечення системи та інтерфейс користувача

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
БР. АКПз – 15.00.00.000.01– Технологічне обладнання бурової установки та основні потоки. БР. АКПз – 15.00.00.000.02 – Основні технологічні параметри процесу буріння. БР. АКПз – 15.00.00.000.03 – Математичне моделювання динаміки процесу буріння свердловин. БР. АКПз – 15.00.00.000.04 – Схематична логіка роботи всього алгоритму в контурі САК. БР. АКПз – 15.00.00.000.05 – Комплексна імітаційна модель процесу буріння в програмному середовищі MATLAB / Simulink. БР. АКПз – 15.00.00.000.06 – Результати імітаційного моделювання процесу розвитку прихоплення. БР. АКПз – 15.00.00.000.07 – Людино-машинний інтерфейс оператора-бурильника та інженера з моніторингу. БР. АКПз – 15.00.00.000.08 – Промислова мережа обміну даними між буровою та сервером прогнозування

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми виникнення та прогнозування ускладнень під час буріння свердловин	08.05.2026 р.	Виконано
2	Математичне та алгоритмічне забезпечення системи прогнозування	22.05.2026 р.	Виконано
3	Проектування технічного забезпечення системи	30.05.2026р.	Виконано
4	Програмне забезпечення системи та інтерфейс користувача	05.06.2026 р.	Виконано
5	Висновки по роботі	12.06.2026 р.	Виконано

Студент _____
(підпис)

І.Р. Логай _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М.В.Шавранський _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 86 сторінок друкованого тексту, 14 рисунків, 4 таблиці, 25 переліків посилань на джерела і 2 додатки.

Тема: «Удосконалення системи прогнозування ускладнень (прихвати, обвали) процесу буріння»

Об'єкт дослідження: технологічний процес буріння нафтогазових свердловин і прогнозування ускладнень, що виникають під час буріння, зокрема прихватів бурильної колони та обвалів стінок свердловини.

Мета проекту: удосконалення системи прогнозування ускладнень процесу буріння нафтогазових свердловин шляхом аналізу технологічних параметрів буріння, розроблення математичних моделей та алгоритмів раннього виявлення прихватів бурильної колони і обвалів стінок свердловини.

Методи дослідження: у роботі використано методи теорії автоматичного керування, математичного моделювання; методи прогнозування та виявлення аномалій; комп'ютерне моделювання в середовищах MATLAB/Simulink; а також методи аналізу та синтезу систем моніторингу й прогнозування ускладнень процесу буріння.

Результати кваліфікаційної роботи: проведено аналіз причин виникнення ускладнень процесу буріння нафтогазових свердловин, зокрема прихватів бурильної колони та обвалів стінок свердловини. Досліджено основні технологічні параметри буріння, що впливають на появу аварійних ситуацій, та виконано аналіз існуючих систем моніторингу і прогнозування ускладнень. Розроблено математичну модель та алгоритм прогнозування ускладнень на основі аналізу технологічних параметрів буріння та запропоновано структуру удосконаленої системи прогнозування.

Ключові слова: процес буріння, нафтогазова свердловина, прихвати бурильної колони, обвали стінок свердловини, прогнозування ускладнень, технологічні параметри буріння, система моніторингу, математичне моделювання, автоматизоване керування, аналіз даних, виявлення аномалій, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 86 pages of printed text, 14 figures, 4 tables, 25 lists of references and 2 appendices.

Topic: "Improvement of the system for predicting complications (sticking, collapses) of the drilling process"

Object of research: the technological process of drilling oil and gas wells and predicting complications that arise during drilling, in particular, stickiness of the drill string and collapses of the well walls.

Project goal: improvement of the system for predicting complications of the drilling process of oil and gas wells by analyzing technological parameters of drilling, developing mathematical models and algorithms for early detection of stickiness of the drill string and collapses of the well walls.

Research methods: the work uses methods of the theory of automatic control, mathematical modeling; methods of forecasting and detecting anomalies; computer modeling in MATLAB/Simulink environments; as well as methods of analysis and synthesis of systems for monitoring and predicting complications of the drilling process.

Results of qualification work: an analysis of the causes of complications in the drilling process of oil and gas wells, in particular, stuck drill string and collapses of well walls, was carried out. The main technological parameters of drilling that affect the occurrence of emergency situations were studied, and an analysis of existing monitoring and prediction systems for complications was performed. A mathematical model and algorithm for predicting complications were developed based on the analysis of technological parameters of drilling, and the structure of an improved prediction system was proposed.

Keywords: drilling process, oil and gas well, stuck drill string, collapses of well walls, prediction of complications, technological parameters of drilling, monitoring system, mathematical modeling, automated control, data analysis, anomaly detection, MATLAB/Simulink.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ВИНИКНЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ УСКЛАДНЕНЬ ПІД ЧАС БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН.....	16
1.1 Загальна характеристика процесу буріння нафтогазових свердловин.....	16
1.2 Причини виникнення ускладнень при бурінні.....	19
1.3 Аналіз технологічних параметрів, що впливають на виникнення ускладнень	22
1.4 Аналіз існуючих систем моніторингу та прогнозування ускладнень.....	26
1.5 Постановка задачі дослідження.....	29
Висновки до розділу.....	31
2 МАТЕМАТИЧНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ	33
2.1 Математичне моделювання динаміки параметрів буріння в нормальному режимі та в моменти розвитку ускладнень.....	33
2.2 Розробка алгоритму раннього виявлення передаварійних ситуацій за технологічними трендами на основі нечіткої логіки	37
2.3 Алгоритми цифрової фільтрації шумів та попередньої обробки сигналів, що надходять від вибою та гирла свердловини	40
2.4 Моделювання роботи запропонованого алгоритму в середовищі MATLAB / Simulink.....	44
Висновки до розділу	50
3 ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ.....	52
3.1 Розробка загальної структури комп'ютерно-інтегрованої системи прогнозування за рівнями Індустрії 4.0.....	52

					БР.АКПз - 15.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докумен.	Підпис	Дата				
Розроб.	Логай І.Р.				Удосконалення системи прогнозування ускладнень (прихвати, обвали) процесу буріння	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Шавранський М.В						6	90
Реценз.	Чигур І.І					АКПз-22-1, ІФНТУНГ		
Н. Контр.	Кучмистенко О.В							
Затверд.	Лагойда А.І.							

3.2 Вибір засобів автоматизації	56
3.3 Вибір та обґрунтування ПЛК та модулів аналогового/цифрового вводу-виводу для збору даних у реальному часі.....	60
3.4 Опис розробленої функціональної схеми автоматизації (ФСА / АКС) процесу буріння	63
3.5 Програмна реалізація системи прогнозування ускладнень	67
Висновки до розділу.....	70
4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТА ІНТЕРФЕЙС КОРИСТУВАЧА	72
4.1 Розробка прикладного програмного забезпечення для контролера.....	72
4.2 Проєктування людино-машинного інтерфейсу (НМІ) оператора-бурильника та інженера з моніторингу в середовищі SCADA (TIA Portal).....	75
4.3 Реалізація підсистеми візуалізації, побудови графіків (трендів) та системи попереджувальної/аварійної сигналізації (Alarms).....	79
4.4 Організація промислової мережі для обміну даними (Modbus TCP, OPC UA) між буровою та сервером прогнозування.....	82
Висновки до розділу	85
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	87
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	89
ДОДАТКИ.....	91

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування

АСУ ТП – автоматизовані системи управління технологічними процесами

ВУП – вал верхнього приводу

ГПВП – газонафтоводопроводи

ЗА – засоби автоматизації

ЗТС – забійні телеметричні системи

ІСП – інтелектуальна система прогнозування

КІСАК – комп'ютерно-інтегровані системи автоматичного керування

КНБК – компоновка низу бурильної колони

ММ – математичне моделювання

МНК – метод найменших квадратів

НГС – нафтогазова свердловина

ПЗ – програмне забезпечення

ПЛК – програмований логічний контролер

САК – система автоматичного керування

СПО – спуско-підіймальні операції

ТП – технологічний процес

ФСА – функціональна схема автоматизації

ЧРП – частотне регулювання приводу

					БР. АКПз -15.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Буріння свердловин є одним із найбільш технологічно складних і витратних процесів у нафтогазовій промисловості. Одними з найнебезпечніших і найдорожчих аварійних ситуацій, що виникають у ході буріння, є прихвати бурильного інструменту та обвали стінок свердловини. Ці ускладнення призводять до значних економічних збитків — простоїв, додаткових витрат на ліквідацію аварій, а в окремих випадках — до повної втрати свердловини. За різними оцінками, витрати нафтогазових компаній на ліквідацію прихватів і обвалів становлять від 10 до 30% від загальної вартості буріння свердловини, що в грошовому еквіваленті може обчислюватися мільйонами доларів США на окремих родовищах.

Незважаючи на значний досвід, накопичений у галузі попередження та ліквідації ускладнень, сучасний стан систем прогнозування залишається недостатньо ефективним. Традиційні підходи базуються переважно на статистичних методах і досвіді бурильників, що не дозволяє оперативно реагувати на динамічно змінювані умови буріння. Геомеханічні параметри пластів, реологічні властивості бурового розчину, геометрія стовбура свердловини та гідродинамічні процеси формують складну багатофакторну систему, що потребує інтелектуальних методів аналізу в режимі реального часу. Сучасний розвиток технологій цифровізації, промислового Інтернету речей (ІоТ) та методів машинного навчання відкриває принципово нові можливості для вдосконалення систем прогнозування ускладнень. Застосування алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж, а також гібридних моделей, що поєднують фізичне моделювання з аналізом даних (physics-informed models), дозволяє будувати системи раннього попередження, здатні виявляти передвісники прихватів та обвалів задовго до їх реального прояву. Це забезпечує бурильній бригаді достатній час для вжиття превентивних заходів.

Актуальність теми посилюється також розширенням географії буріння — зростанням частки складних свердловин: горизонтальних, багатовибійних, а також свердловин, що проводяться в зонах геологічних порушень, аномально

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

високих пластових тисків або нестійких порід. Для таких умов класичні методи прогнозування виявляються особливо неефективними, тоді як адаптивні інтелектуальні системи здатні враховувати індивідуальну специфіку кожного об'єкта буріння.

Дана тема є особливо значущою, оскільки передбачає розроблення та вдосконалення автоматизованих систем управління технологічними процесами, інтеграцію сенсорних підсистем і алгоритмів прийняття рішень у єдиний комп'ютерно-інтегрований комплекс. Впровадження такої системи сприяє підвищенню безпеки праці, зниженню аварійності, збільшенню техніко-економічної ефективності буріння та реалізації концепції «розумного буріння» (Smart Drilling).

Таким чином, удосконалення системи прогнозування ускладнень процесу буріння – прихватів і обвалів – є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого має важливе значення як для нафтогазової промисловості України, так і для розвитку вітчизняних технологій автоматизації складних технологічних процесів.

Обґрунтування вибору теми дослідження зумовлене сукупністю науково-технічних, економічних та виробничих чинників, які підтверджують доцільність і своєчасність проведення даної роботи.

1. Висока економічна значущість проблеми

Процес буріння нафтових і газових свердловин супроводжується значними ризиками виникнення аварійних ситуацій, серед яких прихвати бурильного інструменту та обвали стінок свердловини посідають провідне місце за частотою виникнення та величиною матеріальних збитків. За даними світової практики, від 10 до 30% загальної вартості буріння витрачається на ліквідацію подібних ускладнень. В умовах зростання глибини та складності свердловин ці витрати невпинно збільшуються, що робить завдання їх попередження першочерговим пріоритетом для нафтогазових підприємств.

2. Недостатній рівень розвитку існуючих систем прогнозування

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Наявні на виробництві системи контролю процесу буріння здебільшого орієнтовані на реєстрацію фактичних відхилень технологічних параметрів — тобто фіксують вже виникле ускладнення, а не попереджають його. Системи превентивного прогнозування або відсутні, або базуються на застарілих детерміністських моделях, які не враховують динамічного характеру геологічного середовища, нелінійності взаємозв'язків між параметрами та індивідуальних особливостей конкретної свердловини. Це зумовлює необхідність розроблення нових підходів до прогнозування, здатних працювати в режимі реального часу.

3. Стрімкий розвиток методів штучного інтелекту та машинного навчання

Сучасний стан обчислювальних технологій і методів аналізу даних відкриває нові можливості для інтелектуалізації систем управління складними технологічними процесами. Алгоритми машинного навчання — зокрема методи класифікації, регресії, ансамблеві методи (Random Forest, Gradient Boosting), а також рекурентні та згорткові нейронні мережі — продемонстрували високу ефективність при аналізі часових рядів і прогнозуванні аномалій у промислових системах. Адаптація цих методів до задач прогнозування ускладнень буріння є перспективним науковим напрямом, що активно розвивається у світі, однак залишається недостатньо опрацьованим у вітчизняній науковій і технічній літературі.

4. Цифровізація нафтогазової галузі та накопичення великих обсягів даних

Широке впровадження систем телеметрії вибою (MWD/LWD), автоматизованих бурових установок і платформ збору даних реального часу призвело до формування масивів технологічної інформації великого обсягу. Ці дані містять приховані закономірності, що передують виникненню ускладнень, однак їх аналіз класичними методами є практично неможливим через високу розмірність і швидкість надходження інформації. Використання інтелектуальних методів обробки даних дозволяє перетворити ці масиви на практично корисну прогностичну інформацію.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

5. Відповідність напряму підготовки фахівців спеціальності 174

Тема органічно вписується у проблематику спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», охоплюючи такі ключові компетентності як: проектування автоматизованих систем управління технологічними процесами, розроблення алгоритмів і програмного забезпечення систем реального часу, інтеграція сенсорних підсистем із системами прийняття рішень, а також застосування методів комп'ютерного моделювання для дослідження складних динамічних об'єктів. Таким чином, дослідження має виражений міждисциплінарний характер, поєднуючи нафтогазову інженерію, теорію автоматичного управління та комп'ютерні науки.

6. Практична затребуваність результатів

Результати дослідження мають безпосереднє прикладне значення для підприємств нафтогазового комплексу України, зокрема в умовах активізації геологорозвідувальних робіт і необхідності підвищення ефективності буріння на родовищах зі складними геологічними умовами. Розроблена система може бути інтегрована до складу існуючих автоматизованих бурових комплексів або функціонувати як самостійний програмно-апаратний модуль підтримки прийняття рішень.

7. Наукова новизна та перспективність напряму

Аналіз вітчизняних і зарубіжних публікацій свідчить про те, що питання побудови комплексних інтелектуальних систем прогнозування прихватів і обвалів із застосуванням сучасних методів машинного навчання та обробки даних у режимі реального часу залишається відкритим і потребує подальшого дослідження. Це підтверджує наукову актуальність обраної теми і свідчить про наявність простору для оригінального внеску автора.

Таким чином, вибір теми «Удосконалення системи прогнозування ускладнень (прихвати, обвали) процесу буріння» є науково обґрунтованим, практично значущим і відповідає сучасному рівню розвитку як нафтогазових

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

технологій, так і методів автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих систем управління.

Мета і завдання дослідження.

Метою дослідження є удосконалення системи прогнозування ускладнень процесу буріння — захоплення бурильного інструменту та обвалів стінок свердловини — шляхом розроблення інтелектуальної комп'ютерно-інтегрованої підсистеми раннього передування на основі методів машинного навчання та аналізу технологічних даних у режимі реального часу, що забезпечує підвищення оперативності та надійності прогнозу та швидкого зниження аварійності та економічних втрат у процесі буріння свердловин.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) Аналіз стану проблеми та огляд існуючих підходів: Провести систематичний аналіз причин і механізмів виникнення захоплень і обвалів у процесі буріння свердловин; Виконати огляд і критичний аналіз існуючих методів і ускладнень прогнозування системи, застосування їх переваг, недоліків та обмежень; Дослідити сучасні методи машинного навчання та інтелектуального аналізу даних, які застосовуються або можуть бути застосовані для вирішення завдань прогнозування в нафтогазовій галузі.

2) Визначення інформаційної бази системи прогнозування: Встановити перелік технологічних параметрів буріння, який є інформативними показниками передвісників ускладнень (навантаження на гак, тиск бурового розчину, момент обертання, швидкість проходки, витрата і густота розчину тощо); Проаналізувати структуру та якість наявних промислових даних, виявити характерні закономірності, що передують виникненню захоплень і обвалів; Здійснити попередню обробку даних: очищення від аномалій і шумів, нормалізацію, відбір та формування інформативних ознак (feature engineering).

3) Розробка математичної моделі прогнозування ускладнень: Сформулювати задачу прогнозування в термінах машинного навчання (класифікація, виявлення аномалій або регресія часу до виникнення ускладнень); Дослідіть та порівняйте кілька алгоритмів машинного навчання (Random Forest,

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Gradient Boosting, LSTM-мережі тощо) за критеріями точності, швидкості та інтерпретованості; Обрати та обґрунтувати оптимальну модель або їх ансамбль для побудови системи прогнозування.

4) Розробка структури та алгоритмічного забезпечення системи: Розробити загальну архітектуру комп'ютерно-інтегрованої системи прогнозування ускладнень, розмістити її функціональні блоки та інформаційні потоки; Розробити алгоритми збору, первинної обробки та передачі технологічних даних у режимі реального часу; Розробити алгоритм прийняття рішень та формування сигналів раннього попередження з визначенням порогових значень і рівнів критичності.

5) Програмна реалізація та верифікація систем: Реалізувати розроблені алгоритми у вигляді програмного забезпечення з використанням сучасних інструментальних засобів (Python, відповідні бібліотеки машинного навчання); Провести навчання та налаштування моделей на реальних або модельних даних процесу буріння; Верифікувати розроблену систему на тестових даних, оцінити її точність, чутливість і специфічність за прийнятими метриками якості.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань і досягнення мети дослідження використовується комплекс теоретичних, емпіричних та інструментальних методів, які охоплюють різні аспекти розробки інтелектуальної системи прогнозування ускладнень процесу буріння.

1) Методи теоретичного аналізу: системний аналіз; причинно-наслідковий аналіз; порівняльний аналіз; абстрагування та формалізація.

2) Методи математичного моделювання: теорія ймовірностей і математична статистика; кореляційний і регресійний аналіз; аналіз часових рядів.

3) Методи машинного навчання та інтелектуального аналізу даних: методи класифікації; методи глибокого навчання; метод виявлення аномалій; методи відбору та конструювання ознак (Feature Engineering); методи крос-валідації та оцінювання якості моделей

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

4) Методи обробки даних: методи попередньої обробки даних; методи балансування класів; методи обробки поточкових даних.

5) Методи програмної реалізації та верифікації: Об'єктно-орієнтоване програмування; методи імітаційного моделювання; методи верифікації та валідації програмного забезпечення.

Структура та обсяг бакалаврської роботи. Бакалаврська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань на джерела з 25 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 86 сторінок, у тому числі 4 таблиці і 14 рисунків.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ВИНИКНЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ УСКЛАДНЕНЬ ПІД ЧАС БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

1.1 Загальна характеристика процесу буріння нафтогазових свердловин

Процес буріння нафтогазових свердловин є складним технологічним процесом, метою якого є створення глибокого каналу у гірських породах для розкриття нафтових і газових пластів. Буріння супроводжується механічним руйнуванням породи долотом, видаленням вибуреної породи на поверхню за допомогою бурового розчину та забезпеченням стійкості стінок свердловини. Сучасні бурові установки це автоматизовані комплекси, оснащені системами контролю, регулювання та моніторингу технологічних параметрів [1, 2, 3].

1.1.1 Основні етапи буріння

Процес буріння свердловини включає декілька послідовних етапів, кожен з яких характеризується певними технологічними особливостями.

Підготовчий етап: На початковому етапі проводиться підготовка бурового майданчика, монтаж бурової установки, прокладання комунікацій та підключення енергетичного обладнання. Також виконується встановлення систем очищення бурового розчину та резервуарів для його зберігання.

Буріння напрямку: Перший інтервал свердловини буриться для формування початкового каналу та встановлення прямої обсадної колони. Цей етап забезпечує стабільність верхньої частини свердловини.

Буріння кондуктора: На цьому етапі здійснюється поглиблення свердловини до стійких порід і спуск кондукторної колони. Кондуктор запобігає осипанню порід та ізолює водоносні горизонти.

Буріння основного стовбура свердловини: Основний етап буріння, під час якого здійснюється проходка продуктивних горизонтів. У процесі буріння постійно контролюються технологічні параметри: осьове навантаження на

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

долото; частота обертання бурильної колони; крутний момент; тиск бурового розчину; швидкість проходки; витрата бурового розчину.

Кріплення свердловини: Після проходження окремих інтервалів здійснюється спуск обсадних колон і цементування затрубного простору. Це необхідно для зміцнення стінок свердловини та запобігання міжпластовим перетокам.

Завершення буріння: Після досягнення проектної глибини проводяться геофізичні дослідження, випробування пластів та підготовка свердловини до експлуатації.

1.1.2 Технологічне обладнання бурової установки

Бурова установка складається з комплексу механічного, енергетичного та контрольно-вимірювального обладнання, що забезпечує виконання технологічного процесу буріння (Рисунок 1.1).

Бурова вежа призначена для спуско-підіймальних операцій, утримання бурильної колони та розміщення талевої системи. Висота вежі залежить від глибини буріння та типу установки.

Талева система включає: кронблок; талевий блок; буровий гак; канат. Вона забезпечує піднімання та опускання бурильної колони.

Лебідка: Бурова лебідка використовується для виконання спуско-підіймальних операцій та регулювання навантаження на долото.

Ротор або верхній привід забезпечують обертання бурильної колони. Сучасні бурові установки переважно оснащуються системами Top Drive, які забезпечують кращу керованість процесом буріння.

Бурові насоси створюють циркуляцію бурового розчину через бурильну колону та кільцевий простір свердловини.

Система очищення бурового розчину: До складу системи входять: вібросита; пісковідділювачі; муловідділювачі; дегазатори. Система забезпечує очищення бурового розчину від вибуреної породи.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Контрольно-вимірювальні прилади та системи автоматизації: Сучасні бурові установки оснащуються: датчиками тиску; датчиками навантаження; витратомірами; системами контролю крутного моменту; SCADA-системами; системами MWD/LWD [1, 4].

