

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

Фридрих Богдана Ігорівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.51:519.87:622.24

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Ідентифікація та моделювання технологічних параметрів буріння для задач

(назва роботи)

автоматичного керування

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

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

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1 Б.І.Фридрих
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

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

Рецензент

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

Допущено до захисту Завідувач кафедри

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І.Лагойда

202__ року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Фридрик Богдані Ігорівній

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Ідентифікація та моделювання технологічних параметрів
буріння для задач автоматичного керування

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

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

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

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2026

3. Вихідні дані до роботи матеріали практики, технологічний регламент

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

4.1. Аналіз процесу буріння як об'єкта автоматичного керування

4.2. Математичне моделювання технологічних параметрів процесу буріння

4.3. Ідентифікація параметрів буріння в режимі реального часу

4.4 Розробка системи автоматичного керування

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

БР. АКП – 15.00.00.000.01– Технологічний процес буріння нафтогазової
свердловини

БР. АКП – 15.00.00.000.02 – Основні технологічні параметри процесу буріння

БР. АКП – 15.00.00.000.03 – ММ технологічних параметрів процесу буріння

БР. АКП – 15.00.00.000.04 – Ідентифікація параметрів буріння

БР. АКП – 15.00.00.000.05 – Структурна схема САК з нейро-ідентифікатором

БР. АКП – 15.00.00.000.06 – Функціональна схема автоматизації

БР. АКП – 15.00.00.000.07 – Дослідження САК в ПП Matlab

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 процесу буріння як об'єкта автоматичного керування	08.05.2026 р.	Виконано
2	Математичне моделювання технологічних параметрів процесу буріння	22.05.2026 р.	Виконано
3	Ідентифікація параметрів буріння в режимі реального часу	30.05.2026р.	Виконано
4	Розробка системи автоматичного керування	05.06.2026 р.	Виконано
5	Висновки по роботі	12.06.2026 р.	Виконано

Студентка _____
(підпис)

Б.І. Фридрих _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М.В.Шавранський _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 68 сторінок друкованого тексту, 15 рисунків, 3 таблиці, 28 переліків посилань на джерела і 8 додатків.

Тема: «Ідентифікація та моделювання технологічних параметрів буріння для задач автоматичного керування»

Об'єкт дослідження: процес буріння нафтогазових свердловин та взаємозв'язки між його основними технологічними параметрами (осьовим навантаженням на долото, крутним моментом, швидкістю обертання бурильної колони, механічною швидкістю проходки та тиском бурового розчину) в умовах автоматизованого керування.

Мета проекту: дослідження, ідентифікація та моделювання технологічних параметрів процесу буріння нафтогазових свердловин з метою створення адекватної математичної моделі об'єкта керування та підвищення ефективності функціонування автоматизованих систем керування процесом буріння.

Методи дослідження: методи теорії автоматичного керування, математичного та комп'ютерного моделювання, ідентифікації динамічних систем, системного аналізу технологічних процесів, статистичної обробки експериментальних даних, а також методи чисельного моделювання та імітаційного дослідження у середовищі MATLAB / Simulink.

Результати кваліфікаційної роботи: розглянуто питання ідентифікації та математичного моделювання технологічних параметрів процесу буріння нафтогазових свердловин для задач автоматичного керування. Проведено аналіз сучасних методів автоматизації буріння, досліджено основні технологічні параметри та побудовано математичні моделі процесу на основі методів ідентифікації динамічних систем із використанням передавальних функцій і моделей у просторі станів. На основі отриманих результатів запропоновано структуру системи автоматичного керування, яка забезпечує підвищення точності регулювання, зниження ризику аварійних ситуацій та покращення енергоефективності бурових операцій.

Ключові слова: автоматизація технологічних процесів буріння свердловин, математичне моделювання, ідентифікація систем, автоматичне керування, технологічні параметри, передавальна функція, динамічна система, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 69 pages of printed text, 15 figures, 3 tables, 28 lists of references to sources and 8 appendices.

Topic: "Identification and modeling of drilling technological parameters for automatic control tasks"

Object of research: the process of drilling oil and gas wells and the relationships between its main technological parameters (axial load on the bit, torque, drill string rotation speed, mechanical penetration rate and drilling fluid pressure) under automated control conditions.

Project purpose: research, identification and modeling of technological parameters of the drilling process of oil and gas wells in order to create an adequate mathematical model of the control object and increase the efficiency of the functioning of automated drilling process control systems.

Research methods: methods of automatic control theory, mathematical and computer modeling, identification of dynamic systems, system analysis of technological processes, statistical processing of experimental data, as well as methods of numerical modeling and simulation research in the MATLAB / Simulink environment.

Results of the qualification work: the issue of identification and mathematical modeling of technological parameters of the drilling process of oil and gas wells for automatic control tasks was considered. An analysis of modern drilling automation methods was conducted, the main technological parameters were investigated and mathematical models of the process were built based on methods of identification of dynamic systems using transfer functions and models in the state space. Based on the results obtained, a structure of the automatic control system was proposed, which provides increased control accuracy, reduced risk of emergency situations and improved energy efficiency of drilling operations.

Keywords: automation of technological processes of well drilling, mathematical modeling, system identification, automatic control, technological parameters, transfer function, dynamic system, MATLAB / Simulink.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	13
1.1 Загальна характеристика процесу буріння нафтогазових свердловин.....	13
1.2 Основні технологічні параметри процесу буріння свердловин.....	15
1.3 Аналіз факторів, що впливають на процес буріння.....	18
1.4 Особливості буріння як нелінійного динамічного об’єкта.....	21
1.5 Огляд сучасних систем автоматичного керування бурінням.....	25
1.6 Постановка задачі ідентифікації та моделювання.....	29
Висновки до розділу.....	30
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ.....	32
2.1 Вибір та обґрунтування математичної моделі механічної швидкості.....	32
2.2 Математичний опис взаємодії долота з вибоєм свердловини.....	34
2.3 Моделювання динамічних характеристик бурильної колони як ланки системи керування.....	36
2.4 Аналіз моделі на чутливість до зміни зовнішніх збурень.....	40
Висновки до розділу	41
3 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ.....	43
3.1 Постановка задачі ідентифікації: оцінка невідомих коефіцієнтів моделі за даними вимірювань.....	43
3.2 Методи фільтрації сигналів від шумів та вібрацій.....	45
3.3 Розробка алгоритму ідентифікації параметрів буріння.....	47
3.4 Адаптивні підходи до уточнення моделі при зміні літології розрізу.....	49

					БР.АКП - 15.00.00.000 ПЗ						
Змн.	Лист	№ докумен.	Підпис	Дата	Ідентифікація та моделювання технологічних параметрів буріння для задач автоматичного керування			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.	Фридрих Б.І.										
Перевір.	Шавранський М.В								6	68	
Реценз.	Зварич Г.Г.							АКП-22-1, ІФНТУНГ			
Н. Контр.	Кучмистенко О.В										
Затверд.	Лагойда А.І.										

Висновки до розділу.....	51
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	53
4.1 Розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА) процесу буріння.....	53
4.2 Структурна схема замкненої САК з нейро-ідентифікатором.....	55
4.3 Моделювання роботи САК у середовищі MATLAB/Simulink.....	57
4.4 Дослідження якості регулювання: перехідні процеси, стійкість та точність.....	61
Висновки до розділу	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	67
ДОДАТКИ.....	69

					БР. АКП - 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

PLC – програмований логічний контролер

АСК – адаптивні системи керування

БК – бурильна колона

БР – буровий розчин

ІСК – інтелектуальні системи керування

ММ – математичне моделювання

ПП – програмний продукт

ПФ – передавальна функція

САК – система автоматичного керування

ТАК – теорія автоматичного керування

ФСА – функціональна схема автоматизації

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

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку нафтогазової галузі характеризується виснаженням легкодоступних родовищ, що змушує компанії переходити до освоєння глибоких горизонтів, буріння свердловин зі складною просторовою траєкторією (горизонтальних, багатовибийних) та роботи в умовах невизначеності геолого-технічних факторів. У таких умовах традиційні підходи до керування процесом буріння, що базуються на суб'єктивному досвіді оператора (бурильника), вже не забезпечують необхідного рівня ефективності, безпеки та економічності.

Процес буріння є складною, динамічною, багатозв'язною системою, що функціонує в умовах обмеженого обсягу апіорної інформації. Головна складність полягає в тому, що ключові показники ефективності руйнування гірської породи (наприклад, механічна швидкість проходки, знос долота, крутний момент на вибої) не завжди можуть бути виміряні безпосередньо в режимі реального часу через затримку сигналу, агресивне середовище та технічні обмеження каналів зв'язку. Це зумовлює необхідність застосування методів ідентифікації та математичного моделювання, які дозволяють оцінювати стан об'єкта за непрямими вимірюваннями на поверхні.

Несвоєчасне виявлення критичних режимів (прихоплення інструменту, автоколивання, диференційне прихоплення, газонафтоводопрояви) призводить до масштабних фінансових втрат. Автоматичне розпізнавання передаварійних ситуацій можливе лише на основі точних динамічних моделей.

Автоматизоване керування режимами буріння (осьовим навантаженням та частотою обертання) дозволяє максимізувати швидкість проходки за мінімального зносу бурового інструменту та енерговитрат.

Сучасні бурові установки оснащені великою кількістю датчиків (Big Data), проте ефективне використання цих даних для автоматичного прийняття рішень стримується відсутністю адаптивних математичних моделей, які здатні підлаштовуватися під зміну властивостей гірських порід безпосередньо в процесі поглиблення свердловини.

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

Створення ефективних систем автоматичного керування (САК) процесом буріння неможливе без адекватної математичної моделі об'єкта. Оскільки бурова колона та вибій постійно змінюють свої характеристики (зміна довжини інструменту, твердості пласта, властивостей промивальної рідини), моделі повинні бути не статичними, адаптивними. Розробка алгоритмів ідентифікації параметрів у реальному часі є тим містком, який дозволяє САК оперативно реагувати на збурення та підтримувати оптимальний режим роботи.

Таким чином, актуальність теми дослідження зумовлена об'єктивною потребою нафтогазової промисловості у підвищенні техніко-економічної ефективності та безпеки буріння шляхом створення високоточних систем автоматичного керування, що базуються на сучасних методах ідентифікації та динамічного моделювання технологічних параметрів.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Процес буріння нафтогазових свердловин є складним багатопараметричним технологічним процесом, ефективність якого значною мірою залежить від точності контролю та регулювання основних технологічних параметрів. У сучасних умовах експлуатації бурового обладнання зростають вимоги до швидкості проходки, енергоефективності, безпеки виконання робіт та мінімізації аварійних ситуацій, що потребує впровадження сучасних автоматизованих систем керування.

Традиційні методи керування процесом буріння часто не забезпечують необхідної точності регулювання через нелінійний характер процесу, наявність випадкових збурень, зміну геологічних умов та складну взаємодію між технологічними параметрами. Саме тому актуальним є застосування методів ідентифікації та математичного моделювання, які дозволяють створити адекватні моделі об'єкта керування та дослідити його динамічні характеристики.

Вибір теми дослідження зумовлений необхідністю розробки сучасних підходів до автоматичного керування процесом буріння на основі математичних моделей, що враховують реальні умови функціонування бурових систем. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності

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

бурових операцій, зниження ризику виникнення ускладнень і аварій, а також удосконалення систем автоматизації в нафтогазовій галузі.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка математичних моделей та методів ідентифікації технологічних параметрів процесу буріння нафтогазових свердловин для підвищення ефективності автоматичного керування, стабілізації режимів буріння та зниження ризику виникнення технологічних ускладнень.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз сучасних методів автоматизації процесу буріння та дослідити основні технологічні параметри, що впливають на ефективність роботи бурового обладнання. У роботі передбачається виконати ідентифікацію параметрів процесу буріння та розробити математичні моделі об'єкта керування з використанням передавальних функцій і моделей у просторі станів. Також необхідно дослідити динамічні характеристики системи та оцінити вплив технологічних параметрів на якість автоматичного керування. На основі отриманих результатів планується запропонувати структуру системи автоматичного керування процесом буріння та перевірити її ефективність шляхом комп'ютерного моделювання.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та розв'язання визначених наукових і практичних задач у роботі використано комплексний підхід, який базується на поєднанні фундаментальних положень класичної науки та сучасних цифрових технологій, а саме:

- Методи системного аналізу та декомпозиції складних систем – застосовано для дослідження технологічного процесу буріння як багатозв'язного об'єкта автоматичного керування, виокремлення його вхідних, вихідних параметрів та аналізу каналів поширення зовнішніх і внутрішніх збурень.
- Методи теорії ідентифікації систем (параметричної та непараметричної) – покладено в основу розробки алгоритмів оцінювання невідомих та змінних у часі технологічних параметрів (зокрема, коефіцієнта ефективності руйнування породи, жорсткості вибою) за непрямыми вимірюваннями на поверхні в режимі реального часу.

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

- Методи теорії автоматичного керування (ТАК) – використано для аналізу стійкості, керованості та спостережливості розроблених динамічних моделей, а також для синтезу адаптивних та робастних регуляторів (зокрема, алгоритмів із прогнозуванням моделей – MPC), здатних функціонувати в умовах параметричної невизначеності.
- Чисельні методи та імітаційне комп'ютерне моделювання (у програмному середовищі MATLAB/Simulink – застосовано для реалізації алгоритмів ідентифікації, проведення віртуальних експериментів та верифікації працездатності розробленої системи автоматичного керування у різних технологічних режимах.

Структура та обсяг бакалаврської роботи. Бакалаврська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань на джерела з 28 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 68 сторінок, у тому числі 3 таблиці, 15 рисунків і 8 додатків.

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

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Загальна характеристика процесу буріння нафтогазових свердловин

Процес буріння нафтогазових свердловин є складним багатопараметричним технологічним процесом, метою якого є створення - глибокого циліндричного каналу в гірських породах для подальшого видобутку нафти або природного газу [1-4]. Буріння здійснюється шляхом руйнування породи буровим долотом під дією механічного навантаження та обертального руху з одночасним очищенням вибою свердловини буровим розчином.

Сучасна бурова установка це комплекс взаємопов'язаного механічного, гідравлічного, електротехнічного та автоматизованого обладнання, що забезпечує виконання технологічних операцій буріння (рисунк 1.1).

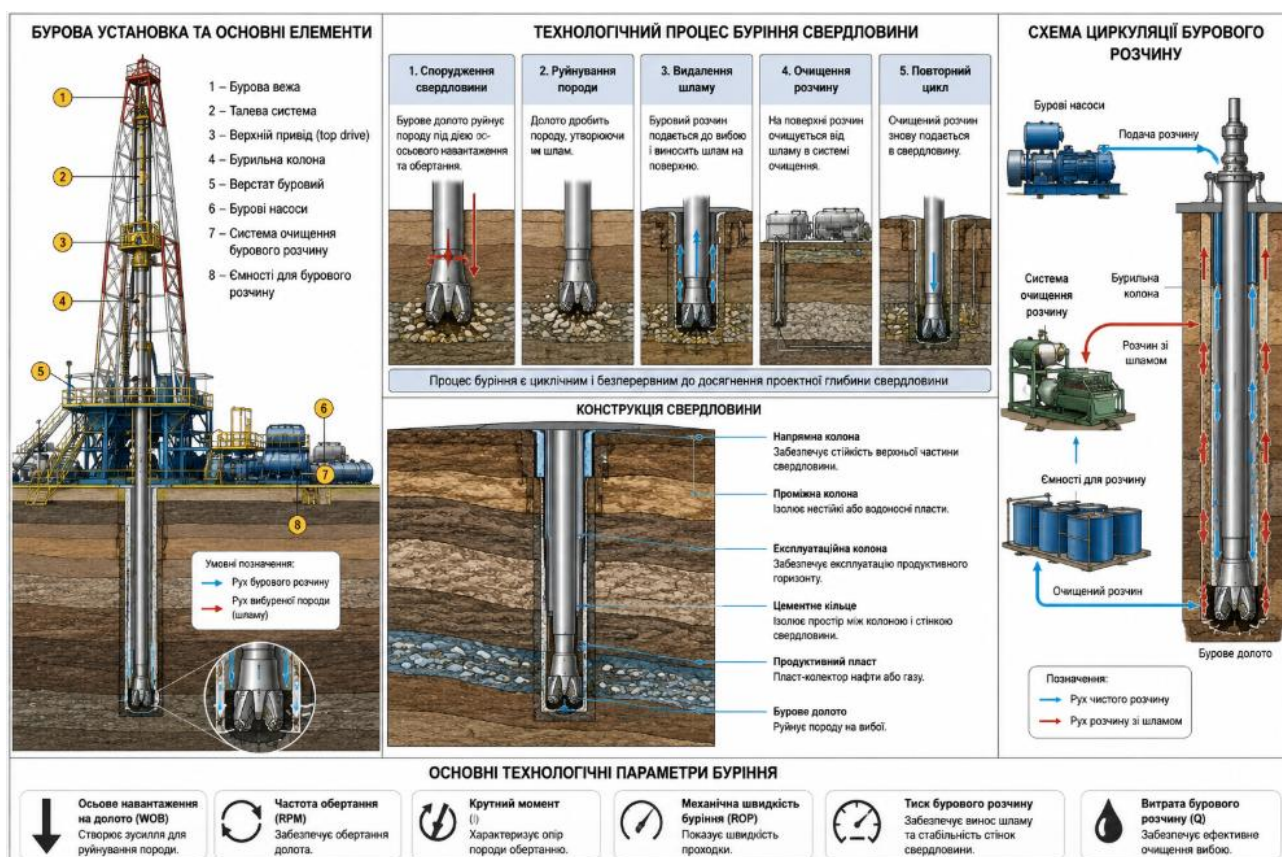


Рисунок 1.1 - Технологічний процес буріння нафтогазової свердловини

До основних елементів бурової установки належать: бурова вежа; талева система; бурильна колона; верхній привід або ротор; бурові насоси; система циркуляції бурового розчину; контрольно-вимірювальні прилади та системи автоматизації.