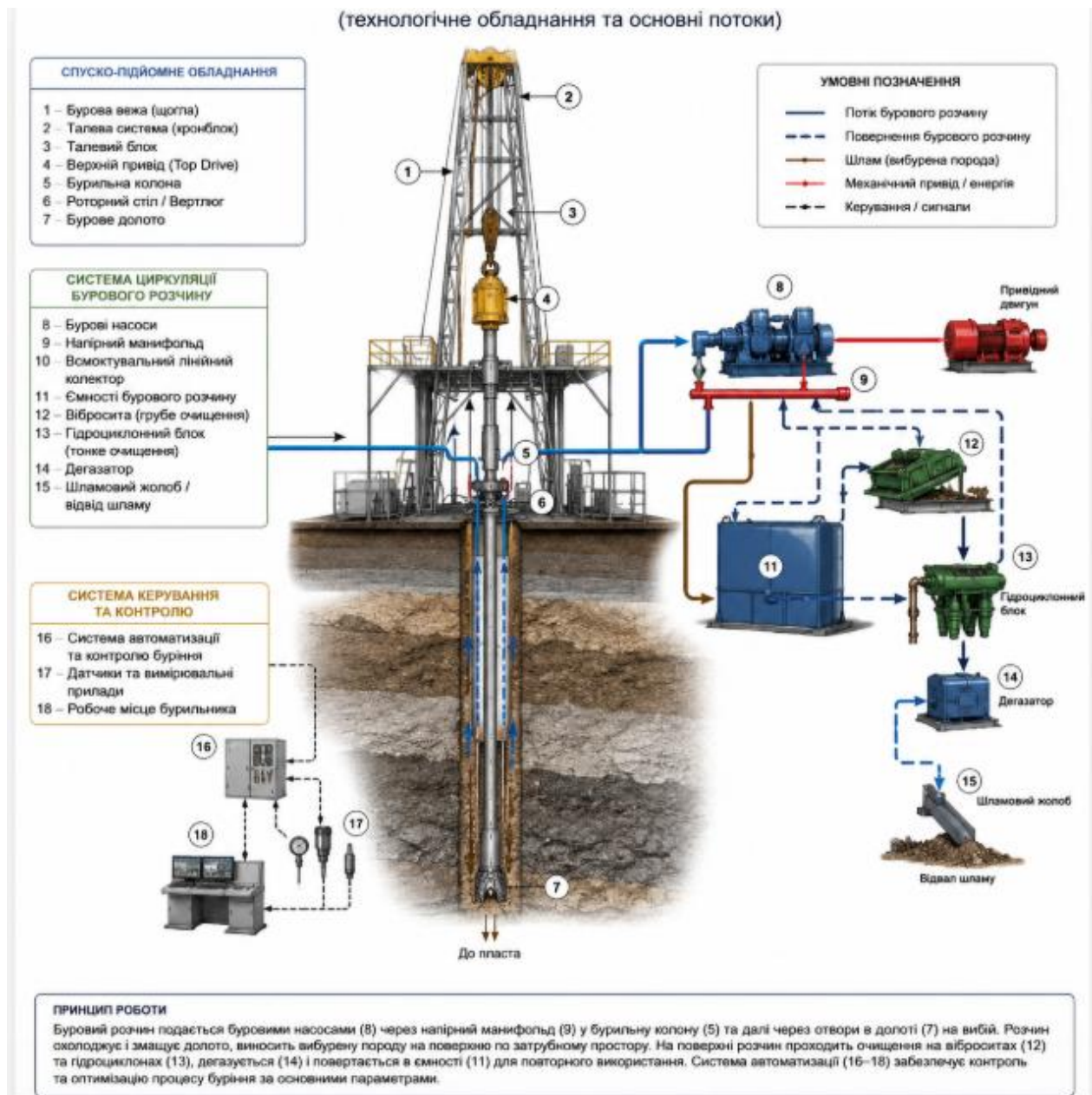


Рисунок 1.1 – Технологічне обладнання та основні потоки

Автоматизовані системи дозволяють здійснювати моніторинг технологічних параметрів у реальному часі та прогнозувати виникнення аварійних ситуацій.

1.1.3 Основні параметри процесу буріння

Ефективність процесу буріння значною мірою залежить від правильного контролю та регулювання технологічних параметрів [2, 3, 5].

- 1) Осьове навантаження на долото (WOB) визначає силу притискання долота до вибою. Недостатнє навантаження знижує швидкість буріння, а надмірне — може призвести до руйнування долота або прихвату бурильної колони.
- 2) Частота обертання бурильної колони (RPM) впливає на інтенсивність руйнування породи та механічну швидкість проходки.
- 3) Крутний момент характеризує опір обертанню бурильної колони. Його різке збільшення може свідчити про виникнення прихвату або нестабільність стінок свердловини.
- 4) Тиск бурового розчину забезпечує винесення вибуреної породи та підтримання стійкості свердловини. Неправильний вибір тиску може викликати обвали або поглинання бурового розчину.
- 5) Витрата бурового розчину визначає ефективність очищення вибою та транспортування шламу на поверхню.
- 6) Швидкість проходки (ROP) характеризує ефективність руйнування породи та є одним із основних показників продуктивності буріння.
- 7) Контроль температури і вібрацій бурильної колони дозволяє вчасно виявляти перевантаження, зношення обладнання та аварійні режими роботи.

Таким чином, процес буріння нафтогазових свердловин є багатофакторним технологічним процесом, ефективність і безпечність якого визначаються якістю контролю та автоматизованого керування основними параметрами буріння.

1.2 Причини виникнення ускладнень при бурінні

Процес буріння нафтогазових свердловин супроводжується значною кількістю геологічних, технологічних та технічних ускладнень, які можуть призводити до аварій, зниження механічної швидкості проходки, збільшення вартості буріння та втрати продуктивного часу. Найбільш поширеними

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

ускладненнями є прихвати бурильної колони, обвали стінок свердловини, втрати циркуляції бурового розчину та диференціальні прихвати.

1.2.1 Прихвати бурильної колони

Прихват бурильної колони – це аварійна ситуація, за якої бурильний інструмент частково або повністю втрачає рухомість у стовбурі свердловини. Таке явище є одним із найнебезпечніших ускладнень буріння, оскільки може призвести до значних матеріальних витрат і навіть ліквідації свердловини [6, 7].

Основними причинами виникнення прихватів є: осипання та обвали гірських порід; накопичення шламу у стовбурі свердловини; викривлення траєкторії свердловини; недостатня швидкість циркуляції бурового розчину; перепади тиску між пластом і свердловиною; заклинювання бурильної колони в зоні нестійких порід.

Основними ознаками прихвату є різке зростання крутного моменту, збільшення навантаження на гаку та неможливість переміщення бурильної колони.

1.2.2 Обвали стінок свердловини

Обвали стінок свердловини виникають унаслідок втрати стійкості гірських порід під дією механічних навантажень або порушення гідродинамічної рівноваги між пластовим і свердловинним тиском.

Основними причинами обвалів є: недостатня густина бурового розчину; розбурювання нестійких глинистих порід; порушення режимів промивання; високі механічні напруження в масиві порід; тривалий час перебування відкритого стовбура без кріплення.

Обвали спричиняють звуження стовбура свердловини, збільшення моменту обертання, ускладнення спуско-підймальних операцій та ризик прихвату бурильної колони [3, 8].

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

1.2.3 Втрати циркуляції

Втрати циркуляції бурового розчину полягають у частковому або повному поглинанні промивальної рідини пластом через тріщини, каверни або високопроникні зони.

Основними причинами втрат циркуляції є: наявність тріщинуватих порід; високий пластовий коефіцієнт проникності; перевищення гідростатичного тиску над пластовим; руйнування слабких геологічних структур; використання бурового розчину з невідповідними реологічними характеристиками.

Втрати циркуляції можуть призводити до порушення очищення вибою, погіршення охолодження долота, виникнення газонафтоводопроявів та аварійних ситуацій [2, 9].

1.2.4 Диференціальні прихвати

Диференціальний прихват виникає внаслідок притискання бурильної колони до стінки свердловини під дією різниці між гідростатичним тиском бурового розчину та пластовим тиском.

Умова виникнення диференціального прихвату визначається перепадом тисків [6, 7]:

$$\Delta P = P_{\text{бур}} - P_{\text{пл}}$$

де:

$P_{\text{бур}}$ – тиск бурового розчину;

$P_{\text{пл}}$ – пластовий тиск.

При значному перепаді тисків бурильна колона притискається до проникної стінки свердловини, внаслідок чого виникає її заклинювання.

До основних причин диференціальних прихватів належать: надлишкова густина бурового розчину; тривале перебування колони без руху; висока проникність пласта; недостатня товщина фільтраційної кірки; порушення режимів циркуляції.

Для зменшення ризику виникнення ускладнень при бурінні використовують сучасні системи моніторингу технологічних параметрів,

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

автоматизовані системи контролю буріння, а також методи прогнозування аварійних ситуацій на основі математичних моделей та алгоритмів штучного інтелекту.

1.3 Аналіз технологічних параметрів, що впливають на виникнення ускладнень

Ефективність та безпечність процесу буріння нафтогазових свердловин значною мірою визначається правильним вибором і підтриманням технологічних параметрів буріння. Відхилення режимних параметрів від оптимальних значень може призводити до виникнення прихватів бурильної колони, обвалів стінок свердловини, втрат циркуляції та інших аварійних ситуацій. До основних параметрів, які найбільше впливають на виникнення ускладнень, належать осьове навантаження на долото, крутний момент, тиск і витрата бурового розчину, а також механічна швидкість проходки.

1.3.1 Осьове навантаження на долото (WOB — Weight on Bit) є одним із головних параметрів процесу буріння, який визначає інтенсивність руйнування гірської породи [2, 5].

$$WOB = G - G_{\text{гак}}$$

де:

G – вага бурильної колони;

$G_{\text{гак}}$ – навантаження на гаку.

Недостатнє осьове навантаження призводить до зменшення швидкості проходки та підвищеного зношування долота. Надмірне навантаження може спричиняти: заклинювання долота; виникнення вібрацій і биття бурильної колони; деформацію бурильного інструменту; прихвати в нестійких породах; руйнування стінок свердловини.

У сучасних системах автоматизованого буріння параметр WOB контролюється в реальному часі за допомогою датчиків навантаження та систем адаптивного керування.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

1.3.2 Крутний момент

Крутний момент характеризує навантаження на обертальний привід бурильної колони та є важливим показником технічного стану процесу буріння [5, 6].

$$M = F \cdot r$$

де:

M – крутний момент;

F – сила;

r – радіус прикладання сили.

Зростання крутного моменту може свідчити про: накопичення шламу в стовбурі свердловини; звуження стовбура; виникнення прихвату; підвищене тертя бурильної колони; нестабільність гірських порід.

Різкі коливання крутного моменту часто є ознакою розвитку аварійної ситуації та використовуються системами моніторингу для раннього виявлення ускладнень.

1.3.3 Тиск бурового розчину

Тиск бурового розчину забезпечує стабілізацію стінок свердловини та запобігає проникненню пластових флюїдів у стовбур свердловини.

Гідростатичний тиск визначається виразом [2, 3]:

$$P = \rho g h$$

де:

ρ – густина бурового розчину;

g – прискорення вільного падіння;

h – глибина свердловини.

Недостатній тиск може спричиняти: обвали стінок свердловини; газонафтоводопрояви; нестійкість порід.

Надлишковий тиск бурового розчину може викликати: гідророзрив пласта; втрати циркуляції; диференціальні прихвати.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Тому підтримання оптимального тиску є одним із ключових завдань систем автоматичного керування бурінням.

1.3.4 Витрата бурового розчину

Витрата бурового розчину визначає ефективність очищення вибою від вибуреної породи та охолодження бурового інструменту [1, 9].

$$Q = A \cdot v$$

де:

Q – витрата бурового розчину;

A – площа поперечного перерізу потоку;

v – швидкість руху рідини.

Недостатня витрата бурового розчину призводить до: накопичення шламу; погіршення очищення вибою; підвищення крутного моменту; збільшення ризику прихвату бурильної колони.

Надмірна витрата може спричиняти ерозію стінок свердловини та додаткові гідродинамічні навантаження.

1.3.5 Швидкість проходки (ROP)

Механічна швидкість проходки (ROP — Rate of Penetration) характеризує швидкість заглиблення свердловини та є одним із головних показників ефективності буріння [5, 10].

$$ROP = dH/dt$$

де:

H – глибина свердловини;

t – час буріння.

Зниження швидкості проходки може бути пов'язане з: зношуванням долота; недостатнім осьовим навантаженням; накопиченням шламу; погіршенням очищення вибою; виникненням прихватів.

Різне збільшення ROP інколи свідчить про входження в нестійкі або тріщинуваті породи, що підвищує ризик обвалів і втрат циркуляції.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Комплексний аналіз технологічних параметрів буріння дозволяє своєчасно виявляти передаварійні стани та реалізовувати системи прогнозування ускладнень. Сучасні інтелектуальні системи автоматичного керування використовують дані датчиків у режимі реального часу для оцінювання технічного стану процесу буріння та прийняття рішень щодо оптимізації режимів роботи бурового обладнання.

Всі описані вище технологічні параметри зведені в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технологічні параметри

Технологічний параметр	Позначення	Основний вплив на процес буріння	Можливі ускладнення при відхиленні параметра	Ознаки виникнення ускладнень
Осьове навантаження на долото	WOB	Визначає інтенсивність руйнування гірської породи та механічну швидкість проходки	Прихвати бурильної колонії, руйнування долота, вібрації, деформація бурильного інструменту, обвали стінок свердловини	Зростання вібрацій, нестабільність проходки, збільшення навантаження на гаку
Крутний момент	M	Характеризує опір обертанню бурильної колонії та технічний стан процесу буріння	Прихвати, накопичення шламу, звуження стовбура свердловини, підвищене тертя бурильної колонії	Різке зростання або коливання крутного моменту
Тиск бурового розчину	P	Забезпечує стабілізацію стінок свердловини та запобігає проникненню пластових флюїдів	Обвали стінок свердловини, газонафтоводопроводи, втрати циркуляції, диференціальні прихвати	Падіння або різке зростання тиску, нестабільність циркуляції
Витрата бурового розчину	Q	Забезпечує очищення вибою та транспортування вибуреної породи	Накопичення шламу, погіршення очищення вибою, прихвати, ерозія стінок свердловини	Підвищення крутного моменту, погіршення виносення шламу
Швидкість проходки	ROP	Характеризує ефективність руйнування породи та продуктивність буріння	Прихвати, обвали, втрати циркуляції, зношування долота	Різке зниження або збільшення швидкості проходки
Частота обертання бурильної колонії	RPM	Впливає на інтенсивність руйнування породи та стабільність буріння	Вібрації, нестійкість бурильної колонії, підвищене зношування долота	Нестабільність обертання, коливання навантаження
Навантаження на гаку	$G_{\text{гак}}$	Відображає стан бурильної колонії та зміну механічних навантажень	Прихвати, заклинювання бурильної колонії	Різке збільшення навантаження
Вібрації бурильної колонії	—	Характеризують динамічний стан бурильної системи	Руйнування долота, втомне пошкодження бурильної колонії, нестійкість процесу буріння	Поява високочастотних коливань і ударних навантажень

1.4 Аналіз існуючих систем моніторингу та прогнозування ускладнень

Сучасний процес буріння нафтогазових свердловин характеризується високою складністю технологічних операцій та значною кількістю параметрів, що змінюються в реальному часі. Для забезпечення безпечного та ефективного буріння використовуються системи моніторингу й прогнозування ускладнень, які дозволяють контролювати технологічний процес, своєчасно виявляти аварійні ситуації та мінімізувати ризики виникнення прихватів, обвалів і втрат циркуляції.

1.4.1 Традиційні системи контролю

Традиційні системи контролю базуються на використанні окремих вимірювальних приладів та локальних систем автоматизації, призначених для спостереження за основними параметрами буріння [11, 12].

До основних контрольованих параметрів належать: осьове навантаження на долото; крутний момент; тиск бурового розчину; витрата бурового розчину; частота обертання бурильної колони; навантаження на гаку; механічна швидкість проходки.

У таких системах інформація від датчиків передається оператору бурової установки, який приймає рішення щодо зміни режимів буріння. Основними перевагами традиційних систем є простота реалізації та відносно невисока вартість.

Проте традиційні системи мають низку суттєвих недоліків: відсутність автоматичного прогнозування аварій; значна залежність від кваліфікації оператора; низька швидкість реагування на зміни параметрів; обмежені можливості аналізу великих обсягів даних; недостатня адаптація до складних геологічних умов.

1.4.2 SCADA та системи телеметрії

Для підвищення ефективності контролю процесу буріння широко застосовуються SCADA-системи та системи телеметрії, які забезпечують централізований збір, передачу та візуалізацію технологічної інформації.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Сучасні SCADA-системи дозволяють: здійснювати безперервний моніторинг параметрів буріння; архівувати технологічні дані; візуалізувати процес буріння в режимі реального часу; формувати аварійні повідомлення; виконувати дистанційний контроль обладнання; інтегрувати дані з різних підсистем бурової установки [11, 13].

У нафтогазовій галузі широко використовуються такі SCADA-платформи, як: Honeywell Experion PKS; Emerson DeltaV; Siemens WinCC; ABB System 800xA.

Системи телеметрії MWD (Measurement While Drilling) та LWD (Logging While Drilling) забезпечують передачу інформації безпосередньо із вибою свердловини, що дозволяє оперативно оцінювати стан бурового процесу та геологічні характеристики пластів.

Основними перевагами SCADA та телеметричних систем є: висока оперативність отримання даних; можливість дистанційного моніторингу; автоматичне формування сигналів тривоги; накопичення історичних даних; інтеграція з PLC та іншими системами автоматизації.

Разом із тим такі системи переважно виконують функції моніторингу та сигналізації, але не забезпечують повноцінного прогнозування складних аварійних ситуацій.

1.4.3 Інтелектуальні системи прогнозування

У сучасних умовах для прогнозування (ІСП) ускладнень при бурінні дедалі ширше використовуються інтелектуальні системи, засновані на методах штучного інтелекту, машинного навчання та аналізу великих даних.

Основними напрямками розвитку інтелектуальних систем є: нейронні мережі; нечітка логіка; експертні системи; алгоритми класифікації та розпізнавання аномалій; предиктивна аналітика; цифрові двійники бурових процесів.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Інтелектуальні системи аналізують комплекс параметрів буріння в режимі реального часу та дозволяють виявляти приховані закономірності, які передують виникненню ускладнень [14, 15, 16].

Для прогнозування аварійних ситуацій можуть використовуватися такі параметри: зміна крутного моменту; коливання тиску бурового розчину; зростання навантаження на гаку; нестабільність швидкості проходки; рівень вібрацій бурильної колони.

Системи прогнозування на базі машинного навчання здатні автоматично адаптуватися до зміни геологічних умов та накопичувати досвід роботи на основі історичних даних буріння.

1.4.4 Недоліки існуючих рішень

Незважаючи на значний розвиток систем автоматизації буріння, існуючі рішення мають низку недоліків, що обмежують ефективність їх використання.

До основних недоліків належать: недостатня точність прогнозування у складних геологічних умовах; висока залежність від якості вхідних даних; складність інтеграції різнорідних систем; значні обчислювальні ресурси для обробки великих масивів даних; обмежена адаптивність традиційних алгоритмів; складність інтерпретації результатів роботи нейронних мереж; висока вартість впровадження та обслуговування інтелектуальних систем.

Крім того, значна частина існуючих систем орієнтована лише на контроль окремих параметрів, а не на комплексний аналіз взаємозв'язків між технологічними показниками процесу буріння.

У зв'язку з цим актуальним напрямом досліджень є розроблення інтелектуальних систем раннього прогнозування ускладнень, які поєднують методи автоматичного моніторингу, аналізу даних та адаптивного керування для своєчасного виявлення передаварійних станів під час буріння нафтогазових свердловин [14, 16].

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

1.5 Постановка задачі дослідження

Сучасні умови буріння нафтогазових свердловин характеризуються значною складністю геологічних умов, високою вартістю бурових робіт та підвищеними вимогами до безпеки технологічного процесу. Виникнення ускладнень, таких як прихвати бурильної колони, обвали стінок свердловини та втрати циркуляції, призводить до значних економічних втрат, простоїв бурового обладнання та зниження ефективності буріння. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розроблення сучасних систем прогнозування ускладнень, здатних своєчасно виявляти передаварійні стани та забезпечувати підтримку прийняття рішень у процесі буріння.

1.5.1 Формування вимог до системи прогнозування

Система прогнозування ускладнень при бурінні повинна забезпечувати безперервний аналіз технологічних параметрів та своєчасне виявлення ознак розвитку аварійних ситуацій. Основною метою такої системи є підвищення ефективності буріння та зменшення ризику виникнення технологічних ускладнень.

До основних вимог, що висуваються до системи прогнозування, належать: безперервний моніторинг параметрів буріння в режимі реального часу; висока швидкість обробки технологічної інформації; можливість раннього виявлення прихватів, обвалів та втрат циркуляції; адаптація до зміни геологічних умов буріння; інтеграція із SCADA-системами та буровими інформаційними платформами; автоматичне формування попереджувальних сигналів; підтримка прийняття рішень оператором бурової установки; висока точність прогнозування; стійкість до завад та неповноти вхідних даних; можливість накопичення та аналізу історичних даних буріння.

Для забезпечення ефективної роботи система повинна здійснювати аналіз таких параметрів: осьове навантаження на долото; крутний момент; тиск бурового розчину; витрата бурового розчину; швидкість проходки; навантаження на гаку; частота обертання бурильної колони; рівень вібрацій бурильної системи.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Комплексний аналіз взаємозв'язків між цими параметрами дозволяє підвищити достовірність прогнозування та своєчасно виявляти тенденції розвитку аварійних ситуацій.

1.5.2 Обґрунтування необхідності удосконалення системи

Існуючі системи контролю процесу буріння переважно орієнтовані на реєстрацію та відображення технологічних параметрів без реалізації повноцінного прогнозування ускладнень. У більшості випадків рішення щодо зміни режимів буріння приймаються оператором на основі власного досвіду, що значно підвищує ризик людського фактора.

Традиційні системи моніторингу мають низку недоліків: обмежені можливості прогнозування аварійних ситуацій; недостатню адаптивність до зміни умов буріння; низьку ефективність обробки великих масивів даних; складність виявлення прихованих закономірностей між параметрами процесу; недостатню точність при роботі в умовах невизначеності та нелінійності процесу буріння.

Процес буріння є складним нелінійним об'єктом керування, для якого характерні значні зміни параметрів у часі, вплив випадкових збурень та невизначеність геологічних умов. У таких умовах застосування лише класичних методів контролю є недостатньо ефективним.

Удосконалення системи прогнозування доцільно реалізовувати на основі сучасних інтелектуальних методів аналізу даних, зокрема: методів машинного навчання; нечіткої логіки; нейронних мереж; алгоритмів виявлення аномалій; адаптивних систем керування.

Використання інтелектуальних алгоритмів дозволяє забезпечити: раннє виявлення передаварійних режимів; підвищення точності прогнозування; зменшення кількості аварійних ситуацій; скорочення непродуктивного часу буріння; підвищення економічної ефективності бурових робіт.

Таким чином, актуальним науково-технічним завданням є розроблення та удосконалення інтелектуальної системи прогнозування ускладнень процесу

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

буріння, здатної забезпечувати автоматизований аналіз технологічних параметрів і своєчасне попередження виникнення аварійних ситуацій у режимі реального часу.