Технологічний процес буріння характеризується значною складністю через зміну фізико-механічних властивостей гірських порід, наявність випадкових збурень, нелінійність динамічних процесів та вплив великої кількості взаємозалежних параметрів. Основними технологічними параметрами буріння є:

- осьове навантаження на долото (Weight on Bit — WOB);
- частота обертання бурильної колони (RPM);
- крутний момент;
- механічна швидкість буріння (Rate of Penetration — ROP);
- тиск і витрата бурового розчину;
- температура та вібраційні характеристики системи.

Ефективність процесу буріння значною мірою залежить від правильного вибору та підтримання оптимальних режимів роботи бурового обладнання. Недостатнє або надмірне осьове навантаження, нестабільна частота обертання чи порушення циркуляції бурового розчину можуть призвести до зниження швидкості проходки, підвищеного зношування долота, аварійних ситуацій або прихоплення бурильного інструменту.

Процес буріння належить до складних динамічних об'єктів автоматичного керування [5, 6]. Для нього характерні: нелінійність; багатоканальність; інерційність; наявність транспортного запізнення; невизначеність параметрів; дія зовнішніх збурень.

У зв'язку з цим застосування сучасних систем автоматичного керування та методів математичного моделювання є необхідною умовою забезпечення стабільної та безпечної роботи бурового обладнання. Використання систем автоматизації дозволяє підвищити точність підтримання технологічних параметрів, зменшити енергетичні витрати, покращити якість керування процесом буріння та знизити ризик виникнення аварійних ситуацій.

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

Одним із важливих етапів побудови систем автоматичного керування є ідентифікація параметрів процесу буріння та створення адекватної математичної моделі об'єкта керування. Отримані моделі використовуються для аналізу динамічних властивостей системи, синтезу регуляторів, прогнозування поведінки процесу та оптимізації режимів буріння.

1.2 Основні технологічні параметри процесу буріння свердловин

Ефективність процесу буріння нафтогазових свердловин значною мірою залежить від правильного контролю та регулювання основних технологічних параметрів. Ці параметри визначають режим роботи бурового обладнання, швидкість проходки свердловини, енергетичні витрати та безпечність виконання бурових робіт. Основні технологічні параметри процесу буріння (див.п.1.1) тісно взаємопов'язані між собою та суттєво впливають на динаміку процесу [2, 4].

1.2.1 Осьове навантаження на долото (Weight on Bit — WOB)

Осьове навантаження на долото є одним із головних параметрів буріння та характеризує силу, з якою бурильна колона тисне на бурове долото. Від величини WOB залежить інтенсивність руйнування гірської породи та механічна швидкість буріння.

При недостатньому навантаженні знижується ефективність руйнування породи, а при надмірному – виникає підвищене зношування долота, вібрації та ризик аварійних ситуацій.

Основні функції WOB: забезпечення руйнування породи; стабілізація процесу буріння; підвищення швидкості проходки; зменшення часу буріння свердловини.

Типові значення WOB для глибокого буріння можуть становити від 50 до 300 кН залежно від типу долота та геологічних умов.

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

1.2.2 Частота обертання бурильної колони (Revolutions Per Minute — RPM)

Частота обертання визначає кількість обертів бурового інструменту за одиницю часу та забезпечує механічне руйнування породи різальними елементами долота.

RPM суттєво впливає на: ефективність руйнування породи; стабільність роботи бурильної колони; величину крутного моменту; інтенсивність вібрацій.

Зі збільшенням частоти обертання зростає швидкість буріння, однак надмірні значення RPM можуть спричиняти коливання бурильної колони, явища stick-slip та прискорене зношування обладнання.

Для різних режимів буріння частота обертання може змінюватися в межах 60 – 250 об/хв.

1.2.3 Крутний момент

Крутний момент характеризує опір гірської породи обертанню бурового долота та є важливим показником навантаження на привід бурової установки.

Зростання крутного моменту може свідчити про: ускладнення процесу буріння; підвищення твердості порід; зношування долота; можливість прихоплення бурильної колони.

Контроль крутного моменту дозволяє своєчасно виявляти аварійні режими та підтримувати оптимальні параметри буріння. Крутний момент вимірюється у Н·м або кН·м.

1.2.4 Механічна швидкість буріння (Rate of Penetration — ROP)

Механічна швидкість буріння визначає швидкість поглиблення свердловини та є одним із головних показників ефективності бурових робіт.

ROP залежить від: осьового навантаження; частоти обертання; властивостей породи; параметрів бурового розчину; технічного стану долота.

Для оцінки ефективності буріння часто використовують залежність [4-6]:

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

$$ROP = \frac{\Delta H}{\Delta t}$$

де:

ΔH – приріст глибини свердловини;

Δt – час буріння.

Підвищення ROP дозволяє скоротити тривалість буріння та зменшити економічні витрати.

1.2.5 Тиск бурового розчину

Тиск бурового розчину є важливим параметром гідравлічної системи буріння. Він забезпечує [1-3]: очищення вибою від шламу; охолодження долота; підтримання стійкості стінок свердловини; запобігання газонафтоводопроявам.

Недостатній тиск може призвести до накопичення шламу на вибої, а надмірний – до гідророзриву пластів та втрати бурового розчину. Тиск контролюється буровими насосами та системою циркуляції.

1.2.6 Витрата промивальної рідини

Витрата бурового розчину визначає кількість промивальної рідини, що подається в свердловину за одиницю часу.

Основні функції бурового розчину [1-3]: винесення вибуреної породи; охолодження бурового інструменту; стабілізація стінок свердловини; передавання гідравлічної енергії.

Недостатня витрата призводить до погіршення очищення вибою та ризику прихоплення інструменту, тоді як надмірна витрата збільшує енергетичні витрати та навантаження на насосне обладнання. Витрата зазвичай вимірюється у л/с або м³/год.

Таким чином, основні технологічні параметри буріння є взаємозалежними величинами (таблиця 1.1), які визначають ефективність, надійність та безпечність процесу буріння свердловин. Для забезпечення оптимальних режимів роботи

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

необхідне постійне автоматичне вимірювання, аналіз та регулювання цих параметрів у реальному часі.

Таблиця 1.1 – Основні технологічні параметри процесу буріння свердловин

Параметр	Позначення	Характеристика параметра	Основний вплив на процес буріння	Одиниці вимірювання
Осьове навантаження на долото	WOB (Weight on Bit), F	Сила, з якою бурильна колона тисне на долото	Визначає інтенсивність руйнування породи та механічну швидкість буріння	кН
Частота обертання бурильної колони	RPM (Revolutions Per Minute), n	Кількість обертів бурового інструменту за одиницю часу	Впливає на швидкість буріння, крутний момент і рівень вібрацій	об/хв
Крутний момент	M	Характеризує опір породи обертанню долота	Дозволяє оцінювати навантаження на привід та стан буріння	Н·м, кН·м
Механічна швидкість буріння	ROP (Rate of Penetration), v	Швидкість поглиблення свердловини	Є основним показником ефективності буріння	м/год
Тиск бурового розчину	P	Тиск у системі циркуляції бурового розчину	Забезпечує очищення вибою та стабілізацію стінок свердловини	МПа
Витрата промивальної рідини	Q	Кількість бурового розчину, що подається у свердловину за одиницю часу	Впливає на винесення шламу та охолодження долота	л/с, м³/год

1.3 Аналіз факторів, що впливають на процес буріння

Процес буріння нафтогазових свердловин характеризується значною складністю та залежить від великої кількості взаємопов'язаних факторів. Ці фактори впливають на стабільність роботи бурового обладнання, механічну швидкість буріння, енергетичні витрати, довговічність бурового інструменту та безпечність проведення бурових робіт. Аналіз факторів, що впливають на процес

буріння, є важливим етапом під час побудови систем автоматичного керування та математичних моделей об'єкта.

Усі фактори, що впливають на процес буріння, можна поділити на геологічні, технологічні, гідравлічні, механічні та зовнішні [1, 2, 5].

1.3.1 Геологічні фактори

Геологічні умови є одним із найважливіших чинників, які визначають режим буріння свердловини. Властивості гірських порід безпосередньо впливають на механічну швидкість буріння, навантаження на бурове обладнання та характер динамічних процесів.

До основних геологічних факторів належать [1-3]: твердість і міцність порід; абразивність гірських порід; неоднорідність геологічного розрізу; пластовий тиск; наявність тріщин та порожнин; температура пластів.

При переході від м'яких до твердих порід зростають осьове навантаження на долото та крутний момент, а механічна швидкість буріння зменшується. Неоднорідність порід викликає зміну динамічних характеристик системи та ускладнює підтримання стабільного режиму буріння.

1.3.2 Технологічні фактори

Технологічні параметри визначають ефективність руйнування породи та продуктивність буріння.

Основними технологічними факторами є [1-3]: осьове навантаження на долото (WOB); частота обертання бурильної колони (RPM); тип і конструкція долота; режим буріння; параметри системи автоматичного керування.

Залежність механічної швидкості буріння від осьового навантаження та частоти обертання має складний нелінійний характер.

Для спрощеного опису впливу *WOB* та *RPM* часто використовують співвідношення:

$$ROP = f(WOB, RPM)$$

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

Неправильний вибір режимів буріння може призвести до: перевантаження бурильної колони; виникнення вібрацій; підвищеного зношування долота; аварійних ситуацій.

1.3.3 Гідравлічні фактори

Важливу роль у процесі буріння відіграє система циркуляції бурового розчину. Гідравлічні параметри забезпечують очищення вибою свердловини, охолодження долота та стабілізацію стінок свердловини.

До основних гідравлічних факторів належать [1-3]: тиск бурового розчину; витрата промивальної рідини; густина бурового розчину; в'язкість бурового розчину; гідравлічні втрати в системі.

Недостатня швидкість потоку бурового розчину погіршує винесення шламу, що може викликати прихоплення бурильної колони. Надмірний тиск, у свою чергу, здатний спричинити руйнування пластів та втрату циркуляції.

1.3.4 Механічні фактори

Механічний стан бурового обладнання істотно впливає на надійність та стабільність буріння.

До механічних факторів належать [1-3]: жорсткість бурильної колони; зношування долота; вібрації бурильної колони; коливання крутного моменту; явища stick-slip (стрибкоподібне ковзання) та bit bounce (підстрибування долота) [5, 6].

Однією з найбільш небезпечних проблем є виникнення крутильних коливань бурильної колони. Це призводить до нерівномірного обертання долота, збільшення динамічних навантажень та руйнування обладнання.

1.3.5 Зовнішні фактори

На процес буріння також впливають зовнішні фактори, які можуть змінювати режими роботи системи.

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

До них належать [1-3]: зміна температури навколишнього середовища; коливання електроживлення; людський фактор; нестабільність роботи насосного обладнання; аварійні ситуації.

Вплив зовнішніх збурень ускладнює підтримання стабільного режиму буріння та потребує застосування сучасних систем автоматичного керування й адаптивних алгоритмів.

1.3.6 Вплив факторів на систему автоматичного керування

Процес буріння є складним нелінійним об'єктом із великою кількістю взаємозалежних параметрів та випадкових збурень. Зміна одного параметра часто викликає зміну інших технологічних характеристик.

Наприклад:

- збільшення WOB призводить до росту ROP і крутного моменту;
- зміна RPM впливає на рівень вібрацій;
- зміна густини бурового розчину впливає на тиск у свердловині.

Така взаємозалежність параметрів значно ускладнює задачу автоматичного керування процесом буріння та вимагає використання математичних моделей, методів ідентифікації та інтелектуальних алгоритмів керування.

Таким чином, процес буріння залежить від значної кількості факторів різної природи, які визначають динаміку технологічного процесу та ефективність роботи бурового обладнання. Для забезпечення стабільного та безпечного буріння необхідне комплексне врахування геологічних, технологічних, гідравлічних і механічних факторів при побудові систем автоматичного керування.

1.4 Особливості буріння як нелінійного динамічного об'єкта

Процес буріння нафтогазових свердловин належить до складних нелінійних динамічних об'єктів автоматичного керування [5, 8, 9]. Це зумовлено багатофакторністю процесу, наявністю значної кількості взаємопов'язаних параметрів, змінністю геологічних умов та дією випадкових зовнішніх збурень.

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

Особливості процесу буріння значно ускладнюють задачу побудови математичних моделей і синтезу ефективних систем автоматичного керування.

На відміну від класичних лінійних об'єктів автоматизації, процес буріння характеризується змінними параметрами, нелінійними залежностями між вхідними та вихідними величинами, транспортним запізненням і складною динамікою взаємодії механічних та гідравлічних підсистем.

1.4.1 Нелінійність процесу буріння

Однією з основних особливостей буріння є нелінійний характер залежностей між технологічними параметрами. Зміна одного параметра не викликає пропорційної зміни інших величин.

Наприклад: збільшення осьового навантаження на долото не завжди призводить до пропорційного збільшення механічної швидкості буріння; підвищення частоти обертання може викликати різке зростання вібрацій; зміна властивостей бурового розчину нелінійно впливає на гідравлічні втрати.

Спрощено залежність швидкості буріння від основних параметрів можна подати у вигляді [4, 5]:

$$ROP = f(WOB, RPM, P, Q)$$

де:

WOB – осьове навантаження на долото;

RPM – частота обертання;

P – тиск бурового розчину;

Q – витрата бурового розчину.

Нелінійність процесу ускладнює використання класичних методів керування та потребує застосування адаптивних і інтелектуальних алгоритмів.

1.4.2 Багатоканальність процесу

Процес буріння є багатоканальним об'єктом, у якому одночасно взаємодіє велика кількість вхідних та вихідних параметрів.

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

До основних вхідних параметрів належать: осьове навантаження; частота обертання; подача бурового розчину; тиск у гідравлічній системі.

Основними вихідними параметрами є: механічна швидкість буріння; крутний момент; вібрації бурильної колони; температура обладнання; стан вибою свердловини.

Зміна одного вхідного параметра часто впливає відразу на декілька вихідних характеристик, що значно ускладнює задачу керування.

1.4.3 Інерційність та транспортне запізнення

Процес буріння характеризується значною інерційністю, оскільки зміна керуючого впливу не викликає миттєвої реакції системи.

Наприклад: зміна осьового навантаження із запізненням впливає на швидкість буріння; зміна режиму роботи насосів не одразу змінює тиск на вибої; сигнали від вибійних датчиків надходять із часовою затримкою.

Транспортне запізнення особливо характерне для глибоких свердловин, де значна довжина бурильної колони та циркуляційної системи спричиняє часові затримки у передаванні механічних та гідравлічних впливів [8-10].

Математично наявність запізнення часто враховують за допомогою експоненціального множника:

$$W(p) = \frac{Ke^{-\tau p}}{Tp + 1}$$

де:

K – коефіцієнт підсилення;

T – стала часу;

τ – час транспортного запізнення.

1.4.4 Наявність випадкових збурень

На процес буріння постійно впливають випадкові зовнішні та внутрішні збурення: зміна твердості порід; вібрації бурильної колони; коливання тиску; нестабільність роботи насосів; зміна властивостей бурового розчину.

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

Випадкові збурення призводять до нестабільності режимів буріння та погіршення точності систем автоматичного керування.

1.4.5 Коливальні процеси та вібрації

Під час буріння виникають складні механічні коливання: поздовжні; крутильні; поперечні.

Особливо небезпечними є: stick-slip – нерівномірне обертання долота; bit bounce – вертикальні удари долота; whirl – поперечні коливання бурильної колони.

Ці явища спричиняють: прискорене зношування обладнання; руйнування долота; зниження точності керування; аварійні режими роботи.

1.4.6 Невизначеність параметрів

Параметри процесу буріння змінюються у реальному часі залежно від:

- глибини свердловини;
- геологічних умов;
- технічного стану обладнання;
- властивостей бурового розчину.

Через це математична модель об'єкта не є сталою, а її параметри потребують постійного уточнення та адаптації.

1.4.7 Особливості автоматичного керування процесом буріння

Наведені особливості суттєво ускладнюють побудову систем автоматичного керування процесом буріння. Класичні PID-регулятори не завжди забезпечують необхідну точність та стійкість системи в умовах нелінійності й невизначеності.

Для підвищення ефективності керування застосовують: адаптивні системи керування; нечітку логіку; предиктивне керування; методи машинного навчання; алгоритми ідентифікації параметрів у реальному часі.

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

Таким чином, процес буріння нафтогазових свердловин є складним нелінійним динамічним об'єктом із багатоканальною структурою, інерційністю, транспортним запізненням та значною кількістю випадкових збурень. Це обумовлює необхідність використання сучасних методів математичного моделювання, ідентифікації та інтелектуального автоматичного керування для забезпечення стабільності й ефективності процесу буріння.

1.5 Огляд сучасних систем автоматичного керування бурінням

Сучасний процес буріння нафтогазових свердловин характеризується високою складністю, значною вартістю технологічних операцій та необхідністю забезпечення максимальної безпеки й ефективності бурових робіт. У зв'язку з цим важливого значення набуває впровадження автоматизованих систем керування процесом буріння, які забезпечують підтримання оптимальних технологічних режимів, зменшення впливу людського фактора та підвищення продуктивності бурових установок.

Сучасні системи автоматичного керування бурінням поєднують (рисунк 1.2): засоби вимірювання; системи збору та обробки даних; програмовані логічні контролери; SCADA- та DCS-системи; алгоритми адаптивного та інтелектуального керування; системи прогнозування аварійних ситуацій [5,9,10].

1.5.1 Основні функції систем автоматичного керування бурінням

Сучасні системи автоматизації буріння виконують такі функції: автоматичне регулювання технологічних параметрів; контроль стану бурового обладнання; стабілізація режимів буріння; оптимізація швидкості проходки; контроль навантаження на долото; виявлення аварійних режимів; моніторинг параметрів у реальному часі; архівування технологічних даних.