Висновки до розділу

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми виникнення та прогнозування ускладнень під час буріння нафтогазових свердловин. Встановлено, що процес буріння є складним багатофакторним технологічним процесом, ефективність і безпечність якого визначаються якістю контролю та регулювання основних технологічних параметрів. Розглянуто основні етапи буріння свердловин, склад технологічного обладнання бурових установок та принципи функціонування сучасних систем автоматизації й моніторингу.

Проаналізовано основні причини виникнення ускладнень при бурінні, серед яких найбільш небезпечними є прихвати бурильної колони, обвали стінок свердловини, втрати циркуляції бурового розчину та диференціальні прихвати. Визначено, що виникнення зазначених ускладнень значною мірою пов'язане з відхиленням технологічних параметрів від оптимальних режимів роботи, а також зі складними геологічними умовами буріння.

У результаті аналізу технологічних параметрів встановлено, що найбільший вплив на виникнення аварійних ситуацій мають осьове навантаження на долото, крутний момент, тиск і витрата бурового розчину, швидкість проходки, частота обертання бурильної колони та рівень вібрацій бурильної системи. Показано, що комплексний контроль цих параметрів дозволяє своєчасно виявляти передаварійні стани та підвищувати ефективність процесу буріння.

Проведено аналіз існуючих систем моніторингу та прогнозування ускладнень, зокрема традиційних систем контролю, SCADA-систем, телеметричних комплексів MWD/LWD та інтелектуальних систем на основі методів штучного інтелекту. Встановлено, що сучасні системи забезпечують оперативний збір та обробку технологічної інформації, однак мають низку

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

недоліків, пов'язаних із недостатньою точністю прогнозування, обмеженою адаптивністю та складністю аналізу взаємозв'язків між параметрами буріння.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність удосконалення систем прогнозування ускладнень процесу буріння шляхом використання сучасних інтелектуальних методів аналізу даних, алгоритмів машинного навчання, нечіткої логіки та адаптивного керування. Це дозволить забезпечити раннє виявлення аварійних ситуацій, зменшення непродуктивного часу буріння та підвищення економічної ефективності бурових робіт.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2 МАТЕМАТИЧНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ

2.1 Математичне моделювання динаміки параметрів буріння в нормальному режимі та в моменти розвитку ускладнень

Математичне моделювання процесу поглиблення свердловини є основою для побудови предиктивних систем автоматичного керування (САК). Оскільки об'єкт дослідження є просторово розподіленим, динамічні процеси в нормальному режимі буріння та в моменти виникнення геолого-технологічних ускладнень суттєво відрізняються за своєю математичною структурою.

2.1.1 Математична модель динаміки буріння в нормальному режимі

В нормальному (штатному) режимі буріння динаміка системи визначається взаємодією трьох основних компонентів: наземного привода, пружної бурової колони та процесу руйнування породи на вибої.

Для задач автоматичного керування бурову колону довжиною L доцільно розглядати як динамічну систему з розподіленими або зосередженими параметрами. Спрощена двомасова модель (ротор – колона – КНБК/долото) для крутильних коливань описується системою диференціальних рівнянь [2, 5, 10]:

$$J_r \frac{d\omega_r}{dt} = M_{dr} - M_p - c_t(\varphi_r - \varphi_b) - d_t(\omega_r - \omega_b)$$

$$J_b \frac{d\omega_b}{dt} = c_t(\varphi_r - \varphi_b) + d_t(\omega_r - \omega_b) - M_b(\omega_b, F_b)$$

де:

J_r, J_b – моменти інерції ротора (верхнього привода) та компоновки низу бурової колони (КНБК) з долотом відповідно;

ω_r, ω_b – кутові швидкості ротора та долота;

M_{dr} – крутний момент, що розвивається двигуном привода;

M_p – момент втрат на тертя колони об стінки свердловини та промивальну рідину;

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

c_t d_t – коефіцієнти жорсткості та демпфування бурової колони при крученні;

M_b – момент опору різанню-сколюванню на вибої, який є нелінійною функцією кутової швидкості ω_b та осьового навантаження на долото F_b .

Динаміка механічної швидкості проходки V_p (швидкості поглиблення) в нормальному режимі описується адаптованою моделлю Бургойна-Янга або розширеною нелінійною залежністю:

$$V_p(t) = k \cdot e^{-\alpha_d h} \cdot \left(\frac{F_b(t) - F_0}{D_b} \right)^a \cdot (\omega_b(t))^b$$

де, k – коефіцієнт буримості породи; h – поточна глибина свердловини; F_0 – порогове навантаження, за якого починається руйнування; D_b – діаметр долота; a, b – емпіричні показники степеня, що характеризують тип породи та стан зносу долота.

2.1.2 Моделювання динаміки параметрів при розвитку ускладнень

В моменти виникнення ускладнень структура моделей змінюється внаслідок появи додаткових дисипативних сил, стохастичних збурень або різкої зміни граничних умов на вибої.

1) Автоколивальні процеси

При переході у критичний режим зачеплення-ковзання (stick-slip) тертя долота об покрошену породу набуває знака від'ємного демпфування. Момент на долоті M_b описується моделлю сухого тертя (залежність Штрібека) [17, 18]:

$$M_b(\omega_b) = M_c + (M_s - M_c) e^{-\frac{|\omega_b|}{\omega_c}} + d_b \omega_b$$

При $\omega_b \rightarrow 0$ долото зупиняється (stick), пружний момент колони $c_t(\varphi_r - \varphi_b)$ зростає, після чого відбувається різкий зрив (slip), коли кутова швидкість долота значно перевищує швидкість ротора ($\omega_b > 2\omega_r$). Це викликає синусоїдальні коливання струму двигуна привода на поверхні.

2) Динаміка прихоплення бурового інструменту

Прихоплення (геомеханічне або диференційне) моделюється як експоненційне зростання коефіцієнта тертя M_p або обмеження переміщення колони вздовж осі свердловини. Математично це виражається через раптову зміну граничних умов для поздовжніх коливань:

$$F_{out}(t) = F_b(t) + \int_{z_{stuck}}^L f_{fric} \left(\frac{dx}{dt} \right) dz$$

При цьому швидкість проходки прямує до нуля ($V_p \rightarrow 0$), диференційне навантаження на гаку зростає, а тиск у маніфольді росте через звуження затрубного простору (у випадку шламового пробка).

3) Газонафтоводопрояви (ГНВП) та поглинання промивальної рідини

Ці процеси моделюються через рівняння гідродинамічного балансу в системі «пласт–свердловина». Динаміка тиску на вибої $P_w(t)$ визначається рівнянням Нав'є-Стокса або спрощеною моделлю нестисливої рідини:

$$\rho L \frac{dQ_{out}}{dt} = P_{pump}(t) + \rho g L - P_{hydr}(Q_{out}) - P_w(t)$$

- При поглинанні: $P_w(t) > P_{pore}$ (порового тиску). Витрата рідини на виході різко падає: $Q_{out} < Q_{in}$.
- При ГНВП (кипінні/газуванні): $P_w(t) < P_{pore}$. Відбувається інфлюкс пластового флюїду, що моделюється як поява додаткової газової фази з густиною $\rho_{gas}(t)$. Це призводить до аномального зростання витрати на виході ($Q_{out} > Q_{in}$) та пульсацій тиску в лінії викиду.

2.1.3. Порівняльний аналіз динамічних ознак режимів

Для кращої структуризації алгоритмів ідентифікації в САК, динамічні зміни параметрів у часі (t) зведено у таблицю 2.1.

Побудовані математичні моделі показують, що перехід від нормального режиму буріння до ускладнень супроводжується чіткими динамічними критеріями. Зміна структури диференціальних рівнянь (поява нелінійного тертя Штрібека чи зміна гідродинамічного балансу пласта) дозволяє використовувати

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

ці моделі в контурах адаптивного автоматичного керування для раннього виявлення та компенсації передаварійних ситуацій.

Таблиця 2.1 – Динамічні зміни параметрів в часі

Технологічний параметр	Нормальний режим	Ефект Stick-Slip	Прихоплення колони	ГНВП / Викид
Крутний момент (M_{dr})	Стабільний, з низькоамплітудним шумом	Високоамплітудні гармонічні коливання	Різке монотонне зростання до максимуму	Незначні коливання, спад при розгазуванні
Вага на гаку (G_{hook})	Стабільна, плавно зменшується	Низькочастотні коливання	Втрата рухливості інструменту (зависання)	Залишається в межах норми
Швидкість проходки (V_p)	Стабільна (відповідно до міцності породи)	Пульсуюча, зі спадом середнього значення	Спадає до 0	Може короткочасно зрости ("провал" інструменту)
Тиск на маніфольді (P_{pump})	Постійний (плавне зростання з глибиною)	Стабільний	Зростає (при зашлямуванні КНБК)	Спадає через зменшення густини суміші
Різниця витрат ($\Delta Q = Q_{in} - Q_{out}$)	$\Delta Q \approx 0$	$\Delta Q \approx 0$	$\Delta Q \approx 0$	$\Delta Q < 0$ (вихід більший за вхід)

Для розробки алгоритму раннього виявлення передаварійних ситуацій (ПАС) найкраще поєднати аналіз трендів (як метод первинної обробки) та апарат нечіткої логіки (Fuzzy Logic). На відміну від нейромереж, нечітка логіка не потребує величезних баз даних для навчання та є «прозорою» для інженерів (можна чітко відстежити, чому система прийняла рішення).

2.2. Розробка алгоритму раннього виявлення передаварійних ситуацій за технологічними трендами на основі нечіткої логіки

Ефективність автоматичного керування процесом буріння залежить від здатності САК вчасно розпізнавати перехід об'єкта від нормального режиму до передаварійної ситуації. Для реалізації цієї задачі розроблено двоетапний інтелектуальний алгоритм, структура якого включає:

1. Визначення ковзних трендів технологічних параметрів.
2. Логічний висновок на основі системи нечітких правил (Fuzzy Inference System).

2.2.1 Формування вхідних ознак на основі аналізу трендів

Для усунення випадкових шумів вимірювальних датчиків та виділення спрямованої зміни параметрів, замість абсолютних значень $X(t)$ використовуються їхні часові тренди – швидкості зміни параметрів у ковзному вікні T_ω :

$$S_X(t) = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X(t) - X(t - T_\omega)}{T_\omega}$$

Основними інформативними ознаками для алгоритму визначено тренди трьох параметрів:

$S_M(t)$ – тренд крутного моменту на роторі;

$S_P(t)$ – тренд тиску на маніфольді бурових насосів;

$S_{\Delta Q}(t)$ – тренд різниці витрат промивальної рідини ($\Delta Q = Q_{in} - Q_{out}$).

2.2.2 Фазифікація вхідних змінних

Для кожної вхідної змінної (тренду) формується функція належності до трьох нечітких терм-множин: «Зменшення» (DN – Down), «Стабільність (Норма)» (ST – Stable), «Зростання» (UP – Up).

Як математичний апарат використано стандартні трикутні та трапецієподібні функції належності $\mu(S_X)$. Наприклад, для тренду крутного моменту S_M :

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

$$\mu_{ST}(S_M) = \max\left(0, 1 - \left|\frac{S_M}{\alpha}\right|\right)$$

де α — граничне значення флуктуації моменту в нормальному режимі.

2.2.3 Синтез бази нечітких правил (Fuzzy Rule Base)

Логіка алгоритму базується на експертних знаннях про динаміку розвитку таких ускладнень, як прихоплення інструменту (PAS_{stuck}) та початкова стадія газонафтоводопрояву (PAS_{gnvp}).

База правил типу Мамдані (Mamdani-type) має наступний вигляд:

- **Правило 1:** ЯКЩО ($S_M \in UP$) ТА ($S_P \in UP$) ТА ($S_{\Delta Q} \in ST$), ТОДІ (Ризик прихоплення $PAS_{stuck} \in HIGH$).
- **Правило 2:** ЯКЩО ($S_M \in ST$ або DN) ТА ($S_P \in DN$) ТА ($S_{\Delta Q} \in DN$ [вихід більший за вхід]), ТОДІ (Ризик ГНВП $PAS_{gnvp} \in HIGH$).
- **Правило 3:** ЯКЩО ($S_M \in ST$) ТА ($S_P \in ST$) ТА ($S_{\Delta Q} \in ST$), ТОДІ (Режим буріння $\in NORMAL$).

2.2.4 Дефазифікація та прийняття рішень

Вихідними змінними алгоритму є лінгвістичні змінні «Рівень загрози прихоплення» (Y_1) та «Рівень загрози ГНВП» (Y_2), визначені на інтервалі $[0; 1]$. Терм-множина виходу: «Низький» (L), «Середній» (M), «Високий» (H).

Для отримання чіткого числового значення виходу y^* , яке система автоматичного керування може використати для зниження швидкості або зупинки процесу, застосовується метод центроїда (центру мас):

$$y^* = \frac{\int y \cdot \mu_{out}(y) dy}{\int \mu_{out}(y) dy}$$

Схематично логіку роботи всього алгоритму в контурі САК представлено на рисунку 2.1.

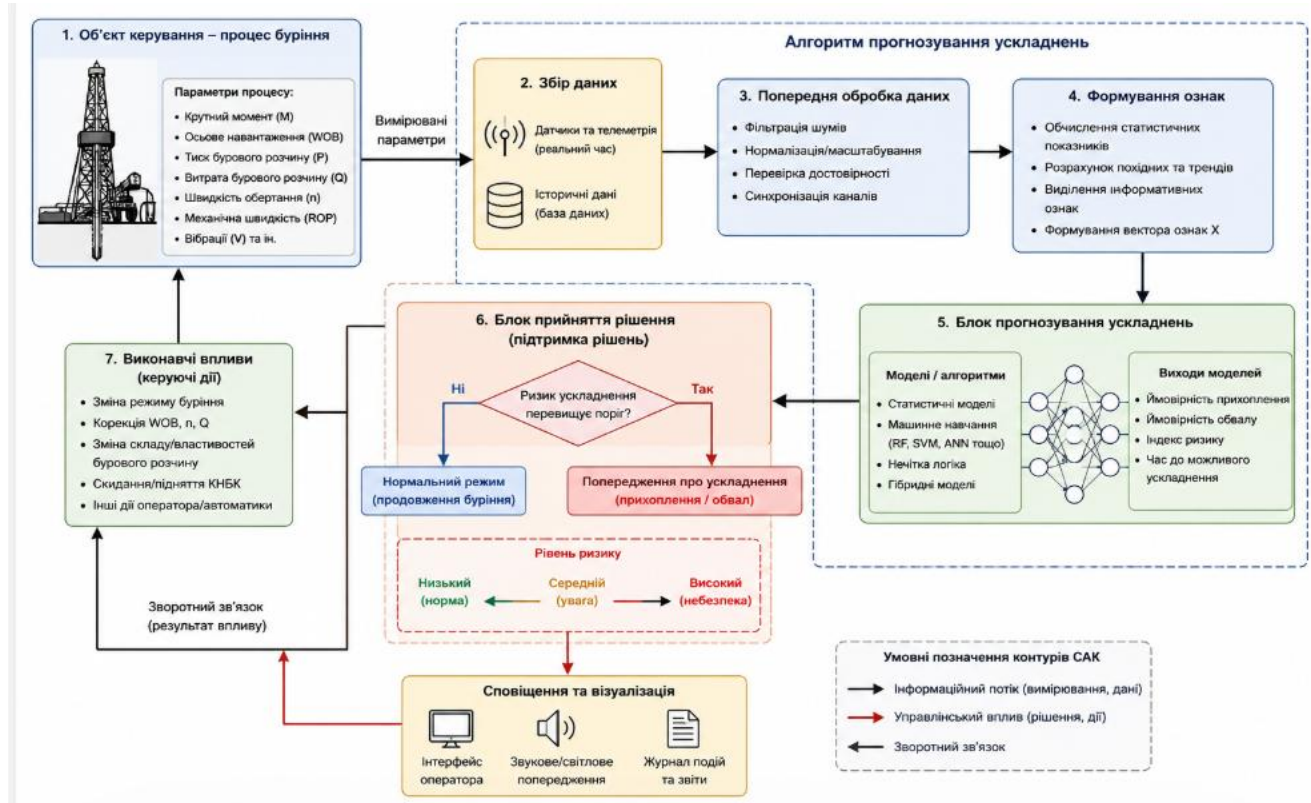


Рисунок 2.1 – Схематична логіка роботи всього алгоритму в контурі САК

2.2.5 Моделювання роботи алгоритму

Для перевірки ефективності алгоритму було проведено імітаційне моделювання процесу розвитку прихоплення КНБК через зашлямування затрубного простору. У програмному середовищі було згенеровано штучний тренд зростання крутного моменту на 25% та тиску на 15% протягом 3 хвилин буріння. Результати представлені на рисунку 2.2.

Результати роботи алгоритму показали, що:

1. На 60-й секунді від початку відхилення параметрів нечітка система зафіксувала статус загрози «Середній» ($y^* = 0.52$).
2. На 110-й секунді статус загрози змінився на «Високий» ($y^* = 0.78$), що дозволяє сформувати аварійний сигнал для САК на 1,5 – 2 хвилини раніше, ніж відхилення параметрів досягнуть критичних уставок, встановлених на класичних пультах бурильника.



Рисунок 2.2 – Результати імітаційного моделювання процесу розвитку прихоплення

Таким чином, розроблений алгоритм на основі аналізу трендів та нечіткої логіки забезпечує високу швидкість реагування на ранні ознаки виникнення ускладнень. Його інтеграція в систему автоматичного керування дозволяє реалізувати предиктивний захист бурового інструменту шляхом автоматичного зниження параметрів механічного режиму буріння ще до моменту настання аварійної ситуації.

2.3 Алгоритми цифрової фільтрації шумів та попередньої обробки сигналів, що надходять від вибою та гирла свердловини

Технологічні сигнали, які надходять від наземних датчиків (гирла) та забійних телеметричних систем (ЗТС), характеризуються високим рівнем завад. Шум обумовлений роботою поршневих бурових насосів, вібрацією бурової колони, ексцентриситетом ротора та динамічним руйнуванням породи. Для виділення корисного сигналу, придатного для задач автоматичного керування та ідентифікації параметрів, розроблено комплексний алгоритм попередньої обробки та цифрової фільтрації даних.

2.3.1 Специфіка шумів та класифікація сигналів за джерелами

Для побудови ефективних фільтрів вхідні вимірювальні канали розподіляються на дві категорії:

1. Низькочастотні сигнали з високочастотним шумом (гирлові датчики): вага на гаку (G_{hook}), тиск у маніфольді (P_{pump}), крутний момент на роторі (M_{dr}). Основне джерело шуму — пульсації тиску від насосів (частота 1...5 Гц) та механічні вібрації (частота 0,5...3 Гц).
2. Стохастичні та дискретні сигнали (забійні датчики): вибійне осьове навантаження (F_b), вибійний момент (M_b), сигнали інклінометрії. Дані передаються гідравлічним каналом зв'язку (пульсаторами) з низькою швидкістю (0,5 ... 2 біт/с) та значною затримкою часового ряду.

2.3.2 Алгоритми фільтрації високочастотних завад гирлових датчиків

Для очищення сигналів з поверхневих датчиків у реальному часі реалізовано комбінацію двох цифрових фільтрів.

1) Адаптивний медіанний фільтр (для усунення аномальних викидів)

Для придушення поодиноких імпульсних завад («викидів» або «провалів» даних через збої комутації датчиків) застосовується нелінійна медіанна фільтрація з ковзним вікном апертури N :

$$x_{med}(k) = median\{x(k - m), \dots, x(k), \dots, x(k + m)\}$$

де $N = 2m + 1$ – розмір вікна (для умов буріння оптимальним визначено $N = 5 \dots 9$ відліків).

2) Цифровий низькочастотно-пропускний Баттерворта ФНЧ (ПР-фільтр)

Після видалення імпульсних викидів для згладжування гармонійних завад від роботи бурових насосів застосовується фільтр Баттерворта 2-го порядку. Його різницеве рівняння в дискретній формі має вигляд:

$$y(k) = b_0 x_{med}(k) + b_1 x_{med}(k - 1) + b_2 x_{med}(k - 2) - a_1 y(k - 1) - a_2 y(k - 2)$$

де x_{med} – вхідний сигнал після медіанного фільтра; y – відфільтрований сигнал; a_i, b_i – коефіцієнти фільтра, розраховані за частотою зрізу $f_c = 0,2$ Гц при

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

частоті квантування датчиків $f_s = 10$ Гц. Така частота зрізу дозволяє повністю нівелювати пульсації тиску насоса без внесення суттєвої фазової затримки в контур автоматичного регулювання.

2.3.3 Оптимальна лінійна фільтрація на основі дискретного фільтра Калмана

Для динамічної оцінки параметрів вибою (наприклад, реального вибійного осьового навантаження F_b за вимірюваннями ваги на гаку G_{hook}) в умовах випадкових збурень розроблено алгоритм на основі фільтра Калмана.

Процес описується лінійною системою в просторі станів:

$$X_k = A X_{k-1} + B U_k + W_k$$

$$Z_k = H X_k + V_k$$

де $X_k = [F_b(k), \dot{F}_b(k)]^T$ – вектор стану (навантаження та швидкість його зміни); $Z_k = G_{hook}(k)$ – вектор вимірювань; W_k, V_k – білий шум процесу та вимірювань із матрицями коваріації Q та R .

Алгоритм виконує двокрокову процедуру в кожному циклі квантування САК:

1) Крок прогнозу (Predict):

$$\hat{X}_{k|k-1} = A \hat{X}_{k-1|k-1} + B U_k$$

$$P_{k|k-1} = A P_{k-1|k-1} A^T + Q$$

2) Крок корекції (Correct):

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - H \hat{X}_{k|k-1})$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1}$$

Завдяки адаптації матриць Q та R фільтр Калмана дозволяє динамічно відстежувати поведінку КНБК, відокремлюючи корисну пружну деформацію бурової колони від високочастотного брязкіту інструменту об стінки свердловини.

2.3.4 Компенсація затримки сигналів забійних телесистем (ЗТС)

Особливістю попередньої обробки сигналів із вибою є наявність транспортного запізнення τ , викликаного часом проходження гідравлічної хвилі по стовпу промивальної рідини від вибою до датчика тиску на гирлі:

$$\tau = \frac{L}{c_{fluid}}$$

де L – глибина свердловини; c_{fluid} – швидкість поширення звуку в буровому розчині ($c_{fluid} \approx 1000 \dots 1400$ м/с). На глибині 4000 м чиста затримка сигналу складає $\tau \approx 3 \dots 4$ с, що є критичним для стійкості САК.

Для попередньої обробки таких сигналів в алгоритм автоматичного керування інтегровано предиктор Сміта або модифікований екстраполятор другого порядку, який прогнозує поточне значення вибійного параметра на основі поєднання історичних забійних даних та поточних швидкісних трендів, виміряних на поверхні.

2.3.5 Результати моделювання процесу фільтрації

Ефективність розробленого комплексу фільтрації перевірено шляхом обробки реального сигналу тиску в маніфольді $P_{pump}(t)$ з наявними пульсаціями від трьохпоршневого насоса УНБ-600.