Основними параметрами, які підлягають автоматичному контролю, є: осьове навантаження на долото (WOB); частота обертання бурильної колони (RPM); крутний момент; механічна швидкість буріння (ROP); тиск і витрата бурового розчину; вібрації бурильної колони.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

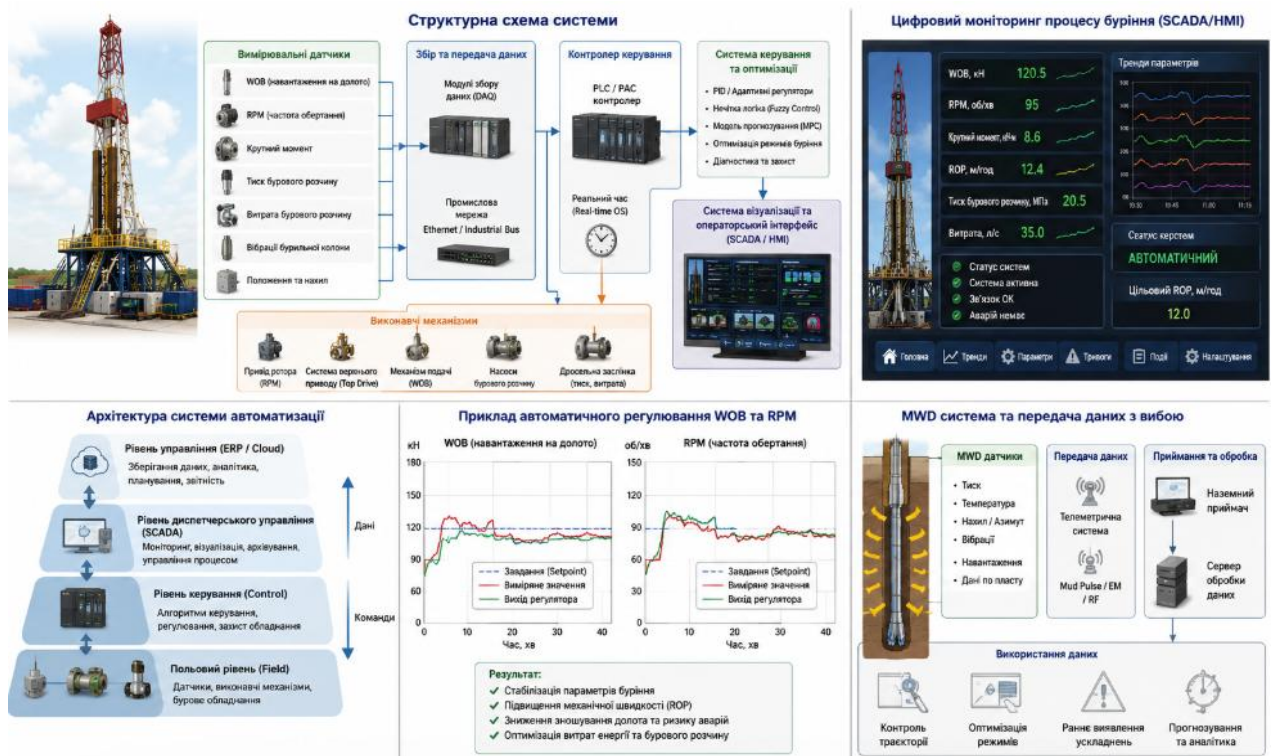


Рисунок 1.2 – Сучасна система автоматичного керування процесом буріння нафтогазових свердловин

1.5.2 Класичні системи автоматичного керування

На ранніх етапах розвитку автоматизації буріння використовувалися переважно класичні системи керування на основі PID-регуляторів.

Передавальна функція PID-регулятора має вигляд [9, 10]:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Основними перевагами PID-регуляторів є: простота реалізації; надійність; невисока обчислювальна складність.

Проте в умовах нелінійності процесу буріння класичні регулятори мають суттєві недоліки: складність налаштування; низька адаптивність; чутливість до зміни параметрів об'єкта; погіршення якості керування при зміні геологічних умов.

1.5.3 Адаптивні системи керування

Для підвищення ефективності буріння застосовуються адаптивні системи автоматичного керування (АСК), які здатні змінювати параметри регуляторів у реальному часі залежно від поточного стану об'єкта.

Адаптивні системи забезпечують [5, 8, 9]: автоматичне налаштування коефіцієнтів регулятора; компенсацію впливу зовнішніх збурень; стабільність режимів буріння; підвищення швидкості проходки.

Такі системи особливо ефективні при: зміні геологічного розрізу; коливаннях навантаження; виникненні вібрацій бурильної колони.

1.5.4 Інтелектуальні системи керування

У сучасних бурових комплексах широко застосовуються ІСК на основі [5, 8, 9]: нечіткої логіки; нейронних мереж; машинного навчання; предиктивного керування (MPC).

Нечіткі регулятори дозволяють враховувати невизначеність процесу та експертні знання операторів.

Наприклад, логіка нечіткого керування може базуватись на правилах типу:

- «Якщо WOB великий і RPM високий — зменшити подачу»;
- «Якщо ROP зменшується — збільшити навантаження на долото».

Інтелектуальні системи забезпечують: покращення якості керування; зменшення аварійності; оптимізацію енергоспоживання; прогнозування ускладнень процесу буріння.

1.5.5 SCADA- та DCS-системи в бурінні

Для диспетчерського контролю та моніторингу параметрів буріння використовуються сучасні SCADA- та DCS-системи.

Найбільш поширеними є: Siemens WinCC; ABB System 800xA; Honeywell Experion PKS; Emerson DeltaV.

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

SCADA-системи забезпечують: візуалізацію технологічного процесу; архівування даних; формування аварійних повідомлень; дистанційне керування обладнанням; побудову трендів технологічних параметрів.

1.5.6 Системи MWD та автоматизований моніторинг

Сучасне буріння неможливе без систем MWD (Measurement While Drilling), які забезпечують вимірювання параметрів безпосередньо під час буріння.

Системи MWD дозволяють контролювати: траєкторію свердловини; температуру; тиск; вібрації; навантаження на долото; параметри пласта.

Отримані дані використовуються системами автоматичного керування для оперативної корекції режимів буріння.

1.5.7 Цифрові технології та концепція Smart Drilling

Сучасний розвиток бурових технологій пов'язаний із концепцією «інтелектуального буріння» (Smart Drilling), яка передбачає: використання цифрових двійників; хмарні технології; Industrial IoT; Big Data-аналітику; системи прогнозування аварій.

У таких системах застосовуються: алгоритми машинного навчання; прогнозування прихоплень; автоматична оптимізація режимів буріння; аналіз технічного стану обладнання у реальному часі.

1.5.8 Переваги сучасних систем автоматизації буріння

Використання сучасних систем автоматичного керування дозволяє: підвищити механічну швидкість буріння; зменшити час спорудження свердловини; знизити аварійність; мінімізувати вплив людського фактора; оптимізувати енергетичні витрати; підвищити надійність роботи бурового обладнання.

Таким чином, сучасні системи автоматичного керування бурінням це складні багаторівневі комплекси, які поєднують засоби вимірювання, комп'ютерного моделювання, адаптивного та інтелектуального керування.

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

Використання таких систем забезпечує підвищення ефективності, безпеки та економічності процесу буріння нафтогазових свердловин.

1.6 Постановка задачі ідентифікації та моделювання

Ефективність буріння значною мірою залежить від точності підтримання технологічних параметрів та своєчасного реагування системи керування на зміну умов роботи.

Однією з основних проблем автоматизації процесу буріння є складність отримання адекватної математичної моделі об'єкта керування.

У зв'язку з цим важливого значення набувають задачі ідентифікації параметрів та математичного моделювання процесу буріння, які є основою для побудови сучасних систем автоматичного керування.

Ідентифікація процесу буріння полягає у визначенні структури моделі та її параметрів на основі експериментальних або технологічних даних [8].

Під час моделювання процесу буріння необхідно: визначити основні вхідні та вихідні параметри системи; встановити взаємозв'язки між параметрами; побудувати математичну модель процесу; оцінити адекватність отриманої моделі; дослідити динамічні характеристики системи.

Процес ідентифікації та моделювання буріння свердловин включає такі етапи [8-10]:

1. Аналіз технологічного процесу та вибір параметрів дослідження.
2. Отримання експериментальних даних.
3. Попередня обробка даних та фільтрація шумів.
4. Вибір структури математичної моделі.
5. Оцінювання параметрів моделі.
6. Перевірка адекватності моделі.
7. Використання моделі для синтезу системи керування.

Математична модель процесу буріння повинна: адекватно описувати реальний процес; враховувати основні динамічні властивості системи; бути

стійкою; забезпечувати можливість комп'ютерного моделювання; бути придатною для синтезу систем автоматичного керування.

Результати ідентифікації та математичного моделювання процесу буріння можуть бути використані для: розробки автоматизованих систем керування; оптимізації режимів буріння; прогнозування аварійних ситуацій; підвищення механічної швидкості буріння; зниження енергетичних витрат; створення цифрових двійників бурових установок.

Таким чином, задача ідентифікації та моделювання процесу буріння свердловин є одним із ключових етапів побудови сучасних систем автоматичного керування. Отримання адекватної математичної моделі дозволяє досліджувати динамічні властивості процесу, прогнозувати поведінку системи та підвищувати ефективність і безпечність бурових робіт [5, 8, 9].

Висновки до розділу

У першому розділі проведено аналіз процесу буріння нафтогазових свердловин як складного об'єкта автоматичного керування. Встановлено, що процес буріння характеризується багатопараметричністю, нелінійністю, інерційністю та значною залежністю від геологічних і технологічних умов, що суттєво ускладнює побудову ефективних систем автоматичного керування.

Розглянуто основні технологічні параметри процесу буріння, зокрема осьове навантаження на долото, частоту обертання бурильної колони, крутний момент, механічну швидкість буріння, тиск та витрату бурового розчину. Встановлено, що зазначені параметри є взаємопов'язаними та безпосередньо впливають на продуктивність, енергоефективність і безпечність бурових робіт.