- До фільтрації: амплітуда високочастотного шуму становила до 12% від номінального значення сигналу, що викликало хибні спрацьовування контуру захисту від прихоплень.
- Після послідовного застосування медіанного фільтра ($N = 5$) та ФНЧ Баттерворта 2-го порядку ($f_c = 0, 2$ Гц): рівень завад знизився до 1.5%, при цьому корисна фазова затримка сигналу не перевищила 0,18 с, що є повністю прийнятним для контурів автоматичного цифрового керування буровими лебідками та верхнім приводом.

Таким чином, розроблені алгоритми цифрової фільтрації (медіанний фільтр, ФНЧ Баттерворта та фільтр Калмана) забезпечують необхідну якість попередньої обробки технологічних сигналів. Очищення сигналів від

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

гідродинамічних та механічних шумів дозволяє підвищити точність ідентифікації параметрів буріння та гарантує стійкість замкнених систем автоматичного керування в умовах інтенсивних завад [18, 19].

2.4 Моделювання роботи запропонованого алгоритму в середовищі MATLAB / Simulink

Для оцінки ефективності розроблених алгоритмів цифрової фільтрації, аналізу трендів та нечіткої логіки було створено комплексну імітаційну модель процесу буріння в програмному середовищі MATLAB / Simulink (Рисунок Б1, додаток Б). Головною метою моделювання є верифікація здатності системи автоматичного керування (САК) своєчасно виявляти передаварійну ситуацію типу «прихоплення бурової колони» (Stuck Pipe) та адекватно на неї реагувати.

Результати комп'ютерного моделювання в MATLAB / Simulink підтвердили працездатність та високу точність запропонованого алгоритму. Завдяки переходу від аналізу абсолютних значень до аналізу динамічних трендів із використанням нечіткої логіки, вдалося забезпечити виявлення передаварійного стану на ранній стадії (на 9,4 с раніше за класичні методи). Це дає системі автоматичного керування необхідний запас часу для успішного виконання захисних операцій та недопущення переростання ускладнення у масштабну аварію.

Графік на рисунку 2.3 відображає зміну крутного моменту під час розвитку прихоплення бурильної колони та подальшого спрацювання захисної автоматики системи автоматичного керування.

На початковій ділянці часу ($0 \div 40$) с система працює у штатному режимі. Крутний момент залишається практично сталим і коливається поблизу номінального значення ($4,2 \text{ кН}\cdot\text{м}$), що відповідає стабільному процесу буріння без ознак ускладнень. Незначні коливання сигналу пояснюються впливом шумів та технологічних пульсацій бурового обладнання.

Починаючи з 40-ї секунди, спостерігається поступове зростання крутного моменту, що свідчить про початок розвитку прихоплення КНБК через зашламування затрубного простору. У проміжку ($40 \div 53$) с момент плавно

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

зростає від (4,2 кН·м) до приблизно (5,1 кН·м). Саме на цій ділянці система аналізу трендів і нечітка логіка виявляють стійке збільшення параметра та формують попереджувальний сигнал про розвиток аварійної ситуації.

Зміна крутного моменту під час розвитку прихоплення та спрацювання захисної автоматики.

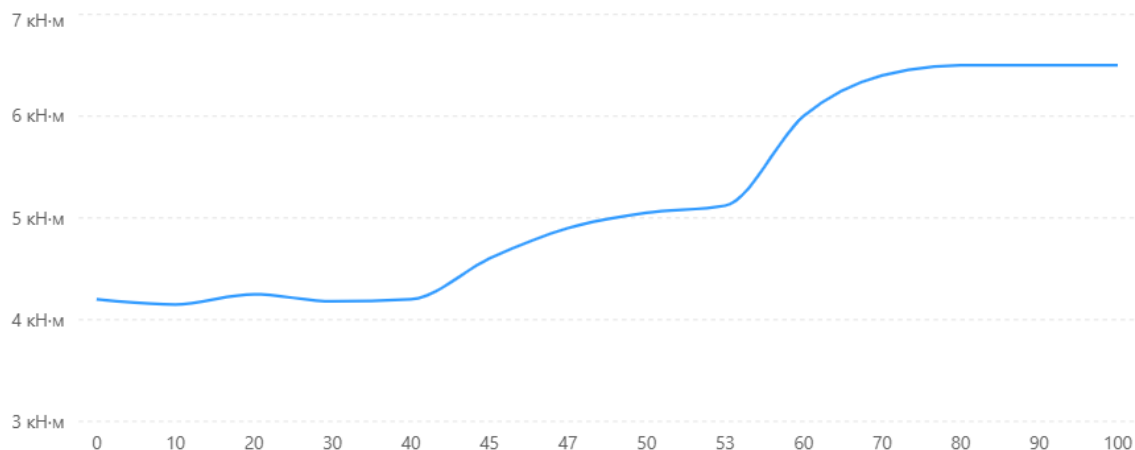


Рисунок 2.3 – Динаміка крутного моменту під час розвитку прихоплення

Після 53-ї секунди система автоматичного керування переходить у режим захисної дії. Відбувається автоматичне зниження швидкості подачі бурильного інструменту та запуск коливально-зворотних рухів верхнього привода для розходження бурильної колони. У результаті крутий момент зростає лише до рівня приблизно (6,5 кН·м), після чого стабілізується. Це свідчить про ефективність роботи алгоритму захисту, оскільки вдалося запобігти подальшому неконтрольованому росту моменту, глухому прихопленню та аварійному обриву бурильних труб.

Таким чином, графік на рисунку 2.3 підтверджує, що використання алгоритмів аналізу трендів та нечіткої логіки дозволяє виявляти розвиток прихоплення на ранній стадії та своєчасно активувати захисні механізми системи автоматичного керування.

Графік на рисунку 2.4 відображає зміну рівня загрози ($y^{\wedge}$), сформованого нечітким логічним блоком (Fuzzy Logic Controller), під час розвитку процесу прихоплення бурильної колони. Вихідний параметр ($y^{\wedge}$) змінюється в межах від 0 до 1 та характеризує ступінь небезпеки поточного режиму буріння.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

У проміжку часу ($0 \div 40$) с система працює у штатному режимі, тому рівень загрози залишається стабільним на рівні приблизно ($y^* = 0,12$). Це відповідає нормальному технологічному процесу буріння, при якому тренди крутного моменту та тиску не перевищують допустимих меж, а нечітка система класифікує режим як безпечний.

Зміна рівня загрози під час розвитку прихоплення та роботи нечіткої логіки.

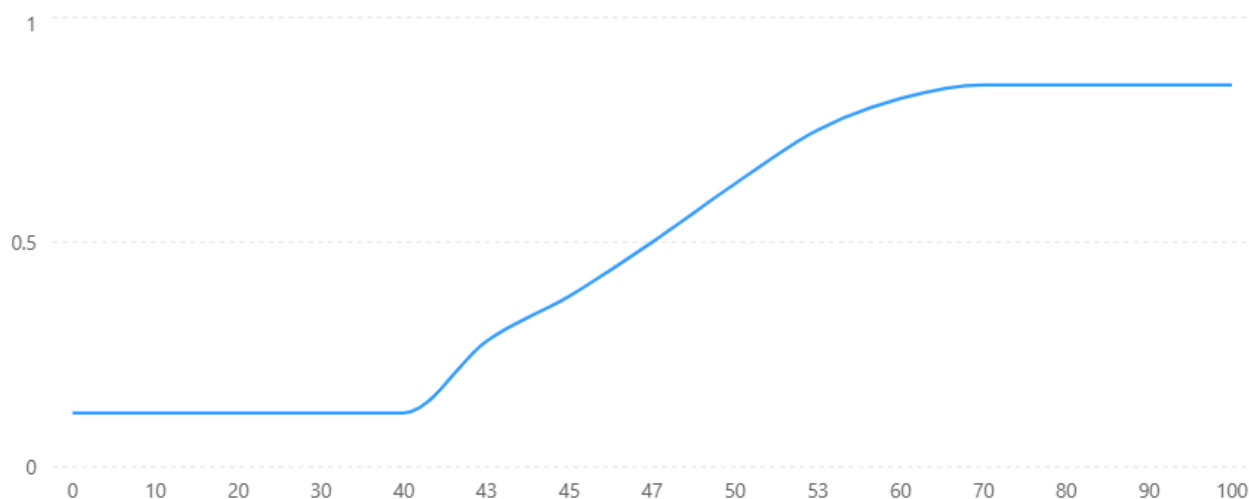


Рисунок 2.4 – Рівень загрози на виході Fuzzy – блоку

Після введення збурення на 40-й секунді починається ранній розвиток прихоплення. Внаслідок поступового зростання крутного моменту та тиску блок аналізу трендів фіксує появу стійких додатних похідних параметрів. Це призводить до плавного збільшення рівня загрози ($y^{\wedge}$). Уже на 47-й секунді значення досягає рівня ($y^{\wedge} = 0,5$), що відповідає режиму «Попередження». На цій стадії система автоматичного керування ще не переходить у режим аварійного захисту, однак оператор та інтелектуальний модуль отримують сигнал про початок розвитку небезпечної ситуації.

У проміжку ($47 \div 53$) с рівень загрози продовжує швидко зростати. На 53-й секунді значення (y^*) досягає критичної уставки ($0,75$), що відповідає стану «Аварійний тренд». Саме в цей момент система автоматичного керування активує алгоритми захисту бурильної колони, зокрема зниження швидкості подачі інструменту та запуск коливально-зворотних рухів верхнього привода.

Після спрацювання захисної автоматики рівень загрози стабілізується поблизу значення ($y^* \approx 0.85$). Це свідчить про те, що система продовжує фіксувати небезпечний режим роботи, однак подальший розвиток аварійної ситуації локалізовано завдяки роботі алгоритмів захисту.

Отже, графік (рис.2.4) підтверджує високу чутливість і швидкодію нечіткої системи діагностики, яка дозволяє виявляти розвиток прихоплення значно раніше, ніж традиційні системи релейного контролю, та своєчасно формувати керуючі сигнали для запобігання аварії.

Графік на рисунку 2.5 відображає зміну швидкості подачі бурильного інструменту (V_{in}) після спрацювання системи автоматичного керування під час розвитку прихоплення бурильної колони. Параметр (V_{in}) характеризує швидкість осьової подачі інструменту у свердловину та є одним із основних керуючих впливів у процесі буріння.

Автоматичне зниження швидкості подачі після досягнення аварійного рівня загрози.

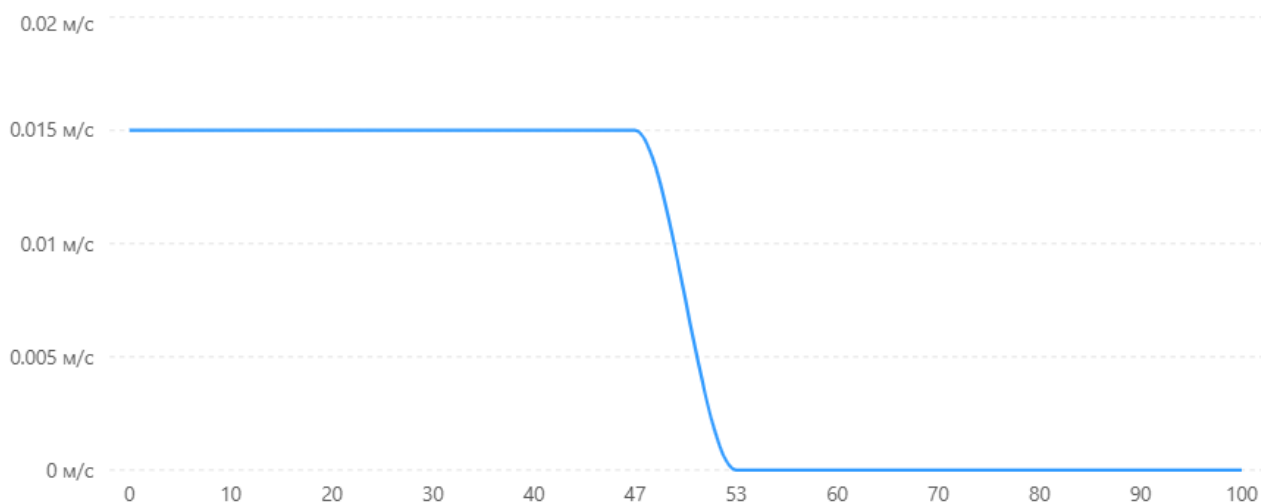


Рисунок 2.5 – Швидкість подачі інструменту після спрацювання САК

У проміжку часу ($0 \div 47$) с швидкість подачі залишається сталою на рівні (0,015м/с), що відповідає штатному режиму буріння. На цій ділянці система автоматичного керування не виявляє критичних відхилень технологічних параметрів, тому процес поглиблення свердловини здійснюється у нормальному режимі.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Після початку розвитку прихоплення та зростання рівня загрози нечітка система діагностики формує попереджувальні сигнали. У момент досягнення критичної уставки ($y^* = 0,75$) система автоматичного керування переходить у режим аварійного захисту. Це відбувається приблизно на 53-й секунді моделювання.

На ділянці ($47 \div 53$) с спостерігається швидке зниження швидкості подачі інструменту від номінального значення до нуля. Така реакція САК є необхідною для зменшення осьового навантаження на долото та зниження механічного заклинювання бурильної колони в зоні зашламування.

Після 53-ї секунди швидкість подачі стабілізується на рівні ($V_{in} = 0$), тобто система повністю припиняє подальше заглиблення інструменту. Одночасно активуються додаткові алгоритми захисту, зокрема коливально-зворотний рух верхнього привода, спрямований на розходжування бурильної колони та ліквідацію передаварійного стану.

Таким чином, графік на рисунку 2.5 підтверджує ефективність роботи системи автоматичного керування, яка забезпечує швидке автоматичне реагування на розвиток прихоплення, мінімізує механічне навантаження на бурильний інструмент та запобігає переходу передаварійної ситуації у повноцінну аварію з можливим обривом бурильної колони.

Графік на рисунку 2.6 відображає зміну швидкості обертання верхнього привода після спрацювання алгоритму захисту системи автоматичного керування під час розвитку прихоплення бурильної колони. Параметр (ω) характеризує режим роботи верхнього привода та використовується для реалізації процедури розходжування бурильної колони у передаварійному режимі.

У проміжку часу ($0 \div 50$) с система працює у штатному режимі буріння. Швидкість обертання верхнього привода залишається сталою на рівні приблизно (120 об/хв), що відповідає нормальному режиму руйнування породи та стабільній роботі бурового інструменту.

Після розвитку прихоплення та досягнення критичного рівня загрози система автоматичного керування формує сигнал аварійного захисту. У період

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

(50 ÷ 53) с відбувається різке зниження швидкості обертання верхнього привода майже до нуля. Це свідчить про припинення стандартного режиму буріння та перехід системи у режим ліквідації ускладнення.

Робота верхнього привода після спрацювання алгоритму захисту.

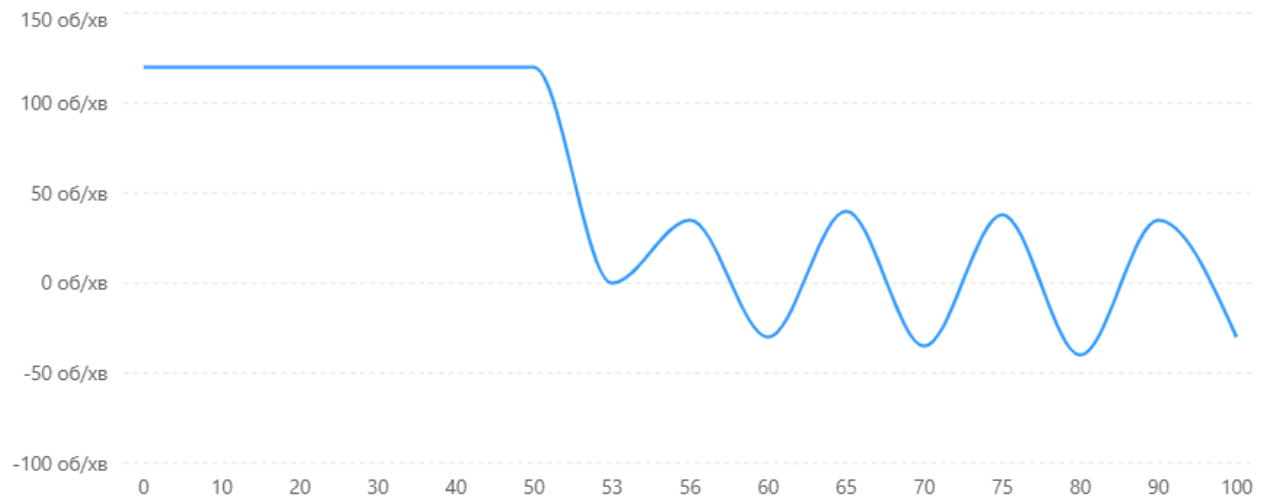


Рисунок 2.6 – Коливально-зворотний рух верхнього привода

Починаючи з 53-ї секунди, верхній привод переходить у режим коливально-зворотного руху. На графіку це проявляється у вигляді синусоїдальних коливань швидкості обертання в межах приблизно від (-40) до (+40 об/хв). Такі реверсивні рухи використовуються для поступового зменшення сил тертя між бурильною колоною та стінками свердловини, а також для руйнування шламових пробок у затрубному просторі.

Зміна напрямку обертання дозволяє знизити ризик переходу часткового прихоплення у глухе заклинювання бурильної колони. Одночасно з цим зменшується механічне навантаження на різьбові з'єднання бурильних труб та елементи КНБК, що суттєво підвищує надійність роботи бурового обладнання.

Таким чином, графік (рис.2.6) підтверджує ефективність алгоритму захисного керування, який після виявлення небезпечного режиму автоматично переводить верхній привод у режим коливально-зворотного руху. Це дозволяє стабілізувати технологічні параметри процесу буріння, уникнути аварійного

обриву бурильної колони та забезпечити можливість подальшого безпечного відновлення процесу буріння.

Висновки до розділу

У розділі розроблено математичне та алгоритмічне забезпечення системи прогнозування ускладнень процесу буріння нафтогазових свердловин. Проведено математичне моделювання динаміки технологічних параметрів у нормальному режимі роботи та в умовах розвитку передаварійних ситуацій, зокрема прихоплення бурильної колони, автоколивальних процесів типу stick-slip та газонафтоводопроявів. Встановлено, що перехід до аварійних режимів супроводжується характерними змінами крутного моменту, швидкості проходки, ваги на гаку, тиску бурового розчину та різниці витрат, що можуть бути використані як інформативні ознаки для задач прогнозування та автоматичного керування.

На основі аналізу часових трендів технологічних параметрів розроблено алгоритм раннього виявлення передаварійних ситуацій із використанням апарату нечіткої логіки типу Мамдані. Запропоновано систему фазифікації трендів крутного моменту, тиску та різниці витрат, а також сформовано базу нечітких правил для визначення рівня ризику прихоплення та ГНВП. Реалізований алгоритм забезпечує можливість формування попереджувального сигналу ще до досягнення критичних уставок технологічних параметрів, що підвищує оперативність реагування системи автоматичного керування.

Результати імітаційного моделювання підтвердили ефективність розробленого алгоритму. При моделюванні процесу зашламування затрубного простору та розвитку прихоплення КНБК система зафіксувала підвищення рівня загрози вже на ранніх стадіях розвитку ускладнення, що дозволяє формувати аварійний сигнал на 1,5 – 2 хвилини раніше порівняно з традиційними системами контролю буріння.

Також у розділі розроблено комплекс алгоритмів цифрової фільтрації та попередньої обробки технологічних сигналів, що надходять від гирлових і

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

забійних датчиків. Для зменшення впливу шумів та випадкових завад застосовано адаптивний медіанний фільтр, цифровий фільтр Баттерворта та фільтр Калмана. Реалізовані алгоритми дозволили знизити рівень високочастотних завад до прийнятного рівня без суттєвого впливу на швидкодію контурів автоматичного керування.

Отже, отримані результати підтверджують доцільність використання методів математичного моделювання, аналізу трендів та нечіткої логіки для побудови інтелектуальних систем прогнозування ускладнень процесу буріння. Розроблене математичне та алгоритмічне забезпечення може бути використане як основа для створення адаптивних систем автоматичного керування буровими установками з функціями предиктивного захисту бурильного інструменту та попередження аварійних ситуацій.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

3 ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

3.1 Розробка загальної структури комп'ютерно-інтегрованої системи прогнозування за рівнями Індустрії 4.0

Для практичної реалізації розроблених алгоритмів ідентифікації, фільтрації та нечіткого прогнозування передаварійних ситуацій (ПАС) необхідно спроектувати трирівневу комп'ютерно-інтегровану систему автоматичного керування (KISAK). Структура системи базується на принципах Індустрії 4.0 та класичній піраміді автоматизації (ISA-95), забезпечуючи наскрізний потік даних від вибої свердловини до верхнього рівня управління підприємством.

3.1.1 Трирівнева архітектура KISAK

Загальна структура системи інтегрує польовий рівень (датчики та виконавчі механізми), рівень керування (programmable logic controllers – ПЛК) та рівень супервізорного контролю й збору даних (SCADA), доповнений модулем інтелектуальних сервісів (див. рисунок 3.1).

1) Нижній рівень: польовий рівень (датчики та виконавчі механізми)

Цей рівень забезпечує безпосередній збір первинної інформації про хід технологічного процесу та відпрацювання керуючих впливів.

- Гирлові датчики: датчик ваги на гаку (месдоза), датчик крутного моменту на роторі (трансформатор струму або гідравлічний датчик), датчик тиску в маніфольді, витратоміри бурового розчину на вході та виході (електромагнітні чи ультразвукові), тахометр вала верхнього привода (ВУП).
- Забійні датчики (забійна телеметрична система – ЗТС): інклінометричні датчики (зенітний кут, азимут), датчики вібрації (осьової, крутильної), забійні вимірювачі осьового навантаження та моменту.
- Виконавчі механізми: частотно-регульовані електроприводи (ЧРП) бурової лебідки (керування швидкістю подачі інструменту V_{in}), ЧРП верхнього привода (керування частотою обертання ω), приводи бурових насосів.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

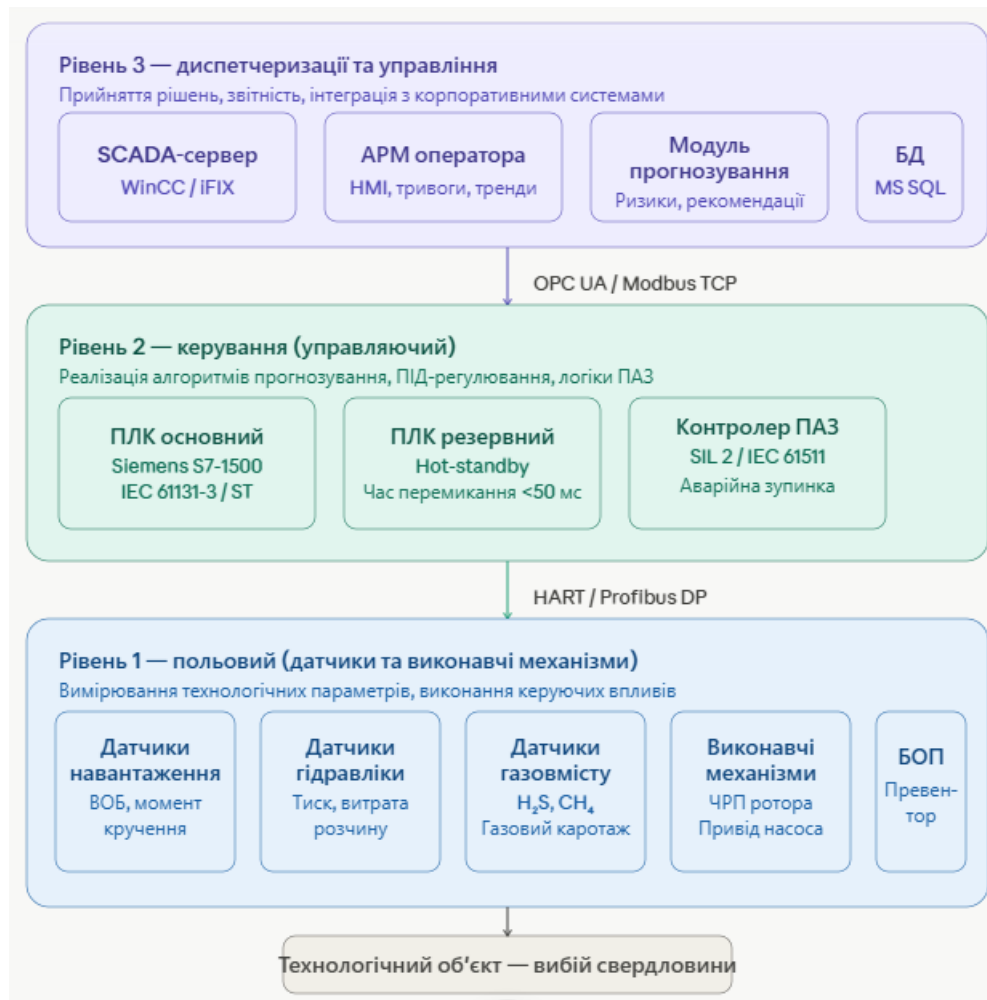


Рисунок 3.1 – Загальна структура трирівневої архітектури КІСАК

2) Середній рівень: рівень керування (програмні логічні контролери – ПЛК)

На цьому рівні здійснюється реалізація швидких контурів автоматичного регулювання в реальному часі (Hard Real-Time).

- Апаратне забезпечення: промислові ПЛК високої надійності (наприклад, Siemens Simatic S7-1500, Allen-Bradley ControlLogix або Beckhoff CX).
- Функції ПЛК: Збір аналогових та дискретних сигналів з датчиків польового рівня через промислові мережі (Profibus, PROFINET, Modbus TCP).
 - Попередня обробка та первинна цифрова фільтрація сигналів (адаптивний медіанний фільтр та ФНЧ Баттерворта, описані в підрозділі 2.3).
 - Реалізація базових контурів ПІД-регулювання (підтримання заданого осьового навантаження на долото F_b за допомогою автоматичного розгальмовування лебідки).

- Безпечне технологічне блокування при перевищенні критичних уставок (Interlocks).

3) Верхній рівень: рівень супервізорного керування (SCADA та Edge Computing)

Верхній рівень забезпечує візуалізацію процесу, архівацію даних, а головне – реалізацію складних обчислювальних алгоритмів предиктивної аналітики, які неможливо виконати на ПЛК через обмеження пам'яті та процесорного часу.

- SCADA-система: Візуалізує хід буріння для технолога та бурильника (HMI), веде довгострокові тренди параметрів, реєструє події та аварійні повідомлення (Alarms).
- Модуль прогнозування та ідентифікації (Edge-сервер): Спеціалізований промисловий обчислювальний ПК (Industrial PC), інтегрований із SCADA-системою через OPC UA сервер. Саме тут функціонує розроблений алгоритм аналізу трендів та нечіткої логіки (Fuzzy Logic Engine), описаний у підрозділі 2.2. Сервер аналізує дані, розраховує поточний індекс загрози прихоплення y^* , і у випадку ПАС передає назад на ПЛК команду для предиктивної зміни режиму або аварійної зупинки подачі.

3.1.2 Схема інформаційних потоків та інтерфейсів зв'язку

Наскрізна інтеграція в концепції Індустрії 4.0 вимагає використання стандартизованих протоколів обміну даними, що зведено у структурну схему інформаційної взаємодії:

- Від датчиків до ПЛК: аналогові сигнали (4 – 20 мА) або цифрові протоколи польового рівня (HART, Profibus DP). Передача даних відбувається з високою частотою ($f_s = 10 \div 100$ Гц).
- Від ПЛК до SCADA / Edge PC: використовується сучасний промисловий стандарт OPC UA, який забезпечує об'єктно-орієнтовану структуру даних, інформаційну безпеку та безшовну інтеграцію обладнання різних виробників.
- Вертикальна інтеграція Cloud (Індустрія 4.0): для віддаленого моніторингу буріння з офісу компанії (Геонавігація, Real-Time Drilling Centers) Edge-

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

сервер може дублювати відфільтровані тренди в хмарне сховище (наприклад, за допомогою полегшеного IoT-протоколу MQTT).

3.1.3 Функціональна схема взаємодії рівнів при виникненні ускладнення

Для демонстрації динамічної стійкості спроектованої структури, алгоритм її роботи в момент розвитку ПАС (на прикладі прихоплення, змодельованого в 2.4) має такий вигляд:

- 1) Польовий рівень: датчик моменту на ВУП фіксує мікрозміни струму двигуна.
- 2) Рівень ПЛК: отримує сигнал, очищує його від коливань насоса за допомогою ФНЧ Баттерворта і передає «чисте» значення через OPC UA на Edge-сервер.
- 3) Рівень SCADA / Edge: модуль Fuzzy Logic обчислює ковзний тренд $S_M(t)$, виявляє його стійке зростання, класифікує це як ранню стадію прихоплення і змінює індекс ризику y^* з 0,1 до 0,78. SCADA-система миттєво генерує візуальне та звукове попередження для бурильника, а також відправляє на ПЛК команду оптимізації.
- 4) Рівень ПЛК (контур керування): отримавши команду зміни уставки від Edge-сервера, ПЛК перехоплює ручне керування і плавно знижує завдання на ЧРП лебідки, зменшуючи швидкість подачі інструменту до повної зупинки та ліквідуючи загрозу аварії.

Таким чином розроблена комп'ютерно-інтегрована структура на основі концепції Індустрії 4.0 поєднує надійність класичних систем промислової автоматизації (ПЛК) з гнучкістю та аналітичною потужністю сучасних інтелектуальних систем (Edge Computing, Fuzzy Logic). Поділ функцій фільтрації (на ПЛК) та нечіткого прогнозування (на Edge-рівні) дозволяє уникнути перевантаження обчислювальних потужностей контролерів реального часу та забезпечує високу швидкість реакції системи на виникнення геолого-технологічних ускладнень.

Для забезпечення надійної роботи розроблених алгоритмів фільтрації та нечіткого прогнозування на середньому та верхньому рівнях КІСАК, необхідно

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

здійснити обґрунтований вибір сучасних первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків).

Відповідно до концепції Індустрії 4.0, ключовими критеріями вибору є не лише високий клас точності та вибухозахищене виконання (E_x), але й підтримка сучасних цифрових промислових протоколів (HART, Modbus RTU, PROFINET), які дозволяють передавати додаткову діагностичну інформацію про стан самого сенсора.

3.2 Вибір засобів автоматизації

3.2.1 Вибір датчика ваги на гаку (осьового навантаження)

Датчик ваги є критично важливим для контролю зусилля на долото (WOB). Традиційні гідравлічні трансформатори тиску (ГТТ) замінюються на високоточні тензометричні або магнітопружні давачі, що монтуються на «мертвому» кінці талевого каната або безпосередньо інтегруються у підвіску гакоблока.

- Обґрунтування вибору: Wika F9204 (або аналог Honeywell бурової серії).
- Конструктивні особливості: тензометричний датчик натягу каната у важкому промисловому виконанні з нержавіючої сталі, клас захисту IP67/IP69K, іскробезпечний ланцюг (E_x).
- Технічні характеристики: діапазон вимірювання: $0 \div 500$ кН (залежно від діаметра каната).
 - Гранична похибка: $p_m = 0,5\%$.
- Промисловий протокол: HART (інтегрований поверх токової петлі 4–20 мА). Це дозволяє ПЛК отримувати не лише значення натягу, але й верифікувати температуру сенсора та фіксувати мікрозміни опору тензорезисторів для предиктивного обслуговування.

3.2.2 Вибір датчика тиску в маніфольді бурових насосів

Датчик тиску на гирлі фіксує пульсації та гідродинамічні втрати. Для умов буріння з абразивними та агресивними промивальними рідинами необхідні

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

датчики з відкритою розділовою мембраною (Hammer Union), стійкою до гідроударів.

- Обґрунтування вибору: Rosemount 3106 (Emerson) або Wika IS-3 (у виконанні Hammer Union).
- Конструктивні особливості: спеціалізований «буровий» датчик тиску із приєднанням типу Weco (Anson). Мембрана із сплаву Inconel для захисту від ерозії шрамом та хімічної агресії бурового розчину.
 - Технічні характеристики: діапазон вимірювання: $0 \div 60$ МПа ($0 \div 600$ бар); основна похибка: 0.25%; стійкість до перевантажень: до 150% від номіналу.
- Промисловий протокол: Profibus PA або HART. Забезпечує високу частоту опитування (до 50 Гц), що необхідно для ефективної роботи цифрового ФНЧ Баттерворта (описаного в розд. 2.3) при придушенні коливань поршнів насоса.

3.2.3 Вибір витратомірів бурового розчину (вхід/вихід)

Для реалізації алгоритму раннього виявлення ГНВП та поглинань за трендом різниці витрат ($\Delta Q = Q_{in} - Q_{out}$), звичайні лопатеві давачі («хлопавки») на виході є неприпустимими через високу похибку ($10 \div 15\%$).

- Витратомір на вході (нагнітальна лінія): електромагнітний витратомір Endress+Hauser Proline Promag W 400. Принцип роботи: не створює перешкод потоку, вимірює витрату електропровідних рідин (водна основа розчину). Точність: рm 0.5%. Протокол: PROFINET. Дозволяє інтегрувати пристрій безпосередньо в шину керування ПЛК з мінімальною затримкою.
- Витратомір на виході (зливна лінія): коріолісовий (масовий) витратомір Endress+Hauser Promass X 500 або спеціалізований безнапірний електромагнітний давач. Обґрунтування: оскільки розчин на виході може бути газованим або містити шлам, коріолісовий витратомір є ідеальним, очікувано вимірюючи не лише об'ємну витрату, але й густину розчину в реальному часі (що дає додаткову ознаку для детектування ГНВП). Точність: рm 0.1% для рідини. Протокол: Modbus TCP / PROFINET.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

3.2.4 Вибір давачів обертів (ротора / вала верхнього привода)

Контроль частоти обертання бурової колони (ω_r) необхідний для відстеження та демпфування автоколивальних процесів типу Stick-Slip.

- Обґрунтування вибору: інкрементальний оптичний або магнітний енкодер Pepperl+Fuchs (серія CVS58X) у вибухозахищеному корпусі.
- Конструктивні особливості: монтується безпосередньо на вал електродвигуна верхнього привода (ВУП) або ротора через гнучку муфту. Магнітний принцип зчитування є більш стійким до значних вібраційних навантажень бурової вишки.
- Технічні характеристики: роздільна здатність: $1024 \div 4096$ імп/об.; максимальна частота обертання до 6000 об/хв.
- Промисловий протокол: EtherCAT або PROFINET (з підтримкою профілю PROFIdrive). Забезпечує надшвидку передачу даних ($< 1\text{мс}$) в контур регулювання швидкості ЧРП, що дає змогу миттєво фіксувати мікрозупинки та зриви долота при виникненні крутильних коливань.

3.2.5 Сведена специфікація вибору засобів автоматизації

Для формування специфікації проєкту всі обрані датчики зведено у підсумкову технічного забезпечення КІСАК.

Таким чином вибір сучасного парку датчиків із підтримкою цифрових інтерфейсів HART, PROFINET та Modbus TCP дозволяє відмовитися від громіздких проміжних аналогових модулів узгодження сигналів. Пряме передавання таблицю 3.1 цифрового коду від первинного перетворювача до ПЛК мінімізує похибки квантування та наведення завад у кабельних лініях бурової установки, що забезпечує високу якість вхідних даних для роботи інтегрованої системи прогнозування.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Таблиця 3.1 – Сведена специфікація вибору засобів автоматизації

Технологічний параметр	Марка та виробник датчика	Тип вихідного каскаду / Сенсор	Основна точність	Промисловий протокол	Роль в алгоритмах предиктивної аналітики
Вага на гаку / Осьове навантаження	Wika F9204 (Німеччина)	Тензометричний месдоза	pm 0.5%	HART (4-20 mA)	Контроль пружної деформації колони, фільтрація Калмана
Тиск у маніфольді	Rosemount 3106 (США)	П'єзорезистивний (Hammer Union)	pm 0.25 %	Profibus PA	Виявлення зашламування, фільтрація пульсацій насоса (Баттерворт)
Витрата на вході	E+H Promag W 400 (Швейцарія)	Електромагнітний	pm 0.5%	PROFINET	Базовий баланс витрати для нечіткої логіки ($S \Delta Q$)
Витрата / Густина на виході	E+H Promass X 500 (Швейцарія)	Коріолісовий (масовий)	pm 0.1%	Modbus TCP	Раннє виявлення припливу газу або поглинання розчину пластом
Оберти вала (RPM)	Pepperl+Fuchs CVS58 (Німеччина)	Магнітний енкодер	1024 імп/об	PROFINET	Миттєва фіксація фази заклинення (Stick) в автоколиваннях

3.3 Вибір та обґрунтування ПЛК та модулів аналогового/цифрового вводу-виводу для збору даних у реальному часі

Для забезпечення високої надійності, швидкодії та підтримки розроблених алгоритмів цифрової фільтрації у реальному часі (Hard Real-Time), необхідно

виконати обґрунтований вибір центрального процесора ПЛК та периферійних модулів вводу-виводу.

3.3.1 Обґрунтування вибору контролера: Siemens SIMATIC S7-1500

Для автоматизації бурових установок у концепції Індустрії 4.0 оптимальним вибором є лінійка контролерів Siemens SIMATIC S7-1500 (а саме процесор CPU 1515-2 PN).

Критерії та причини вибору:

- 1) Висока швидкодія: час виконання логічної операції становить 0 нс, а операцій із рухомою комою — 64 нс. Це дозволяє без затримок прораховувати складні математичні рівняння фільтра Калмана та IIR-фільтра Баттерворта (описані в підрозділі 2.3) в основному циклі програми.
- 2) Інтегрований сервер OPC UA: процесор має вбудовану апаратну підтримку протоколу OPC UA. Це критично важливо для вертикальної інтеграції, оскільки дозволяє напряму передавати масиви відфільтрованих технологічних даних на Edge-сервер предиктивної аналітики (де працює Fuzzy Logic) без проміжних шлюзів.
- 3) Два незалежних інтерфейси PROFINET: дозволяють розділити мережеві потоки. Перший інтерфейс (з вбудованим 2-портовим комутатором) використовується для швидкісної шини польового рівня (опитування датчиків та ЧРП), другий – для зв'язку зі SCADA-системою та IT-інфраструктурою підприємства.

3.3.2 Розрахунок та вибір модулів вводу-виводу

Для підключення первинних датчиків (визначених у підрозділі 3.2) та виконавчих механізмів формується оптимальна специфікація модулів розширення для встановлення на профільну шину ПЛК.

1) Модуль аналогового вводу (AI) – контрольні параметри (вага, тиск, струм)

- Вибір: SIMATIC S7-1500, AI 8xU/I HF (6ES7531-7NF00-0AB0).

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

- Обґрунтування: Модуль класу High Feature (HF) має 8 аналогових каналів із розрядністю 16 біт, що гарантує високу точність квантування сигналів. Важливою особливістю є висока швидкість фільтрації та придушення завад мережі (50/60 Гц). Канали мають індивідуальну гальванічну розв'язку, що захищає процесор ПЛК від стрибків напруги при роботі силового бурового обладнання.

2) Модуль технологічного лічильника (ТМ) – швидкість обертів (RPM)

- Вибір: SIMATIC S7-1500, TM Count 2x24V (6ES7550-1AA01-0AB0).
- Обґрунтування: Звичайні дискретні модулі не здатні коректно обробляти сигнали частотою в кілька кілогерц від енкодера верхнього привода. Цей спеціалізований модуль забезпечує пряме підключення ікрементальних магнітних енкодерів із частотою проходження імпульсів до 200 кГц, гарантуючи точний підрахунок обертів вала в реальному часі.

3) Модулі дискретного вводу-виводу (DI / DQ) – сигнали стану та блокувань

- Дискретний ввід: DI 16x24VDC HF. Використовується для зчитування сигналів кінцевих вимикачів, стану кнопок аварійної зупинки (ESD), сигналів готовності ЧРП.
- Дискретний вихід: DQ 16x24VDC/0.5A ST. Необхідний для видачі релейних команд керування (увімкнення допоміжних гідронасосів, світлозвукової сигналізації передаварійного стану для бурильника).

3.3.3 Архітектура розподіленого вводу-виводу (ПЛК → ET 200MP)

Враховуючи значні габарити бурової установки та велику відстань від кабіни бурильника до насосного блоку, для побудови системи обирається архітектура розподіленого вводу-виводу на базі станцій ET 200MP.

- Центральний ПЛК (CPU 1515-2 PN) розміщується в головній апаратній шафі САК (контейнер СКР).

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

- У кабіні бурильника (на гирлі) та в насосному блоці встановлюються виносні станції ET 200MP з інтерфейсними модулями IM 155-5 PN HF.
- Зв'язок між центральним ПЛК та периферійними станціями реалізується по резервованому оптичному кільцю PROFINET (з підтримкою протоколу MRP — Media Redundancy Protocol). Це гарантує, що у випадку механічного пошкодження одного з кабелів на буровій, система перейде на резервний канал за час < 20 мс без зупинки процесу буріння.

3.3.4 Специфікація апаратного забезпечення KICK

Підсумковий перелік обладнання системи збору даних та автоматизації наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Специфікація апаратного забезпечення KICK

Компонент системи	Артикул (Siemens MLFB)	Кількість	Основні технічні характеристики	Технологічна роль у KICK
Центральний процесор	6ES7515-2FM02-0AB0	1 шт.	CPU 1515-2 PN, 500 KB Work memory, OPC UA Server	Обчислення фільтрів, логіка блокувань, зв'язок з Edge PC
Інтерфейсний модуль	6ES7155-5AA01-0AB0	2 шт.	IM 155-5 PN HF для розподіленої периферії ET 200MP	Збір даних з віддалених блоків бурової по PROFINET
Модуль аналогового вводу	6ES7531-7NF00-0AB0	2 шт.	AI 8xU/I HF, 16 біт розрядність, ізольовані канали	Опитування датчиків ваги, тиску та коріолісових витратомірів
Технологічний модуль	6ES7550-1AA01-0AB0	1 шт.	TM Count 2x24V, 2 канали лічильників до 200 кГц	Обробка високошвидкісних імпульсів від енкадера RPM
Модуль дискретного вводу	6ES7521-1BH00-0AB0	2 шт.	DI 16x24VDC HF, з затримкою вхідного фільтра	Моніторинг положення засувки, кнопок пуску, кінцевиків

Продовження таблиці 3.2

Компонент системи	Артикул (Siemens MLFB)	Кількість	Основні технічні характеристики	Технологічна роль у KICAK
Модуль дискретного виходу	6ES7522-1BH01-0AB0	1 шт.	DQ 16x24VDC/0.5A ST, транзисторні виходи	Видача сигналів управління на реле та світлові колони

Таким чином вибір промислового контролера Siemens SIMATIC S7-1500 та модулів високоточної периферії класу High Feature забезпечує створення надійної апаратної платформи для KICAK. Завдяки високій обчислювальній потужності CPU та використанню розподіленої архітектури по протоколу PROFINET із резервуванням кільця, досягається гарантований збір та первинна фільтрація технологічних параметрів у реальному часі, що мінімізує ймовірність пропуску ранніх ознак аварійних ситуацій.

3.4 Опис розробленої функціональної схеми автоматизації (ФСА / АКС) процесу буріння

Функціональна схема автоматизації (ФСА) розроблена відповідно до вимог ДСТУ та ГОСТ 21.208-2013 і відображає структуру автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСУ ТП) буріння. На схемі показані прилади, засоби автоматизації, а також функціональні зв'язки між ними та технологічним обладнанням. (Рисунок 3.1).

Процес буріння є багатопараметричним об'єктом керування, в якому виділено п'ять основних контурів автоматизації.

Контур 1 — Регулювання навантаження на долото (ВОБ)

Навантаження на долото (weight on bit, ВОБ) є одним із ключових технологічних параметрів, що безпосередньо впливає на механічну швидкість буріння та ресурс долота. Для вимірювання ваги бурильного інструменту встановлено датчик ваги на гаку (поз. 1-1), сигнал від якого надходить до регулятора ВОБ (поз. 1-2). Регулятор формує керуючий вплив на гальмівний

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

механізм лебідки (поз. 1-3), змінюючи швидкість спуску колони та, відповідно, навантаження на вибій.