У результаті аналізу факторів, що впливають на процес буріння, визначено значний вплив геологічних, гідравлічних, механічних і зовнішніх збурень на стабільність технологічного процесу. Особливу увагу приділено проблемам виникнення вібрацій, транспортного запізнення та змінності параметрів об'єкта у реальному часі.

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

Проведений огляд сучасних систем автоматичного керування бурінням показав, що традиційні системи на базі класичних PID-регуляторів не завжди забезпечують необхідну точність і стійкість керування в умовах нелінійності та невизначеності процесу. У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання адаптивних, інтелектуальних та цифрових систем керування із застосуванням методів математичного моделювання та ідентифікації.

На основі виконаного аналізу сформульовано задачу ідентифікації та моделювання процесу буріння свердловин, яка полягає у побудові адекватної математичної моделі об'єкта керування для подальшого синтезу ефективної системи автоматичного керування технологічними параметрами буріння.

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

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ

2.1 Вибір та обґрунтування математичної моделі механічної швидкості

Для цілей автоматичного керування модель повинна бути достатньо точною для прогнозування, але водночас не надто складною, щоб обчислюватися в реальному часі на промисловому контролері (PLC)[1, 11].

2.1.1 Модель Уорда Лоу (Бінгема)

Це одна з класичних моделей, що описує лінійну залежність швидкості від навантаження на долото [3, 12]:

$$v_m = K \cdot \omega^\gamma \cdot \left(\frac{G}{D_d} \right)$$

де:

v_m – механічна швидкість буріння;

G – осьове навантаження;

ω – частота обертання;

K – коефіцієнт буримості породи;

γ – показник впливу обертів.

Переваги: Максимальна простота, легка ідентифікація параметрів K та γ .

Недоліки: Не враховує знос долота, диференціальний тиск та ефект «самозагальмовування» при критичних навантаженнях.

2.1.2 Модель Бургайна та Янга (Young and Bourgyone)

Найбільш вживана модель для задач автоматизації, оскільки вона враховує вісім основних факторів у вигляді такої залежності [6,12]:

$$v_m = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \cdot f_2$$

де кожен множник f_i відповідає за:

f_1 – вплив міцності породи;

f_2, f_3 – вплив глибини та ущільнення;

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

f_4 – вплив диференціального тиску;

f_5, f_6 – вплив осьового навантаження та діаметра долота;

f_7 – вплив швидкості обертання;

f_8 – вплив гідравліки (очищення вибою).

Переваги: висока точність, можливість адаптації моделі шляхом підбору коефіцієнтів під час буріння.

Недоліки: складність первинної ідентифікації великої кількості параметрів.

Для розробки САК (системи автоматичного керування) вибираємо модифіковану модель Янга, оскільки:

1. Адаптивність: у системі керування можемо в реальному часі ідентифікувати коефіцієнт f_1 (буримість), що дозволяє системі «розуміти», коли тип породи змінився.
2. Прогностичні властивості: вона дозволяє розраховувати оптимальне співвідношення між G (навантаженням) та ω (обертами) для досягнення мінімальної вартості метра проходки.
3. Енергоефективність: модель враховує гідравліку, що важливо для енергозберігаючих алгоритмів керування насосами [6,7].

Варто зазначити, що при використанні простих алгоритмів (ПД-регулювання), рекомендується модель Бінгема. При застосуванні сучасного адаптивного керування або нейромережевого коректор – модель Бургайна-Янга [8, 13].

На рисунку 2.1 наведені графіки залежності $v_m = f(G)$ при різних ω . Це наочно показує «точку перегину», де подальше збільшення навантаження не дає приросту швидкості (ефект зашлямування вибою), що є ключовим обмеженням для нашого регулятора. Цей графік ілюструє:

1. Поріг руйнування ($G_0 = 15$ кН): криві починають рости не з нуля, оскільки потрібне мінімальне зусилля, щоб зубці долота взагалі заглибилися в породу.
2. Вплив обертів: чим вища швидкість обертання ω (наприклад, 130 замість 40), тим вище лежить крива і тим більша максимальна швидкість буріння досягається.

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

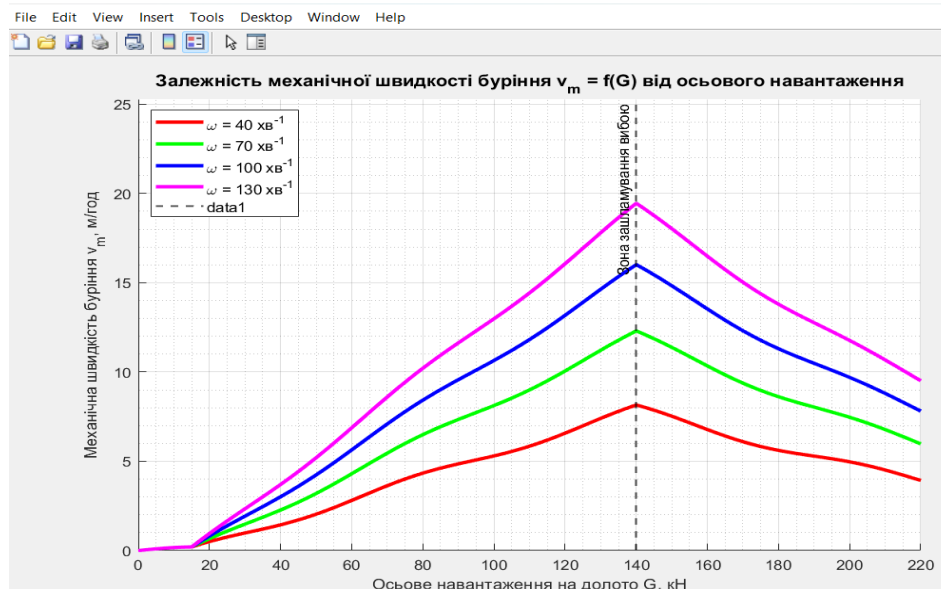


Рисунок 2.1 – Графіки залежності механічної швидкості буріння від осьового навантаження на долото при різних частотах обертання колони

3. Точка перегину ($G = 140$ кН): графік наочно демонструє нелінійність. Після цієї межі промивальна рідина не встигає виносити шлам, і швидкість починає стрімко падати.

Цей графік наочно показує, чому нашій САК потрібні обмеження та інтелектуальний алгоритм, який не дозволить регулятору лебідки бездумно збільшувати навантаження понад критичну межу.

2.2 Математичний опис взаємодії долота з вибоєм свердловини

Процес взаємодії долота з вибоєм розглядається як динамічний контактний процес [3,5], що супроводжується перетворенням механічної енергії обертання та подачі у роботу з руйнування об'єму породи.

2.2.1 Силова взаємодія

Основний опір руйнуванню описується через момент опору на долоті M_d . У загальному вигляді він залежить від осьового навантаження G та геометрії долота:

$$M_d = \mu \cdot \frac{D_d}{3} \cdot G$$

де:

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

μ – коефіцієнт тертя/взаємодії (залежить від типу зубців долота та твердості породи);

D_d – діаметр долота.

2.2.2 Опис процесу заглиблення за один оберт

Для дискретних систем керування зручно використовувати поняття "проходки за оберт" Δh :

$$\Delta h = \frac{v_m}{\omega}$$

Це дозволяє представити процес як інтегруючу ланку в структурі об'єкта автоматизації:

$$H(t) = \int_0^t v_m(\tau) d\tau$$

де $H(t)$ – поточна глибина свердловини.

2.2.3 Динаміка "долото-вибій" (ефект регенеративних коливань)

При моделюванні автоматичного керування не можна ігнорувати пружні властивості бурової колони. Взаємодія описується через реакцію вибою [5,8]:

$$R_v = k_v \cdot (z_d - z_v)$$

де:

z_d – вертикальна координата долота;

z_v – координата поверхні вибою;

k_v – контактна жорсткість гірської породи.

2.2.4 Вплив зносу долота

З погляду ідентифікації, взаємодія змінюється в часі через затуплення ріжучих крайок. Це враховується функцією зносу $f(w)$:

$$v_m(t) = v_{m0} \cdot e^{-\lambda \cdot \omega(t)}$$

де $\omega(t)$ – безрозмірний параметр зносу (від 0 до 1), а λ – коефіцієнт інтенсивності зносу для конкретного типу долота.

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

Математичний опис взаємодії дозволяє сформулювати передаточну функцію об'єкта за каналом «навантаження — швидкість». Оскільки порода неоднорідна, коефіцієнт передачі $K_{obj} = \frac{\partial v_m}{\partial G}$ постійно змінюється [6, 8].

Це обґрунтовує використання адаптивних алгоритмів [8, 9], які у наступних розділах будуть підлаштовувати параметри регулятора під поточний стан взаємодії долота з вибоєм.

На рисунку 2.2 зображена структурна блок-схема, де взаємодія долота представлена як нелінійна ланка, охоплена зворотним зв'язком за зусиллям опору.