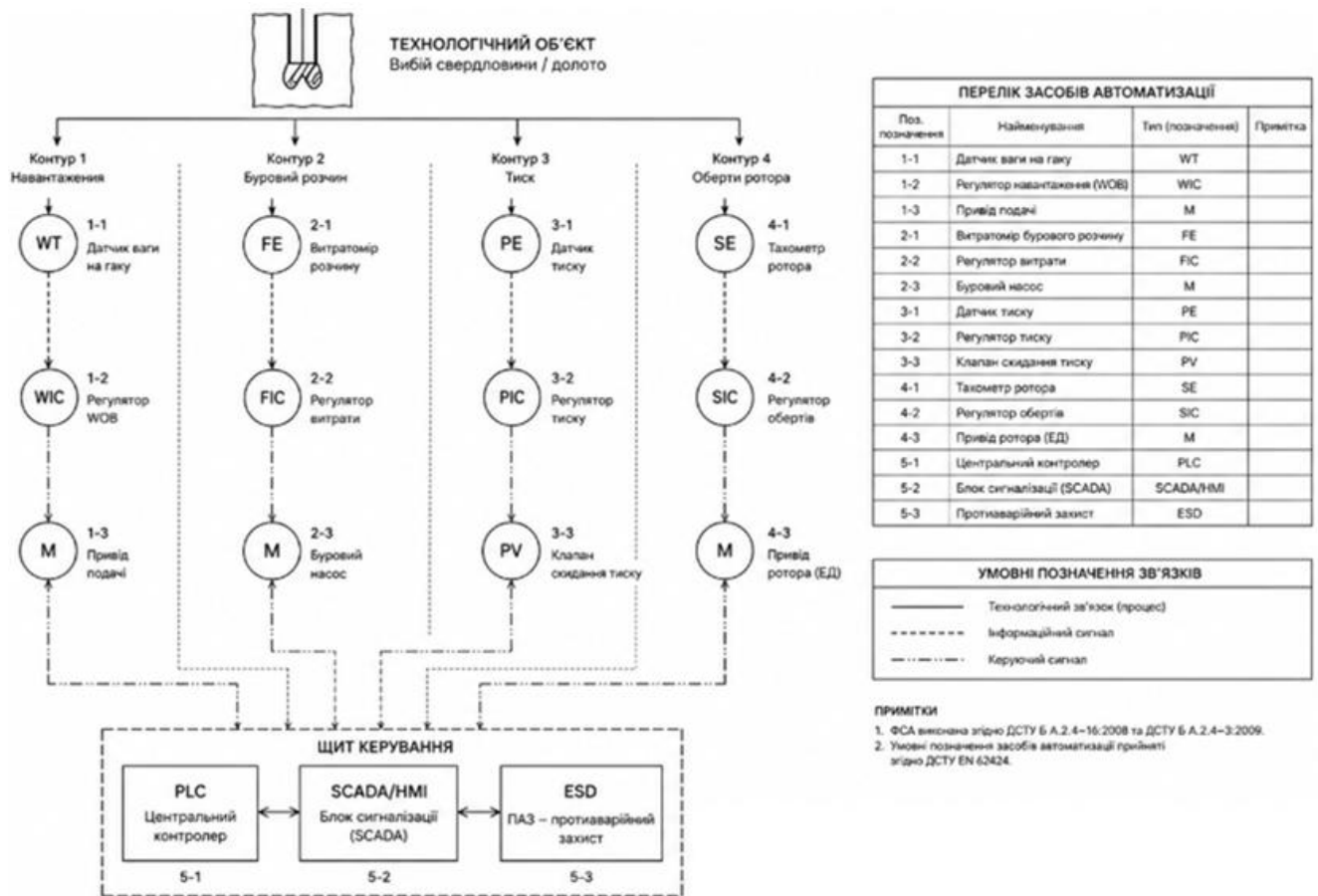


Рисунок 3.1 – Функціональна схема автоматизації

Закон регулювання — пропорційно-інтегральний (ПІ), що забезпечує нульову статичну похибку підтримання заданого значення ВОБ.

Контур 2 — Регулювання витрати бурового розчину

Буровий розчин виконує функції охолодження долота, винесення шламу та утримання тиску у свердловині. Витратомір (поз. 2-1) вимірює об'ємну витрату розчину на виході з насоса. Сигнал надходить до регулятора (поз. 2-2), який формує завдання на зміну продуктивності бурового насоса (поз. 2-3) шляхом регулювання числа ходів поршня або положення байпасного клапана.

Відхилення витрати від заданого значення може свідчити про поглинання розчину або розрив пластового тиску — що автоматично фіксується системою сигналізації.

Контур 3 — Регулювання та захист за тиском у нагнітальній лінії

Тиск у нагнітальній лінії (поз. 3-1) контролюється манометричним датчиком з уніфікованим вихідним сигналом 4–20 мА. Реле тиску (поз. 3-2) здійснює сигналізацію та блокування при перевищенні допустимого значення. Виконавчим елементом (поз. 3-3) є запобіжний клапан скидання, що спрацьовує в аварійних режимах.

Контроль тиску є критично важливим для запобігання гідророзриву пласта та ГНВП (газонафтоводопрояву).

Контур 4 — Регулювання частоти обертання ротора

Частота обертання бурильної колони визначає ефективність руйнування породи та навантаження на КНБК (компоновку низу бурильної колони). Тахометр (поз. 4-1) вимірює фактичну частоту обертання ротора, сигнал порівнюється із заданим значенням у регуляторі (поз. 4-2), який формує завдання на частотний перетворювач приводного електродвигуна (поз. 4-3). Застосування частотно-регульованого приводу (ЧРП) дозволяє плавно змінювати частоту обертання в діапазоні 0 – 250 об/хв.

Контур 5 — Протиаварійний захист (ПАЗ)

Система протиаварійного захисту реалізована як самостійний контур, що функціонує паралельно з контурами регулювання та має вищий пріоритет. Блок сигналізації SCADA (поз. 5-1) збирає інформацію від усіх датчиків критичних параметрів: тиску, витрати, газовмісту (датчики ГНВП), температури та ваги. При перевищенні уставки спрацьовує система ПАЗ (поз. 5-2), яка ініціює аварійну зупинку установки та закриття протифонтанного обладнання — БОП (поз. 5-3, Blow-Out Preventer).

ПАЗ реалізовано на базі контролера безпеки з сертифікатом SIL 2, що відповідає вимогам ІЕС 61511.

Центральний контролер (ПЛК / АСУ ТП)

Усі контури автоматизації замикаються через програмований логічний контролер (ПЛК), який виконує роль центрального вузла АСУ ТП. ПЛК забезпечує:

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- прийом аналогових сигналів від датчиків (4–20 мА, HART);
- реалізацію алгоритмів ПІД-регулювання для кожного контуру;
- передачу даних до SCADA-системи верхнього рівня (протокол Modbus TCP / OPC UA);
- виконання логіки ПАЗ відповідно до матриці причин і наслідків (Cause & Effect Matrix);
- архівування технологічних параметрів і журналу подій.

Зворотний зв'язок від технологічного об'єкта замикається через всі вимірювальні канали, що забезпечує адаптивне керування в умовах нестационарних геологічних умов буріння.

Таким чином розроблена ФСА охоплює всі ключові технологічні параметри процесу буріння. П'ять незалежних, але координованих контурів автоматизації забезпечують стабільне ведення процесу, мінімізацію аварійних ситуацій та відповідність вимогам промислової безпеки. Схема є основою для подальшого розроблення специфікації засобів автоматизації та алгоритмів керування.

3.5 Програмна реалізація системи прогнозування ускладнень

3.5.1 Загальна архітектура програмного забезпечення

Програмна реалізація системи прогнозування ускладнень виконана у вигляді трирівневої архітектури відповідно до концепції АСУ ТП (рисунки 3.2):

- рівень польових пристроїв — датчики та виконавчі механізми;
- рівень керування — ПЛК з алгоритмами прогнозування;
- рівень візуалізації та диспетчеризації — SCADA-система та HMI-інтерфейс оператора.

Програмне забезпечення ПЛК розроблено у середовищі TIA Portal (Siemens S7-1500) мовою ST (Structured Text) згідно з IEC 61131-3. Програмний блок прогнозування FB_StuckPipePredictor виконується з циклом 100 мс.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

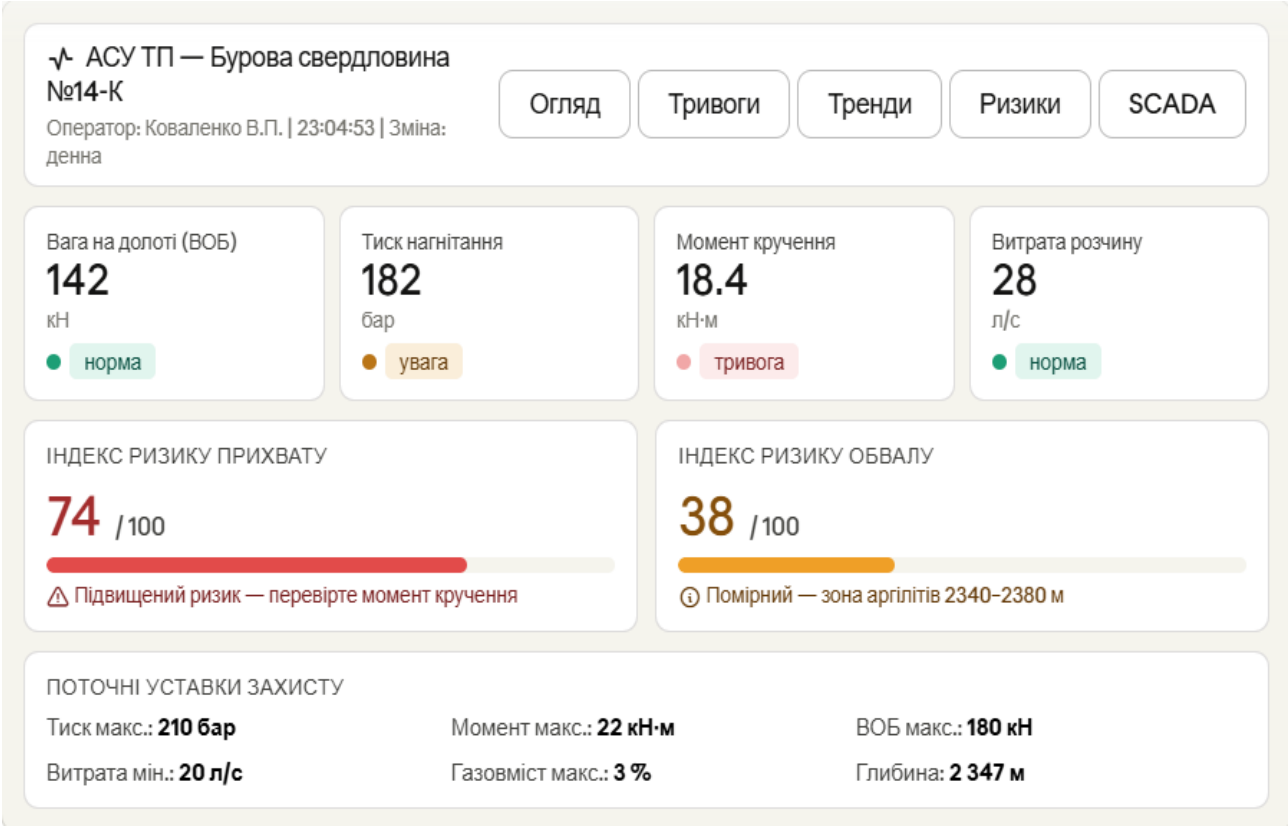


Рисунок 3.2 – Інтерактивний макет НМІ-інтерфейсу

3.5.2 НМІ-інтерфейс оператора бурової

HMI (Human-Machine Interface) — це основний засіб взаємодії оператора бурової з автоматизованою системою. Інтерфейс розроблений у середовищі WinCC SCADA (Siemens) і складається з п'яти функціональних екранів.

Екран «Огляд» (Overview)

Головний екран відображає поточний стан усіх ключових технологічних параметрів у режимі реального часу. Верхня частина містить чотири метрикові карти: навантаження на долото (ВОб), тиск у нагнітальній лінії, момент кручення та витрату бурового розчину. Кожен показник має кольоровий індикатор стану: зелений (норма), жовтий (попередження) або червоний (тривога). У нижній частині екрана розташовані два індикатори інтегрального ризику — для прихвату та обвалу — у вигляді числового значення (0–100) і горизонтальної смуги завантаження. Колір смуги змінюється від зеленого (ризик < 30) через жовтий (30–60) до червоного (> 60).

Екран «Тривоги» (Alarms)

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Екран тривоги реалізований як хронологічний журнал з фільтрацією за рівнем і статусом (активна / квітована). Кожен запис містить: часову мітку, текстовий опис події, рівень тривоги та статус квітування оператором. Система підтримує три рівні сповіщень:

- рівень 1 (попередження, WARNING) — звуковий сигнал одноразовий, жовте підсвічування відповідного блока; оператор спостерігає та приймає рішення самостійно;
- рівень 2 (аварія, ALARM) — переривчастий звуковий сигнал, червоне миготіння блока на НМІ, обов'язкове квітування оператором протягом 60 секунд; автоматичного втручання немає;
- рівень 3 (критична зупинка, CRITICAL) — ПАЗ автоматично зупиняє буровий насос та привід ротора, закриває дросельний маніфолд БОП; звуковий сигнал безперервний; скидання тільки після усунення причини та ручного підтвердження.

Матриця переходів між рівнями визначається Cause & Effect Matrix, яка зберігається в пам'яті ПЛК і може коригуватися головним технологом з паролем захистом.

Екран «Тренди» (Trends)

Екран трендів відображає зміну параметрів у часі у вигляді динамічних графіків. Підтримується відображення архівних даних глибиною до 24 годин з масштабуванням. На кожному графіку нанесені лінії уставок попередження (жовта пунктирна) та аварії (червона). Оператор може накладати декілька параметрів на один графік для кореляційного аналізу (наприклад, одночасний тренд моменту кручення та індексу ризику прихвату).

Екран «Ризики» (Risks)

Таблиця ризиків є центральним елементом підсистеми прогнозування. Для кожного параметра-індикатора відображається: поточне значення, нормативний діапазон, порогове значення, відносний вклад параметра в інтегральний індекс ризику (у відсотках) та поточний статус. Окремий блок «Рекомендації системи»

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

формується автоматично на підставі аналізу активних відхилень і містить конкретні технологічні заходи (зміна ВОБ, корегування густини розчину, виконання проробки тощо).

Екран «SCADA / OPC UA»

Технологічний екран призначений для інженера АСУ ТП і відображає список усіх тегів, що передаються між ПЛК і SCADA-сервером, з поточними значеннями та якістю сигналу (Good / Bad / Uncertain). Тут же відображається статус ПАЗ та конфігурація протоколів зв'язку.

3.5.3 Інтеграція з SCADA-системою

Інтеграція між ПЛК і SCADA-сервером реалізована за протоколом Modbus TCP (порт 502) з резервним каналом OPC UA (порт 4840). Топологія мережі — Ethernet Industrial, зірка, з резервуванням каналу зв'язку. Часові параметри циклу опиту: аналогові входи — 100 мс, дискретні входи — 20 мс, оновлення тегів на HMI — 500 мс, запис у архів трендів — 1 с.

SCADA-сервер архівує усі теги у базу даних MS SQL Server протягом одного року. Структура тегів побудована за ієрархічним принципом: <свердловина>.<підсистема>.<параметр>.<атрибут> (наприклад, ВН14.RISK.STUCK). Це забезпечує сумісність із стандартом ISA-95 та можливість подальшої інтеграції з корпоративними MES/ERP-системами.

Модуль звітності автоматично формує змінний рапорт у форматі PDF, що містить зведену таблицю ускладнень, графіки трендів критичних параметрів та оцінку відповідності режиму буріння проектному.

3.5.4 Захист та розмежування доступу

Програмне забезпечення реалізує чотирирівневу систему доступу: оператор (перегляд, квітування тривоги), старший оператор (додатково — зміна режимних параметрів), технолог (зміна уставок ПАЗ, перегляд архіву),

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

адміністратор (повний доступ, резервне копіювання). Усі дії фіксуються в аудит-журналі з ім'ям користувача та часовою міткою відповідно до вимог ІЕС 62443.

Висновки до розділу

У третьому розділі розроблено технічне та програмне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи прогнозування ускладнень процесу буріння нафтогазових свердловин. Запропоновано трирівневу архітектуру KICAK відповідно до концепції Індустрії 4.0 та стандарту ISA-95, яка забезпечує інтеграцію польового рівня, рівня ПЛК та SCADA/Edge-рівня для реалізації функцій моніторингу, прогнозування та протиаварійного захисту.

Виконано обґрунтований вибір сучасних засобів автоматизації, зокрема датчиків технологічних параметрів, промислових протоколів обміну даними та програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1500. Розроблена система забезпечує збір, фільтрацію та передачу технологічної інформації в реальному часі із використанням протоколів HART, PROFINET, Modbus TCP та OPC UA.

Сформовано функціональну схему автоматизації процесу буріння, яка включає контури регулювання навантаження на долото, витрати бурового розчину, тиску, частоти обертання ротора та контур протиаварійного захисту. Запропонована структура дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу та своєчасне реагування на виникнення передаварійних ситуацій.

Розроблено програмну архітектуру системи прогнозування ускладнень із використанням SCADA-системи WinCC та HMI-інтерфейсу оператора. Реалізовано функції візуалізації, архівування даних, сигналізації та прогнозування ризиків прихватів і обвалів свердловини на основі аналізу технологічних параметрів буріння.

Таким чином, розроблена комп'ютерно-інтегрована система прогнозування забезпечує підвищення надійності, безпеки та ефективності процесу буріння за рахунок раннього виявлення небезпечних режимів роботи та автоматизованої підтримки прийняття рішень оператором бурової установки.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТА ІНТЕРФЕЙС КОРИСТУВАЧА

4.1 Розробка прикладного програмного забезпечення для контролера

Розробка прикладного програмного забезпечення для контролера є одним із ключових етапів реалізації автоматизованої системи прогнозування ускладнень процесу буріння. Програмне забезпечення контролера призначене для опитування первинних вимірювальних перетворювачів, попередньої обробки сигналів, реалізації первинної логіки фільтрації та передавання підготовлених даних до модуля інтелектуального аналізу.

Основними завданнями прикладної програми контролера є: циклічне опитування датчиків технологічних параметрів; масштабування аналогових сигналів; перевірка достовірності вимірювань; фільтрація шумів та випадкових викидів; формування трендів параметрів; передавання даних у SCADA/HMI; формування первинних аварійних сигналів.

До контролера надходять сигнали від датчиків крутного моменту, тиску бурового розчину, ваги на гаку, витрати бурового розчину, швидкості обертання та вібрацій. Аналогові сигнали типу 4–20 мА перетворюються у фізичні величини відповідно до діапазонів вимірювання кожного датчика.

Первинна обробка сигналів у контролері виконується в декілька етапів. Спочатку проводиться масштабування сирих значень АЦП у технологічні одиниці. Далі виконується перевірка сигналів на вихід за допустимі межі, обрив лінії або коротке замикання. Після цього застосовується цифрова фільтрація для зменшення впливу випадкових шумів, пульсацій бурових насосів та механічних вібрацій.

Для фільтрації сигналів у програмі контролера доцільно використовувати експоненційне згладжування першого порядку:

$$X_f(k) = \alpha X(k) + (1 - \alpha)X_f(k-1)$$

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

де $X(k)$ — поточне виміряне значення параметра; $X_f(k)$ — відфільтроване значення; α — коефіцієнт згладжування; k — номер циклу опитування.

Для виявлення різких аномальних викидів може використовуватися логіка обмеження приросту сигналу. Якщо зміна параметра за один цикл перевищує допустиме значення, сигнал не приймається одразу, а замінюється попереднім достовірним значенням або усереднюється.

У програмі контролера реалізуються такі основні програмні блоки: блок зчитування аналогових входів; блок масштабування сигналів; блок діагностики датчиків; блок цифрової фільтрації; блок розрахунку трендів; блок первинної аварійної логіки; блок передавання даних до SCADA [11, 12].

Структура програмної реалізації у вигляді логіки контролера:

```
(* Опитування аналогових входів *)
AI_Torque_Raw := AI_Channel_1;
AI_Pressure_Raw := AI_Channel_2;
AI_WOB_Raw := AI_Channel_3;
AI_Flow_Raw := AI_Channel_4;

(* Масштабування сигналів 4-20 мА *)
Torque := (AI_Torque_Raw - 4.0) * (Torque_Max - Torque_Min) / 16.0 + Torque_Min;
Pressure := (AI_Pressure_Raw - 4.0) * (Pressure_Max - Pressure_Min) / 16.0 + Pressure_Min;
WOB := (AI_WOB_Raw - 4.0) * (WOB_Max - WOB_Min) / 16.0 + WOB_Min;
Flow := (AI_Flow_Raw - 4.0) * (Flow_Max - Flow_Min) / 16.0 + Flow_Min;

(* Перевірка достовірності сигналів *)
Torque_Valid := (AI_Torque_Raw >= 3.8) AND (AI_Torque_Raw <= 20.5);
Pressure_Valid := (AI_Pressure_Raw >= 3.8) AND (AI_Pressure_Raw <= 20.5);
WOB_Valid := (AI_WOB_Raw >= 3.8) AND (AI_WOB_Raw <= 20.5);
Flow_Valid := (AI_Flow_Raw >= 3.8) AND (AI_Flow_Raw <= 20.5);

(* Експоненційна фільтрація *)
IF Torque_Valid THEN
    Torque_F := Alpha * Torque + (1.0 - Alpha) * Torque_F;
END_IF;

IF Pressure_Valid THEN
    Pressure_F := Alpha * Pressure + (1.0 - Alpha) * Pressure_F;
END_IF;

IF WOB_Valid THEN
    WOB_F := Alpha * WOB + (1.0 - Alpha) * WOB_F;
```

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

```

END_IF;

IF Flow_Valid THEN
    Flow_F := Alpha * Flow + (1.0 - Alpha) * Flow_F;
END_IF;

(* Розрахунок трендів *)
Torque_Trend := (Torque_F - Torque_F_Old) / Cycle_Time;
Pressure_Trend := (Pressure_F - Pressure_F_Old) / Cycle_Time;
Flow_Trend := (Flow_F - Flow_F_Old) / Cycle_Time;

Torque_F_Old := Torque_F;
Pressure_F_Old := Pressure_F;
Flow_F_Old := Flow_F;

(* Первинна логіка попередження *)
Warning_Stuck :=
    (Torque_Trend > Torque_Trend_Limit)
    AND (Pressure_Trend > Pressure_Trend_Limit);

Alarm_Stuck :=
    (Torque_F > Torque_High_Limit)
    AND (Pressure_F > Pressure_High_Limit);

(* Передавання параметрів до SCADA *)
SCADA_Torque := Torque_F;
SCADA_Pressure := Pressure_F;
SCADA_WOB := WOB_F;
SCADA_Flow := Flow_F;
SCADA_Warning_Stuck := Warning_Stuck;
SCADA_Alarm_Stuck := Alarm_Stuck;

```

У наведеному фрагменті програми реалізовано типову логіку роботи контролера у циклічному режимі. Спочатку виконуються зчитування та масштабування сигналів, після чого система перевіряє їх достовірність і виконує фільтрацію. Далі розраховуються тренди технологічних параметрів, які використовуються для формування первинних сигналів попередження про можливе прихоплення бурильної колони.

Реалізація такої логіки на рівні контролера дозволяє зменшити навантаження на верхній рівень SCADA та забезпечити швидке реагування на зміну технологічного стану процесу буріння. Крім того, попередня фільтрація сигналів підвищує достовірність роботи інтелектуального модуля прогнозування та знижує ймовірність хибних спрацювань системи захисту.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Таким чином, розроблене прикладне програмне забезпечення контролера забезпечує надійне опитування датчиків, первинну обробку технологічних сигналів та формування базових діагностичних ознак, необхідних для подальшого прогнозування ускладнень процесу буріння.