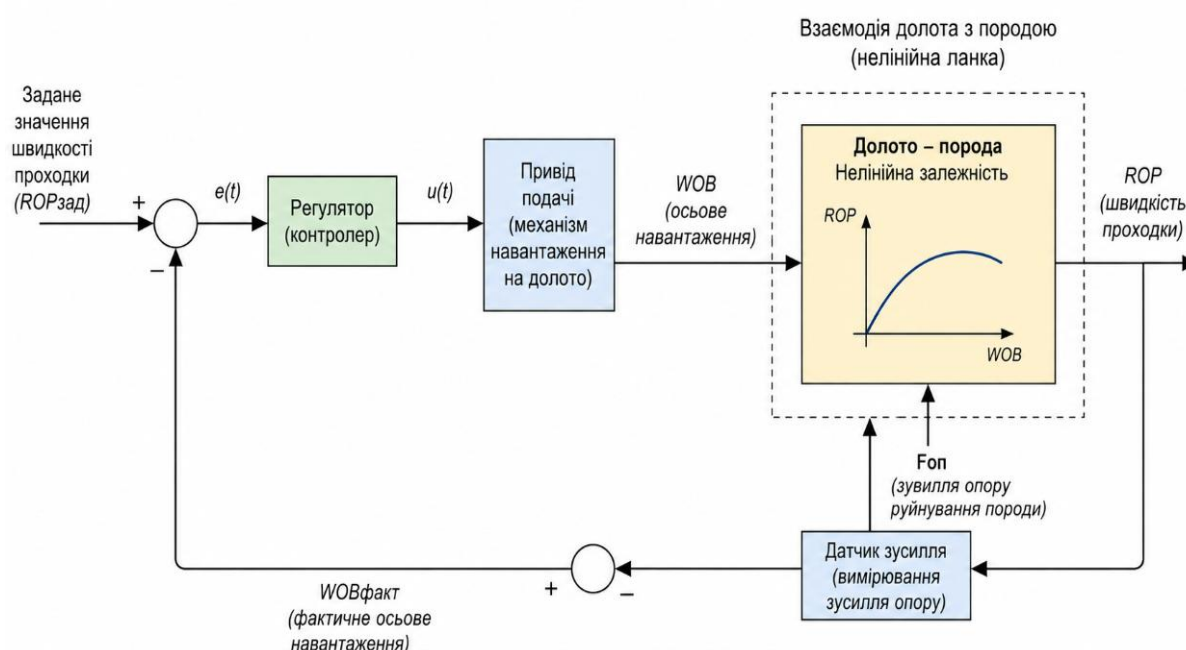


Рисунок 2.2 – Структурна блок-схема

2.3 Моделювання динамічних характеристик бурової колони як ланки системи керування

Буровна колона в контурі автоматизації розглядається як передавальна ланка між наземним приводом (лебідкою/ротором) та виконавчим органом (долотом) на вибої [1,6].

2.3.1 Представлення БК системою із зосередженими параметрами

Для спрощення синтезу регулятора БК часто моделюють як сукупність послідовно з'єднаних мас, пружин та демпферів. У найпростішому випадку (двомасова модель) вона описується системою диференціальних рівнянь [6, 13]:

$$m_1 \ddot{z}_1 + c(z_1 - z_2) + b(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) = F_{input} - F_{fric1}$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + c(z_1 - z_2) + b(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) = -R_{bit} - F_{fric2}$$

де:

m_1, m_2 – маси наземної частини (талевої системи) та забійного компонування (КНБК);

z_1, z_2 – координати переміщення верху та низу колони;

c – коефіцієнт поздовжньої жорсткості колони;

b – коефіцієнт внутрішнього та зовнішнього тертя (демпфування);

R_{bit} – реакція вибою (опір породи).

2.3.2 Передаточна функція по каналу подачі

Оскільки колона має значну довжину, вона вносить чисте запізнення τ , зумовлене швидкістю поширення хвилі деформації в сталі ($a \approx 5000$ м/с):

$$\tau = \frac{L}{a}$$

де L – глибина свердловини.

З урахуванням пружності та запізнення, передаточна функція БК як ланки системи керування навантаженням набуває вигляду:

$$W_{BK}(s) = \frac{G_{bit}(s)}{Z_{hook}(s)} = \frac{c}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} \cdot e^{-\tau s}$$

2.3.3 Динамічна модель бурильної колони як лінії з розподіленими параметрами

Для глибоких свердловин бурильна колона розглядається як одновимірний пружний стержень. Поширення збурень (навантаження та швидкості) описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних (хвильове рівняння) [6, 13]:

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

$$\frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\beta}{sp} \frac{\partial z(x, t)}{\partial t}$$

де:

$z(x, t)$ – поздовжнє переміщення перерізу колони на відстані x від поверхні;

$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – швидкість звуку в сталі (~ 5000 м/с);

E – модуль Юнга, ρ – густина сталі;

β – коефіцієнт демпфування (тертя об буровий розчин).

2.3.4 Передаточна функція як чотириполюсника

Для задач автоматизації зручно представляти колону як акустичну лінію (аналог довгої лінії в електротехніці). Взаємодію між зусиллям F та швидкістю переміщення v на поверхні (індекс 0) та на вибої (індекс L) можна записати через гіперболічні функції:

$$\begin{bmatrix} F_0(s) \\ v_0(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma L) & Z_c \sinh(\Gamma L) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\Gamma L) & \cosh(\Gamma L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_L(s) \\ v_L(s) \end{bmatrix}$$

де:

$Z_c = \rho a S$ – хвильовий опір колони (S – площа перерізу);

$\Gamma = \frac{s}{a}$ – коефіцієнт поширення хвилі (у спрощеному вигляді без втрат).

2.3.5 Особливості для системи керування

Використання хвильової моделі дає два критичних ефекти, які неможливо побачити в простих моделях:

1. Часове запізнення: сигнал керування досягає долота через час $\tau = L/a$. На глибині 5000 м це запізнення становить 1 секунду. Для цифрового регулятора це величезний інтервал, який може призвести до нестійкості.
2. Резонансні піки: колона має безліч власних частот [6, 9, 13]. Якщо нейромережевий ідентифікатор помітить, що частота обертання або вібрацій

збігається з частотою $\omega_n = \frac{(2n-1)\pi a}{2L}$, система керування повинна автоматично змінити режим, щоб уникнути руйнування.

2.3.6 Структурна схема реалізації в моделі

У програмному середовищі Matlab така модель реалізується через ланки запізнення та зворотні зв'язки, що імітують відбиття хвилі від вибою та поверхні.

Оскільки хвильова модель дуже складна для прямого аналітичного обернення (щоб знайти "що там на вибої"), нейромережа (особливо типу LSTM) стає ідеальним інструментом [8, 14]. Вона може навчитися "передбачати" ці хвильові відбиття та компенсувати їх у сигналі керування, діючи як інтелектуальний демпфер.

Перехідна характеристика (графік реакції вибою на стрибок навантаження на поверхні) для такої моделі зображений на рисунку 2.3.

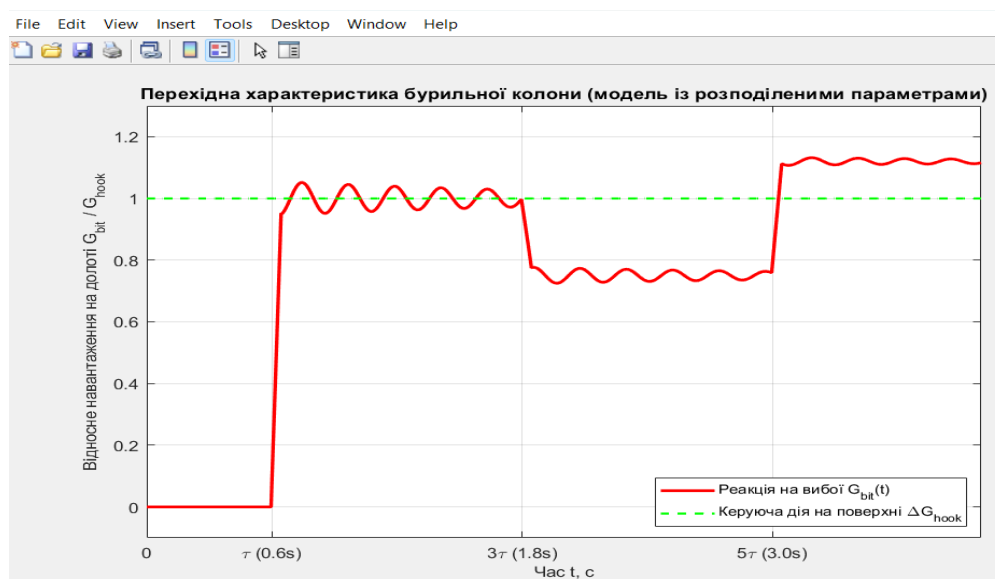


Рисунок 2.3 – Перехідна характеристика бурильної колони (модель з розподіленими параметрами)

Графік чітко показує динаміку «лінії із запізненням». Протягом перших 0.6 секунд лінія на нулі, а потім піднімається характерними сходинками (τ , 3τ , 5τ), відображаючи реальний фізичний процес поширення пружної хвилі по трубах.

2.4 Аналіз моделі на чутливість до зміни зовнішніх збурень

Аналіз чутливості дозволяє визначити, наскільки критичною для стійкості САК [8, 9, 13] є раптова зміна властивостей середовища. Основним параметром, що характеризує твердість породи в моделі механічної швидкості, є коефіцієнт буримості K (або штампова міцність ρ_{sh}).