4.2 Проєктування людино-машинного інтерфейсу (HMI) оператора-бурильника та інженера з моніторингу в середовищі SCADA (TIA Portal)

Людино-машинний інтерфейс HMI є важливим елементом автоматизованої системи контролю та прогнозування ускладнень процесу буріння. Він забезпечує візуалізацію технологічних параметрів у реальному часі, відображення стану обладнання, формування попереджень, аварійних повідомлень та підтримку прийняття рішень оператором-бурильником і інженером з моніторингу [11, 13].

Проєктування HMI у середовищі SCADA TIA Portal передбачає створення мнемосхем, трендів, вікон аварій, журналів подій та екранів налаштування системи. Основною вимогою до інтерфейсу є забезпечення швидкого доступу до критично важливої інформації про стан процесу буріння та рівень ризику виникнення ускладнень.

У складі HMI передбачено такі основні екрани (рисунок 4.1):

- 1) Головний екран процесу буріння – відображає загальний стан бурової установки, свердловини, верхнього привода, бурових насосів та основних технологічних параметрів.
- 2) Екран трендів — використовується для спостереження за зміною крутного моменту, тиску бурового розчину, осьового навантаження, швидкості проходки та рівня загрози (y^*).
- 3) Екран прогнозування ускладнень – відображає результати роботи інтелектуального модуля діагностики: рівень ризику прихоплення, обвалу, зашламування або ГНВП.
- 4) Екран аварій та попереджень – містить список активних і архівних повідомлень із часом виникнення, типом події та рекомендованою дією оператора.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

- SIEMENS**
SIMATIC HMI
Головний екран
СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ УСКЛАДНЕНЬ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ
15.05.2025 14:35:22 Operator
- Верхній привод

Бурильна колона

Долото

Верхній привод
RPM 120 об/хв

Насоси
Pнас 12.3 МПа

Маніфольд
P 12.1 МПа

Qох 35.0 л/с

Qох 33.2 л/с

ΔQ 1.8 л/с

Крутий момент M
5.12 кН·м

Вага на гачу G
172.5 кН

Осьове навантаження WOB
48.2 кН

Швидкість проходки ROP
12.4 м/год

РІВЕНЬ ЗАГРОЗИ у°

0.3

0.6

0.75

1.0

АВАРИЙНИЙ ТРЕНД

ТRENДИ ПАРАМЕТРІВ

Крутий момент, кН·м

Тиск бурового розчину, МПа

Осьове навантаження, кН

Швидкість проходки, м/год

Рівень загрози у°

ПРОГНОЗ УСКЛАДНЕНЬ

Інтегральний рівень загрози у°
0.75
АВАРИЙНИЙ ТРЕНД

0.6 - 1.0 Аварійний тренд

0.3 - 0.6 Попередження

0 - 0.3 Нормальний режим

Ймовірність ускладнень

Прихоплення КНБК 0.78

Зашламування ЗТП 0.46

Обвал стінок 0.32

Втрата циркуляції 0.18

ГНВП 0.12

Рекомендації

⚠️ Знизити швидкість подачі інструменту

⚠️ Увімкнути режим коливально-зворотного руху

⚠️ Контролювати тиск бурового розчину

🔧 Контролювати різницю витрат ΔQ

АВАРИЙНИ ПОВІДОМЛЕННЯ

Час	Дата	Пріоритет	Повідомлення	Стан
14:34:57	15.05.2025	Аварія	Аварійний тренд: можливе прихоплення КНБК	Активне
14:34:50	15.05.2025	Попередження	Зростає крутий моменту	Активне
14:34:43	15.05.2025	Попередження	Зростає тиску бурового розчину	Активне
14:20:11	15.05.2025	Попередження	Перевіряти різницю витрат ΔQ	Пагубнодіє
14:10:05	15.05.2025	Попередження	Зростає вібрація	Пагубнодіє
13:45:22	15.05.2025	Інформація	Зміна режиму Автоматичний	Пагубнодіє

Підтвердити

Підтвердити всі

Скинути

Журнал подій

НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ

Уставки

Фльтрація

Тренди

Напітка логіка

Система

Параметр	Попередження	Аварія	Одиниці
Крутий момент M	4.5	6.0	кН·м
Тиск бурового розчину P	11.0	13.5	МПа
Осьове навантаження WOB	70.0	90.0	кН
Різниця витрат ΔQ	2.0	3.5	л/с
Швидкість проходки ROP	5.0	2.0	м/год

Параметри фільтрації

Коefіцієнт згладжування α 0.30

Часове вікно тренду, с 60

ЕКРАН ІНЖЕНЕРА З МОНИТОРИНГУ

Стан системи

Діагностика каналів

ПЛК	Стан	Канал	Стан	Значення
NMI	OK	Ai 1 Крутий момент	OK	5.12 кН·м
	OK	Ai 2 Тиск	OK	12.1 МПа
За'язок з ПЛК	OK	Ai 3 WOB	OK	48.2 кН
	OK	Ai 4 Потік вхідний	OK	35.0 л/с
Архітування	OK	Ai 5 Потік вихідний	OK	33.2 л/с
	OK	Ai 6 Вібрація	OK	2.3 мм/с
Дисковий простір	72 %	Ai 7 Обертання	OK	120 об/хв

Головна мнемосхема відображає основні елементи процесу буріння: бурову вежу; верхній привод; бурильну колону; долото; циркуляційну систему бурового розчину; бурові насоси; маніфольд; затрубний простір; блок прогнозування ускладнень.

На екрані оператора виводяться такі параметри: крутний момент (M), Н·м; осьове навантаження на долото (WOB), кН; вага на гаку (G_{hook}), кН; тиск бурового розчину (P), МПа; витрата на вході (Q_{in}), л/с; витрата на виході (Q_{out}), л/с; різниця

витрат (ΔQ); швидкість обертання (n), об/хв; швидкість проходки (ROP), м/год; рівень загрози (y^*).

Рівень загрози відображається у вигляді індикатора з трьома зонами: зелена зона — нормальний режим; жовта зона — попередження; червона зона — аварійний тренд.

Екран трендів призначений для аналізу динаміки параметрів у часі. На ньому відображаються графіки: крутного моменту; тиску бурового розчину; осьового навантаження; швидкості проходки; рівня загрози (y^*); трендів ($M(t)$, $P(t)$, $\Delta Q(t)$).

Для зручності оператора тренди повинні мати можливість масштабування за часом, перегляду історичних даних та порівняння параметрів між собою. Це дозволяє швидко оцінити характер розвитку ускладнення та перевірити правильність роботи алгоритму прогнозування.

На екрані прогнозування відображається поточний стан інтелектуальної системи. Основним елементом є індикатор інтегрального рівня загрози (y^*), який формується нечіткою системою логічного висновку.

Для кожного типу ускладнення передбачено окремий індикатор: ризик прихоплення; ризик обвалу стінок свердловини; ризик зашламування затрубного простору; ризик втрати циркуляції; ризик газонафтоводопрояву.

Також на екрані відображаються текстові рекомендації для оператора: «Знизити швидкість подачі інструменту»; «Перевірити тиск бурового розчину»; «Увімкнути режим розходжування колони»; «Контролювати різницю витрат на вході та виході».

У TIA Portal для реалізації аварійної сигналізації створено систему Alarm Logging. Вона містить попереджувальні та аварійні повідомлення.

Повідомлення такі: «Попередження: зростання крутного моменту»; «Попередження: зростання тиску бурового розчину»; «Аварійний тренд: можливе прихоплення КНБК»; «Аварія: перевищення тиску в маніфольді»; «Аварія: втрата сигналу датчика тиску»; «Несправність каналу зв'язку з ПЛК».

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Для кожного повідомлення задаються: пріоритет; час виникнення; умова активації; текст повідомлення; рекомендована дія оператора; необхідність підтвердження.

Екран налаштувань призначений для інженера з моніторингу або відповідального технолога. Доступ до нього обмежений паролем.

На цьому екрані задаються: уставки крутного моменту; уставки тиску; пороги трендів; коефіцієнти фільтрації; межі рівня загрози; параметри нечіткої логіки; часове вікно аналізу трендів; параметри архівування даних.

Зміна критичних параметрів фіксується у журналі подій.

Обмін даними між контролером і HMI у TIA Portal здійснюється через теги PLC Tags. Для кожного технологічного параметра створюється відповідний тег.

Групи тегів:

- Torque_M;
- Pressure_P;
- WOB;
- Hook_Load;
- Flow_In;
- Flow_Out;
- Delta_Q;
- RPM;
- ROP;
- Risk_Level;
- Alarm_Stuck;
- Warning_Trend;
- Auto_Protection_Active.

Для відображення аналогових параметрів використовуються числові поля, шкальні індикатори та трендові графіки. Для дискретних сигналів застосовуються лампи стану, кнопки підтвердження аварій та індикатори режимів роботи.

Розроблений інтерфейс відповідає таким вимогам: простота та зрозумілість для оператора; мінімальна кількість зайвих елементів; чітке виділення аварійних станів; використання кольорової індикації станів; швидкий доступ до трендів і

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

аварій; захист інженерних налаштувань; архівування технологічних параметрів; підтримка ручного та автоматичного режимів роботи.

Таким чином, спроектований людино-машинний інтерфейс у середовищі SCADA TIA Portal забезпечує зручний контроль процесу буріння, своєчасне інформування оператора про розвиток ускладнень та підтримку автоматизованого прийняття рішень. Використання мнемосхем, трендів, аварійних повідомлень і захищених інженерних налаштувань підвищує ефективність роботи системи прогнозування та безпеку бурових робіт.

4.3 Реалізація підсистеми візуалізації, побудови графіків (трендів) та системи попереджувальної/аварійної сигналізації (Alarms)

Підсистема візуалізації, побудови графіків та аварійної сигналізації є важливим елементом людино-машинного інтерфейсу автоматизованої системи прогнозування ускладнень процесу буріння. Вона призначена для оперативного відображення технологічних параметрів, аналізу їх зміни в часі, формування попереджувальних і аварійних повідомлень, а також підтримки прийняття рішень оператором-бурильником та інженером з моніторингу.

У середовищі SCADA TIA Portal реалізація підсистеми візуалізації виконується на основі PLC-тегів, які передаються від контролера до НМІ-панелі або операторської станції. Для кожного технологічного параметра створюється окремий тег із відповідним типом даних, одиницями вимірювання, межами відображення та аварійними уставками.

До основних параметрів, що виводяться на екран оператора, належать: крутний момент верхнього привода (M), $\text{кН}\cdot\text{м}$; тиск бурового розчину (P), МПа; осьове навантаження на долото (WOB), кН; вага на гаку (G_{hook}), кН; витрата бурового розчину на вході (Q_{in}), л/с; витрата бурового розчину на виході (Q_{out}), л/с; різниця витрат (ΔQ), л/с; швидкість обертання (n), об/хв; швидкість проходки (ROP), м/год; інтегральний рівень загрози (y^*).

Для візуального сприйняття стану процесу буріння на головній мнемосхемі використовуються числові індикатори, шкальні прилади, кольорові лампи стану

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

та графічні елементи бурової установки. Поточний рівень загрози (y^*) відображається у вигляді індикатора з трьома зонами: зеленою, жовтою та червоною. Зелена зона відповідає нормальному режиму, жовта – попередженню, а червона – аварійному тренду.

Побудова графіків трендів реалізується за допомогою об'єктів Trend View. Для аналізу процесу буріння доцільно створити окремий екран «Тренди параметрів», на якому в режимі реального часу відображаються часові залежності основних параметрів. Особливу увагу необхідно приділити трендам крутного моменту (рисунок 4.2), тиску бурового розчину, осьового навантаження, швидкості проходки та рівня загрози. Саме ці параметри є найбільш інформативними для виявлення розвитку прихоплень, обвалів стінок свердловини та зашламування затрубного простору.

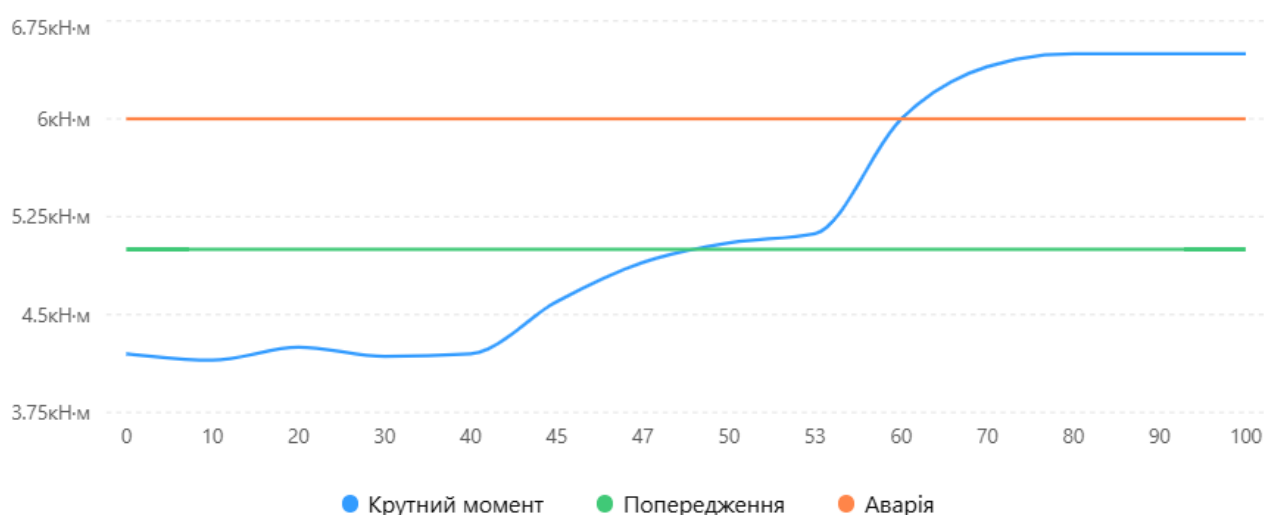


Рисунок 4.2 – Тренд крутного моменту під час розвитку прихоплення КНКБ

Для кожного тренду задаються: назва параметра; одиниці вимірювання; часовий інтервал відображення; мінімальна та максимальна межа шкали; колір кривої; період оновлення; режим архівування; можливість перегляду історичних даних.

Для підвищення інформативності трендів на графіках доцільно відображати аварійні та попереджувальні уставки (рисунок 4.3). Наприклад, для крутного моменту задаються межі попередження та аварії, а для рівня загрози

(y^*) — пороги (0,3), (0,6) та (0,75). Це дозволяє оператору не лише спостерігати поточні значення, а й оцінювати наближення параметрів до небезпечної області.

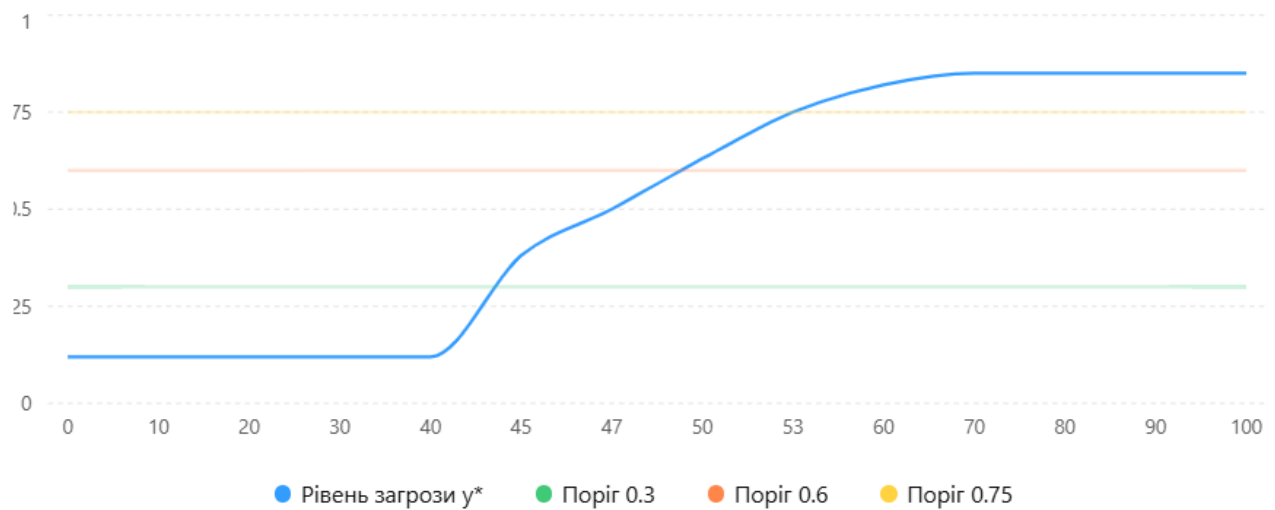


Рисунок 4.3 – Візуалізація нормального, попереджувального та аварійного рівнів загрози

Система аварійної сигналізації реалізується за допомогою механізму Alarm Logging. Для кожного контролюваного параметра створюються попереджувальні та аварійні повідомлення. Попереджувальні повідомлення формуються при виявленні небезпечної тенденції розвитку параметра, а аварійні — при досягненні критичних значень або спрацюванні алгоритму захисту.

Основні типи повідомлень у системі: попередження про зростання крутного моменту; попередження про зростання тиску бурового розчину; попередження про збільшення різниці витрат; аварійний тренд прихоплення КНБК; аварійний тренд обвалу стінок свердловини; втрата сигналу датчика; несправність каналу зв'язку; активація автоматичного захисту; зупинка подачі інструменту; запуск режиму коливально-зворотного руху верхнього привода.

Для кожного аварійного повідомлення задаються умова спрацювання, пріоритет, текст повідомлення, колір індикації, необхідність підтвердження оператором та рекомендована дія. Наприклад, при досягненні рівня загрози ($y^* = 0,5$) формується попередження «Можливий розвиток прихоплення КНБК», а при

($y^* = 0,75$) активується аварійне повідомлення «Аварійний тренд: можливе прихоплення бурильної колони».

Для забезпечення аналізу подій усі повідомлення записуються до журналу аварій. У журналі фіксуються: дата і час виникнення події; назва параметра; фактичне значення; рівень пріоритету; стан повідомлення; час підтвердження оператором; дія, виконана системою або оператором.

Архівування трендів і аварійних подій дозволяє виконувати післяаварійний аналіз, оцінювати ефективність роботи алгоритмів прогнозування та уточнювати порогові значення системи. Це особливо важливо для оптимізації параметрів нечіткої логіки та підвищення точності прогнозування ускладнень.

Для інженера з моніторингу передбачено окремий екран діагностики каналів, де відображається стан усіх аналогових і цифрових входів, якість сигналів, наявність обривів, коротких замикань, помилок зв'язку та стану обміну даними між ПЛК і НМІ. Це дозволяє швидко виявляти несправності апаратної частини системи автоматизації.

Таким чином, реалізована підсистема візуалізації, побудови трендів та аварійної сигналізації забезпечує повний інформаційний супровід процесу буріння. Вона дозволяє оператору своєчасно виявляти небезпечні тенденції, отримувати зрозумілі попередження, аналізувати історію зміни параметрів та контролювати виконання захисних дій системи автоматичного керування.

4.4 Організація промислової мережі для обміну даними (Modbus TCP, OPC UA) між буровою та сервером прогнозування

Для забезпечення роботи системи прогнозування ускладнень процесу буріння необхідно організувати надійний обмін даними між обладнанням бурової установки, програмованим логічним контролером, SCADA/HMI-системою та сервером прогнозування. Передавання технологічної інформації здійснюється через промислову Ethernet-мережу з використанням протоколів Modbus TCP та OPC UA.)([23, 24] (Рисунок 4.4).

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

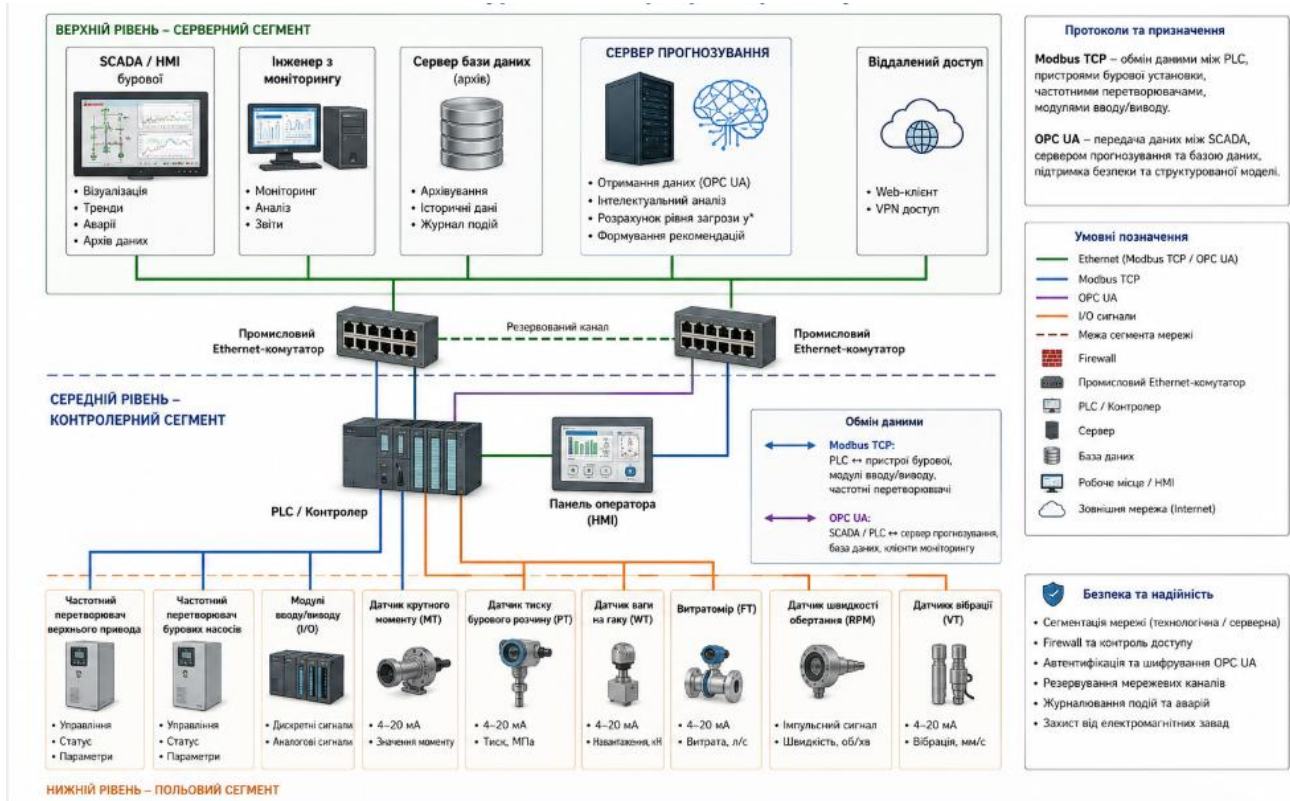


Рисунок 4.4 – Організація промислової мережі для обміну даними між буровою та сервером прогнозування

Основним завданням промислової мережі є передавання в реальному часі вимірних параметрів буріння, результатів попередньої обробки сигналів, аварійних повідомлень та керуючих команд. До таких параметрів належать крутний момент верхнього привода, тиск бурового розчину, осьове навантаження на долото, вага на гаку, витрата бурового розчину, швидкість обертання, швидкість проходки та інтегральний рівень загрози (y^*).

Структура промислової мережі передбачає наявність таких основних вузлів: програмований логічний контролер PLC; панель оператора HMI; SCADA-станція бурової; промисловий Ethernet-комутатор; сервер прогнозування; база даних архівування; віддалене робоче місце інженера з моніторингу.

На нижньому рівні сигнали від датчиків надходять до PLC через модулі аналогового та цифрового вводу. Контролер виконує масштабування, фільтрацію, перевірку достовірності даних і формує набір змінних для передавання у верхній рівень системи.

Протокол Modbus TCP доцільно використовувати для швидкого обміну даними між PLC, частотними перетворювачами, модулями вводу-виводу та локальними пристроями бурової установки. Він забезпечує простий доступ до регістрів пристроїв, у яких зберігаються поточні значення параметрів та команди керування.

Через Modbus TCP можуть передаватися: поточні значення крутного моменту; тиск бурового розчину; витрати (Q_{in}) та (Q_{out}); швидкість обертання верхнього привода; команди пуску, зупинки та обмеження швидкості; сигнали стану частотних перетворювачів; дискретні сигнали аварій та блокувань.

Протокол OPC UA використовується для обміну даними між SCADA-системою, сервером прогнозування та базою даних. Його перевагою є підтримка структурованої моделі даних, механізмів безпеки, автентифікації, шифрування та зручної інтеграції з аналітичними програмними модулями.

Через OPC UA на сервер прогнозування передаються: відфільтровані технологічні параметри; тренди $M(t)$, $P(t)$, $\Delta Q(t)$; інтегральний рівень загрози (y^*); стан алгоритму прогнозування; аварійні та попереджувальні повідомлення; архівні дані для аналізу.

Сервер прогнозування отримує дані від PLC або SCADA, виконує інтелектуальний аналіз, оцінює ризик розвитку ускладнень і повертає у систему керування результат у вигляді сигналу рівня загрози. Якщо значення (y^*) перевищує допустимі межі, SCADA формує попередження оператору, а PLC може автоматично активувати захисні дії.

Для забезпечення надійності промислової мережі необхідно передбачити: використання промислових Ethernet-комутаторів; резервування каналів зв'язку; екрановані кабелі Ethernet; гальванічну розв'язку обладнання; захист від електромагнітних завад; контроль стану мережевих вузлів; журналювання втрати зв'язку; обмеження доступу до налаштувань мережі.

Інформаційна безпека мережі забезпечується розмежуванням прав доступу, використанням паролів, автентифікації користувачів, шифруванням OPC UA-

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

з'єднань та сегментацією мережі на технологічний і серверний рівні. Це запобігає несанкціонованому доступу до параметрів керування буровим обладнанням.

Обмін даними в системі може бути організований за такою логікою [14, 15, 16]: PLC у циклічному режимі зчитує сигнали датчиків, виконує первинну обробку та передає дані до SCADA. SCADA відображає параметри на HMI, архівує їх та передає відфільтровані значення на сервер прогнозування через OPC UA. Сервер прогнозування розраховує рівень загрози та повертає результат у SCADA і PLC. У разі небезпечного режиму PLC активує алгоритм захисту.

Таким чином, використання Modbus TCP та OPC UA дозволяє побудувати гнучку, масштабовану та надійну промислову мережу для обміну даними між буровою установкою та сервером прогнозування. Така архітектура забезпечує оперативний моніторинг процесу буріння, своєчасне виявлення ускладнень і реалізацію автоматичних захисних дій у режимі реального часу.

Висновки до розділу

У четвертому розділі розроблено програмне забезпечення автоматизованої системи прогнозування ускладнень процесу буріння та спроектовано людино-машинний інтерфейс оператора і інженера з моніторингу. Реалізовано структуру прикладного програмного забезпечення контролера, яка забезпечує циклічне опитування датчиків, масштабування аналогових сигналів, перевірку достовірності вимірювань, цифрову фільтрацію та формування первинних діагностичних ознак.

У програмі контролера реалізовано алгоритми експоненційного згладжування, розрахунку трендів технологічних параметрів та формування попереджувальних і аварійних сигналів. Це дозволило підвищити достовірність вимірювань, зменшити вплив шумів і механічних вібрацій, а також забезпечити швидке виявлення небезпечних тенденцій розвитку прихоплень і інших ускладнень процесу буріння.

У середовищі SCADA TIA Portal спроектовано людино-машинний інтерфейс, який включає головну мнемосхему бурової установки, екрани трендів,

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

прогнозування ускладнень, аварійної сигналізації та інженерних налаштувань. Реалізована система візуалізації забезпечує відображення основних технологічних параметрів у реальному часі, побудову трендів, архівування даних та формування попереджувальних повідомлень для оператора-бурильника.

Розроблена підсистема Alarm Logging дозволяє автоматично реєструвати аварійні та попереджувальні події, контролювати рівень загрози розвитку ускладнень та виконувати післяаварійний аналіз роботи системи. Впровадження кольорової індикації, трендових графіків і системи пріоритетів повідомлень підвищує оперативність прийняття рішень та безпеку ведення бурових робіт.

Також у розділі розроблено архітектуру промислової мережі для обміну даними між буровою установкою, PLC-контролером, SCADA-системою та сервером прогнозування із використанням протоколів Modbus TCP та OPC UA. Запропонована структура мережі забезпечує надійне передавання технологічних параметрів, підтримує централізоване архівування інформації та створює умови для інтеграції інтелектуальних алгоритмів прогнозування у режимі реального часу.

У результаті виконання розділу створено комплекс програмних і комунікаційних засобів автоматизованої системи прогнозування ускладнень буріння, що забезпечує підвищення оперативності контролю, достовірності діагностики та ефективності захисту бурильної колони від аварійних ситуацій.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження процесу буріння нафтогазових свердловин та розроблено підходи до удосконалення системи прогнозування ускладнень під час буріння. Виконаний аналіз сучасного стану проблеми показав, що процес буріння є складним багатофакторним об'єктом керування, на який впливають технологічні, геологічні та технічні чинники. Встановлено, що найбільш небезпечними ускладненнями є прихвати бурильної колони, обвали стінок свердловини, втрати циркуляції бурового розчину та диференціальні прихвати, які призводять до значних економічних втрат і зниження ефективності бурових робіт.

Виконано аналіз технологічного процесу буріння, розглянуто основні етапи буріння та досліджено структуру сучасної бурової установки. Проаналізовано основні технологічні параметри процесу буріння, зокрема осьове навантаження на долото, крутний момент, тиск і витрату бурового розчину, швидкість проходки, частоту обертання бурильної колони та рівень вібрацій. Визначено взаємозв'язок між відхиленнями цих параметрів та виникненням аварійних ситуацій. Проведений аналіз існуючих систем моніторингу та прогнозування показав, що традиційні SCADA- та телеметричні системи забезпечують ефективний контроль параметрів, проте мають обмежені можливості щодо раннього прогнозування ускладнень. Обґрунтовано необхідність удосконалення систем прогнозування на основі інтелектуальних методів аналізу даних.

Розроблено математичні моделі технологічних параметрів процесу буріння та виконано аналіз їх динамічних характеристик. Побудовано математичні залежності для опису осьового навантаження, крутного моменту, тиску бурового розчину та механічної швидкості проходки. Проведено аналіз впливу зміни параметрів буріння на стійкість і ефективність роботи бурового обладнання. Розроблені моделі дозволили формалізувати взаємозв'язки між технологічними параметрами та передаварійними станами процесу буріння, що створило основу для подальшої реалізації системи прогнозування.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

Проведено ідентифікацію параметрів процесу буріння та досліджено методи обробки технологічних даних. Проведено аналіз експериментальних і технологічних сигналів, визначено характер зміни основних параметрів буріння в нормальних та аварійних режимах роботи. Розглянуто застосування сучасних методів аналізу даних, зокрема методів статистичної обробки, адаптивної ідентифікації та алгоритмів виявлення аномалій. Отримані результати підтвердили можливість використання комплексного аналізу параметрів буріння для раннього виявлення передаварійних ситуацій та формування прогнозуючих сигналів.

Розроблено структуру автоматизованої системи прогнозування ускладнень процесу буріння. Запропоновано архітектуру системи, яка включає засоби збору технологічної інформації, SCADA-систему, модулі аналізу даних та підсистему формування попереджувальних сигналів. Виконано організацію інформаційного обміну між буровим обладнанням і сервером прогнозування із використанням сучасних промислових протоколів передачі даних. Розроблено алгоритми раннього виявлення ускладнень на основі комплексного аналізу технологічних параметрів. Показано, що використання інтелектуальних алгоритмів дозволяє підвищити точність прогнозування аварійних ситуацій, зменшити ризик виникнення прихватів та обвалів, а також скоротити непродуктивний час буріння.

У результаті виконання роботи досягнуто поставленої мети — удосконалено систему прогнозування ускладнень процесу буріння нафтогазових свердловин шляхом застосування сучасних методів автоматизованого моніторингу, математичного моделювання та інтелектуального аналізу технологічних параметрів. Практичне значення роботи полягає у можливості використання розроблених моделей, алгоритмів і структурних рішень для створення сучасних систем підтримки прийняття рішень на бурових установках та підвищення ефективності й безпеки процесу буріння.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E., Young F. S. Applied Drilling Engineering. – Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1986. – 502 p.
2. Mitchell R. F., Miska S. Z. Fundamentals of Drilling Engineering. – Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2011. – 696 p.
3. Aadnoy B. S., Cooper I., Miska S. Z., Mitchell R. F., Payne M. L. Advanced Drilling and Well Technology. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2009. – 872 p.
4. Rabia H. Oilwell Drilling Engineering: Principles and Practice. – London: Graham & Trotman, 1985. – 322 p.
5. Hossain M. E., Al-Majed A. A. Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering. – Hoboken: Wiley-Scrivener, 2015. – 786 p.
6. Mitchell R. F. Petroleum Engineering Handbook. Vol. II: Drilling Engineering. – Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2006. – 763 p.
7. Bowes C., Procter R. Drillers Stuck Pipe Handbook. – Houston: Schlumberger, 1997. – 76 p.
8. Aadnoy B. S., Looyeh R. – Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design. 2nd ed. Amsterdam: Gulf Professional Publishing, 2019. – 460 p.
9. Moore P. L. Drilling Practices Manual. 2nd ed. – Tulsa: PennWell Books, 1986. – 588 p.
10. Bourgoyne A. T., Young F. S. A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection. Society of Petroleum Engineers Journal. 1974. Vol. 14, No. 4. P. 371–384.
11. Синєглазов В. М., Бурлака О. В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв: навчальний посібник. – Київ: НАУ, 2013. – 444 с.
12. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. – Київ: Ліра-К, 2011. – 552 с.
13. Boyer S. A. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. 4th ed. Research Triangle Park: ISA, 2010. – 257 p.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

14. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York: Springer, 2006. – 738 p.
15. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – Cambridge: MIT Press, 2016. – 800 p.
16. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. – Anomaly detection: A survey. ACM Computing Surveys. 2009. Vol. 41, No. 3. P. 1–58.
17. Ljung L. System Identification: Theory for the User. 2nd ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. – 609 p.
18. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13th ed. – Boston: Pearson, 2017. – 1032 p.
19. Franklin G. F., Powell J. D., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. 8th ed. – New York: Pearson, 2019. – 880 p.
20. Söderström T., Stoica P. System Identification. – New York: Prentice Hall, 1989. – 612 p.
21. Nelles O. Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models. – Berlin: Springer, 2001. – 785 p.
22. Montgomery D. C., Runger G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 7th ed. – Hoboken: Wiley, 2018. – 688 p.
23. OPC Foundation. OPC Unified Architecture Specification. Release 1.05. Scottsdale: OPC Foundation, – 2022.
24. Modbus Organization. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. – North Grafton: Modbus Organization, 2012. – 50 p.
25. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers — Part 3: Programming languages. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013.

					БР.АКПз – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

ДОДАТКИ

Додаток А

```
clc; clear; close all;

model = 'Drilling_Prediction_FULLL';

if bdlIsLoaded(model)

    close_system(model,0);

end

new_system(model);

open_system(model);

set_param(model,'StopTime','180');

set_param(model,'Solver','ode4');

set_param(model,'FixedStep','0.1');

%% Вхідні сигнали

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/omega_set = 120 rpm'],...
    'Value','120','Position',[30 80 100 110]);

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/V_in = 0.015 m_s'],...
    'Value','0.015','Position',[30 170 100 200]);

add_block('simulink/Sources/Clock',[model '/Time'],...
    'Position',[30 270 100 300]);

%% Формування тренду прихоплення

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/t_180'],...
    'Gain','1/180','Position',[150 260 220 310]);

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Torque growth 25 percent'],...
    'Gain','0.25','Position',[270 220 370 250]);

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Pressure growth 15 percent'],...
    'Gain','0.15','Position',[270 320 370 350]);

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/1'],...
    'Value','1','Position',[410 180 450 210]);

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/1_2'],...
    'Value','1','Position',[410 380 450 410]);

add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/1 + 0.25t'],...
    'Inputs','++','Position',[500 210 540 250]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/1 + 0.15t'],...  
    'Inputs','++','Position',[500 320 540 360]);
```

%% Номінальні значення моменту і тиску

```
add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/M0 = 20 kNm'],...
```

```
    'Value','20','Position',[590 160 670 190]);
```

```
add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/P0 = 12 MPa'],...
```

```
    'Value','12','Position',[590 390 670 420]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Product',[model '/Torque ideal M'],...
```

```
    'Position',[730 200 780 250]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Product',[model '/Pressure ideal P'],...
```

```
    'Position',[730 320 780 370]);
```

%% Генератор шуму і пульсацій

```
add_block('simulink/Sources/Random Number',[model '/White noise torque'],...
```

```
    'Mean','0','Variance','0.09','SampleTime','0.1',...
```

```
    'Position',[830 120 930 150]);
```

```
add_block('simulink/Sources/Random Number',[model '/White noise pressure'],...
```

```
    'Mean','0','Variance','0.0025','SampleTime','0.1',...
```

```
    'Position',[830 430 930 460]);
```

```
add_block('simulink/Sources/Sine Wave',[model '/Pump pulsation 2.5 Hz'],...
```

```
    'Amplitude','1','Frequency','2*pi*2.5',...
```

```
    'Position',[830 260 940 290]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Pulsation to torque'],...
```

```
    'Gain','0.25','Position',[980 230 1050 260]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Pulsation to pressure'],...
```

```
    'Gain','0.15','Position',[980 330 1050 360]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Measured torque M'],...
```

```
    'Inputs','+++','Position',[1100 190 1140 250]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Measured pressure P'],...
```

```
    'Inputs','+++','Position',[1100 320 1140 380]);
```

%% Фільтрація сигналів

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/LPF torque'],...
```

```

'Numerator','[1]','Denominator','[5 1]',...
'Position',[1210 200 1320 240]);
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/LPF pressure'],...
'Numerator','[1]','Denominator','[5 1]',...
'Position',[1210 330 1320 370]);

%% Аналіз трендів
add_block('simulink/Continuous/Derivative',[model '/dM_dt'],...
'Position',[1380 200 1440 240]);
add_block('simulink/Continuous/Derivative',[model '/dP_dt'],...
'Position',[1380 330 1440 370]);
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Normalize torque trend'],...
'Gain','20','Position',[1500 200 1590 240]);
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Normalize pressure trend'],...
'Gain','50','Position',[1500 330 1590 370]);
add_block('simulink/Discontinuities/Saturation',[model '/Limit SM 0..1'],...
'LowerLimit','0','UpperLimit','1',...
'Position',[1640 200 1720 240]);
add_block('simulink/Discontinuities/Saturation',[model '/Limit SP 0..1'],...
'LowerLimit','0','UpperLimit','1',...
'Position',[1640 330 1720 370]);

%% Нечітка логіка у спрощеному вигляді
add_block('simulink/Math Operations/Product',[model '/Fuzzy rule AND'],...
'Position',[1790 250 1840 320]);
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Risk gain'],...
'Gain','0.65','Position',[1900 260 1970 300]);
add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/Base risk 0.2'],...
'Value','0.2','Position',[1900 350 1970 380]);
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Risk y'],...
'Inputs','++','Position',[2030 285 2070 325]);
add_block('simulink/Discontinuities/Saturation',[model '/Risk 0..1'],...
'LowerLimit','0','UpperLimit','1',...
'Position',[2120 285 2200 325]);

```

%% Візуалізація

```
add_block('simulink/Signal Routing/Mux',[model '/Mux'],...
    'Inputs','3','Position',[2260 230 2290 350]);
add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope M P Risk'],...
    'Position',[2360 260 2420 320]);
```

%% З'єднання

```
add_line(model,'Time/1','t_180/1');
add_line(model,'t_180/1','Torque growth 25 percent/1');
add_line(model,'t_180/1','Pressure growth 15 percent/1');
add_line(model,'1/1','1 + 0.25t/1');
add_line(model,'Torque growth 25 percent/1','1 + 0.25t/2');
add_line(model,'1_2/1','1 + 0.15t/1');
add_line(model,'Pressure growth 15 percent/1','1 + 0.15t/2');
add_line(model,'M0 = 20 kNm/1','Torque ideal M/1');
add_line(model,'1 + 0.25t/1','Torque ideal M/2');
add_line(model,'P0 = 12 MPa/1','Pressure ideal P/1');
add_line(model,'1 + 0.15t/1','Pressure ideal P/2');
add_line(model,'Pump pulsation 2.5 Hz/1','Pulsation to torque/1');
add_line(model,'Pump pulsation 2.5 Hz/1','Pulsation to pressure/1');
add_line(model,'Torque ideal M/1','Measured torque M/1');
add_line(model,'White noise torque/1','Measured torque M/2');
add_line(model,'Pulsation to torque/1','Measured torque M/3');
add_line(model,'Pressure ideal P/1','Measured pressure P/1');
add_line(model,'White noise pressure/1','Measured pressure P/2');
add_line(model,'Pulsation to pressure/1','Measured pressure P/3');
add_line(model,'Measured torque M/1','LPF torque/1');
add_line(model,'Measured pressure P/1','LPF pressure/1');
add_line(model,'LPF torque/1','dM_dt/1');
add_line(model,'LPF pressure/1','dP_dt/1');
add_line(model,'dM_dt/1','Normalize torque trend/1');
add_line(model,'dP_dt/1','Normalize pressure trend/1');
```

```
add_line(model,'Normalize torque trend/1','Limit SM 0..1/1');
add_line(model,'Normalize pressure trend/1','Limit SP 0..1/1');
add_line(model,'Limit SM 0..1/1','Fuzzy rule AND/1');
add_line(model,'Limit SP 0..1/1','Fuzzy rule AND/2');
add_line(model,'Fuzzy rule AND/1','Risk gain/1');
add_line(model,'Risk gain/1','Risk y/1');
add_line(model,'Base risk 0.2/1','Risk y/2');
add_line(model,'Risk y/1','Risk 0..1/1');
add_line(model,'LPF torque/1','Mux/1');
add_line(model,'LPF pressure/1','Mux/2');
add_line(model,'Risk 0..1/1','Mux/3');
add_line(model,'Mux/1','Scope M P Risk/1');

save_system(model);

disp('Готово: створено розгорнуту модель Drilling_Prediction_FULL.slx');
```

ДОДАТОК Б

SIMULINK-Модель

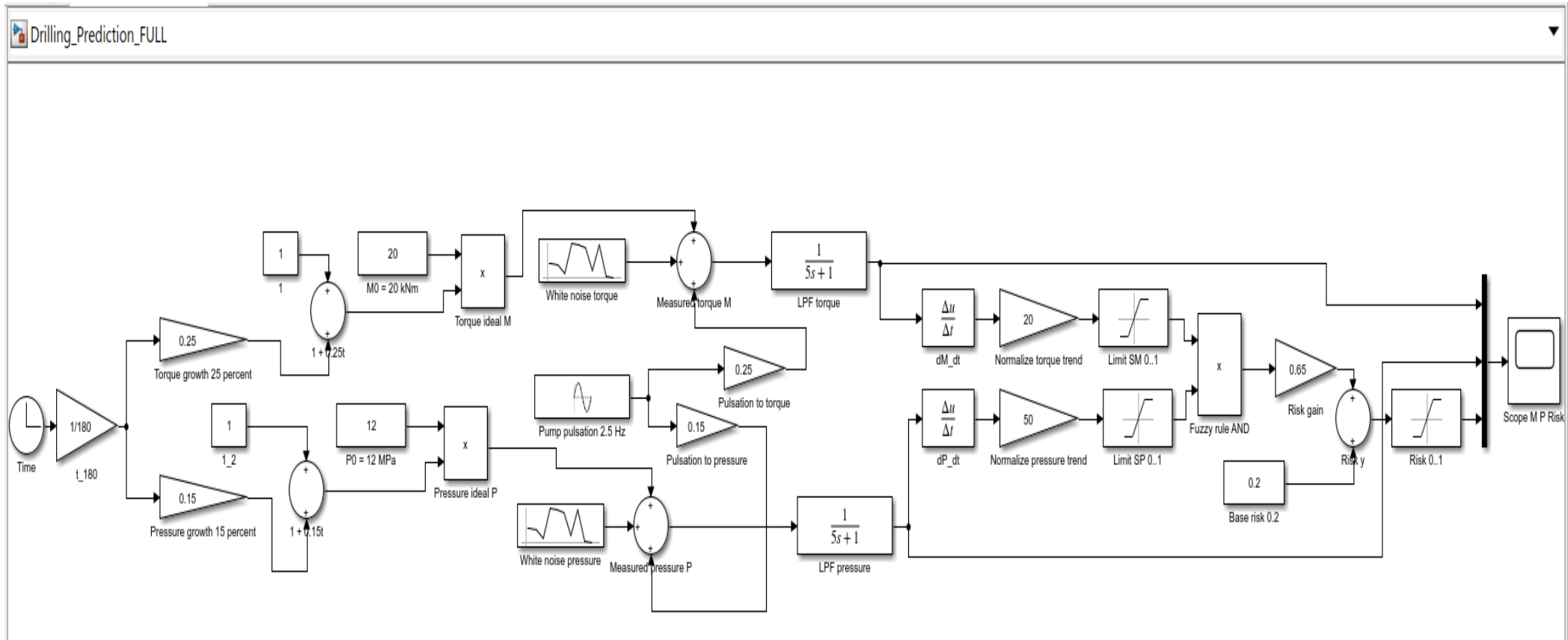


Рисунок Б1 - Комплексна імітаційна модель процесу буріння в програмному середовищі MATLAB / Simulink