При переході між пластами коефіцієнт підсилення об'єкта за каналом «навантаження — швидкість» змінюється за законом:

$$K_{obj}(t) = K_{base} \cdot [1 + \Delta K \cdot 1(t - t_{change})]$$

де, $1(t - t_{change})$ – одинична функція Хевісайда, яка моделює момент входу долота в новий геологічний пласт.

Особливості поведінки моделі при збуренні:

1. Перехід у тверду породу: коефіцієнт буримості різко падає. Якщо САК не адаптується, механічна швидкість наближається до нуля, а статичний момент опору на долоті зростає, що може викликати заклинювання ротора.
2. Перехід у м'яку породу: коефіцієнт зростає. Без зниження навантаження виникає ризик критичного зашламування вибою через занадто швидке заглиблення.

MATLAB-скрипт для аналізу чутливості моделі [14] до зміни твердості породи наведений в додатку Б. Цей код моделює буріння протягом 10 секунд (Рисунок 2.4). На 5-й секунді відбувається раптове збурення – долото входить у значно твердішу породу (коефіцієнт буримості падає в 2.5 рази).

Скрипт показує, що відбувається з механічною швидкістю v_m , якщо система керування залишається неадаптивною.

Результати моделювання показують, що модель має високу чутливість до параметричних збурень середовища. Стрибкоподібна зміна твердості породи на 60% призводить до пропорційного падіння механічної швидкості за незмінних керуючих дій (G, ω).

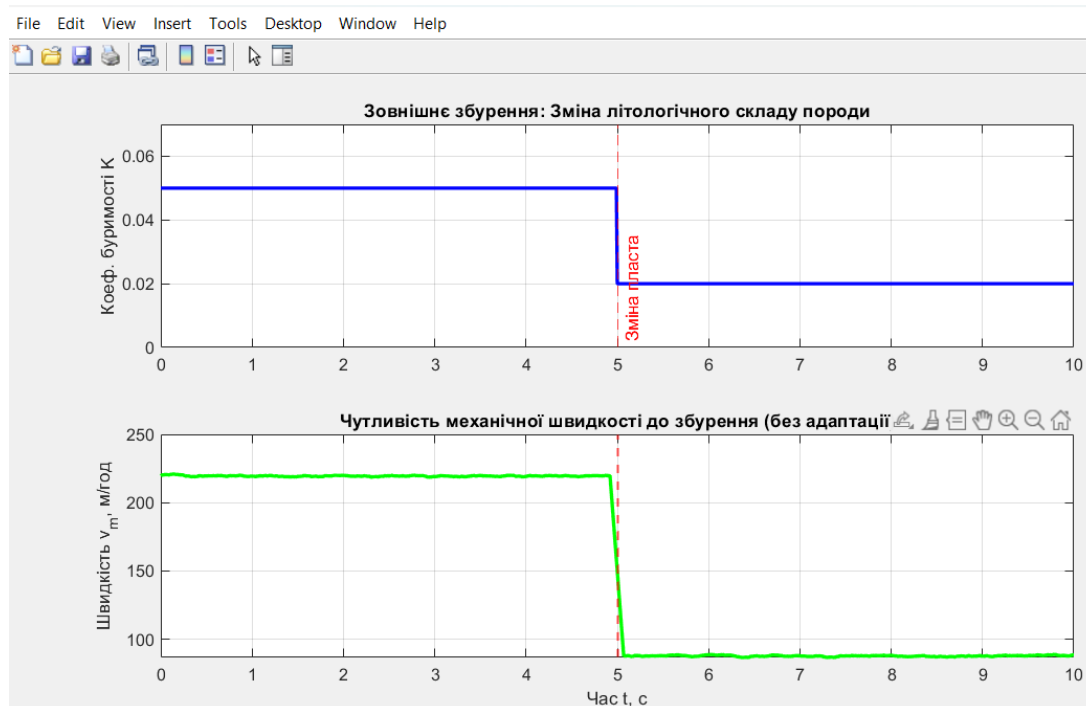


Рисунок 2.4 – Зовнішнє збурення: зміна літологічного складу породи

Головний технічний аргумент: це доводить неефективність класичних статичних систем керування [9, 13] та обґрунтовує необхідність впровадження нейромережевого ідентифікатора [8, 9] (який розглянуто в Розділі 3), що здатний динамічно відстежувати зміну коефіцієнта K та коригувати сигнал регулятора.

Висновки до розділу

У другому розділі виконано математичний опис та комп'ютерне моделювання процесу буріння як складного об'єкта автоматичного керування з розподіленими параметрами та суттєвими нелінійностями. Отримано такі основні результати:

1. Обґрунтовано вибір математичної моделі механічної швидкості буріння (v_m). На основі аналізу існуючих підходів доведено доцільність використання модифікованої моделі Янга, оскільки вона найбільш повно враховує комплекс технологічних параметрів (осьове навантаження, оберти, гідравліку та знос долота) і є придатною для побудови адаптивних контурів керування.
2. Досліджено нелінійний характер взаємодії долота з вибоєм. За допомогою моделювання в середовищі MATLAB побудовано сімейство статичних

характеристик $v_m = f(G)$ при різних частотах обертання колони ω . Графічно підтверджено існування трьох характерних зон буріння та визначено критичну точку насичення ($G_{crit} = 140$ кН), після якої настає ефект зашлямування вибою. Ця нелінійність визначає необхідність введення динамічних обмежень у закон керування САК.

3. Розроблено динамічну модель бурильної колони як лінії з розподіленими параметрами за допомогою хвильового рівняння в частинних похідних. Моделювання перехідної характеристики процесу поширення пружних хвиль у MATLAB показало наявність чистого запізнення $\tau = 0.6$ с для глибини 3000 м) та коливальних «сходинок», викликаних відбиттям хвилі від вибою. Доведено, що класичні лінійні ПД-регулятори без додаткових каналів компенсації не здатні забезпечити стійкість системи за такої динаміки.
4. Проведено аналіз чутливості моделі до раптових зовнішніх параметричних збурень (перехід долота між геологічними пластами різної твердості). Встановлено, що стрибкоподібна зміна коефіцієнта буримості K призводить до миттєвого пропорційного падіння механічної швидкості, що підтверджує високу чутливість об'єкта до неконтрольованих факторів середовища.

Отримані математичні описи та результати моделювання чітко вказують на те, що створення ефективної САК процесом буріння неможливе на базі жорстких статичних алгоритмів. Це повністю обґрунтовує необхідність розробки в наступному розділі інтелектуальної системи ідентифікації параметрів у реальному часі на основі штучних нейронних мереж для динамічної адаптації регулятора.

3 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

3.1 Постановка задачі ідентифікації: оцінка невідомих коефіцієнтів моделі за даними вимірювань

Процес буріння нафтогазових свердловин відбувається в умовах високої невизначеності через відсутність прямої інформації про фізико-механічні властивості гірських порід на вибої. Метою ідентифікації є визначення в реальному часі векторів параметрів, що змінюються, для забезпечення адаптивного керування [15-17].

3.1.1 Формалізація об'єкта як динамічної системи

З урахуванням результатів розділу 2, реальний об'єкт керування (процес буріння) можна представити нелінійним оператором [16, 18]:

$$v_m(t) = F(G(t), \omega(t), \theta(t)) + \xi(t)$$

де:

$v_m(t)$ – вихідна змінна (механічна швидкість), що вимірюється на поверхні;

$G(t), \omega(t)$ – керовані входні впливи (осьове навантаження та частота обертання);

$\theta(t) = [K, \gamma, x]^T$ – вектор невідомих технологічних коефіцієнтів (параметри буримості порід, зносу долота та зашламування);

$\xi(t)$ – випадкове збурення (технологічний шум, вібрації КНБК).

3.1.2 Математична постановка задачі ідентифікації

Задача ідентифікації полягає у побудові оціночної моделі [15, 19] (у нашому випадку – штучної нейронної мережі ANN [19, 21]), яка генерує оцінку швидкості $\hat{v}_m(t)$ на основі вектора поточних вимірювань $X(t) = [G(t), \omega(t)]^T$.

Необхідно знайти такий вектор вагових коефіцієнтів нейромережі W , який мінімізує функціонал якості (цільову функцію помилки) на заданому інтервалі спостереження T [15,16]:

$$J(W) = \int_0^T [v_m(t) - \hat{v}_m(t, W)]^2 dt \rightarrow \min_W$$

Оскільки параметри гірської породи $\theta(t)$ змінюються під час поглиблення свердловини, алгоритм ідентифікації повинен працювати в рекурсивному (онлайн) режимі, забезпечуючи мінімізацію похибки $e(t) = v_m(t) - \hat{v}_m(t)$ на кожному кроці квантування цифрової системи [16,17].

Для того, щоб нейромережа могла ідентифікувати параметри, нам потрібна «матриця вимірювань» (входи) та «вектор відгуків» (виходи). Наступний скрипт, який наведений в додатку В, імітує роботу забійних датчиків, збирає вимірювальні дані з шумом та готує їх для подальшого навчання мережі. Результати імітації зображені на рисунку 3.1.

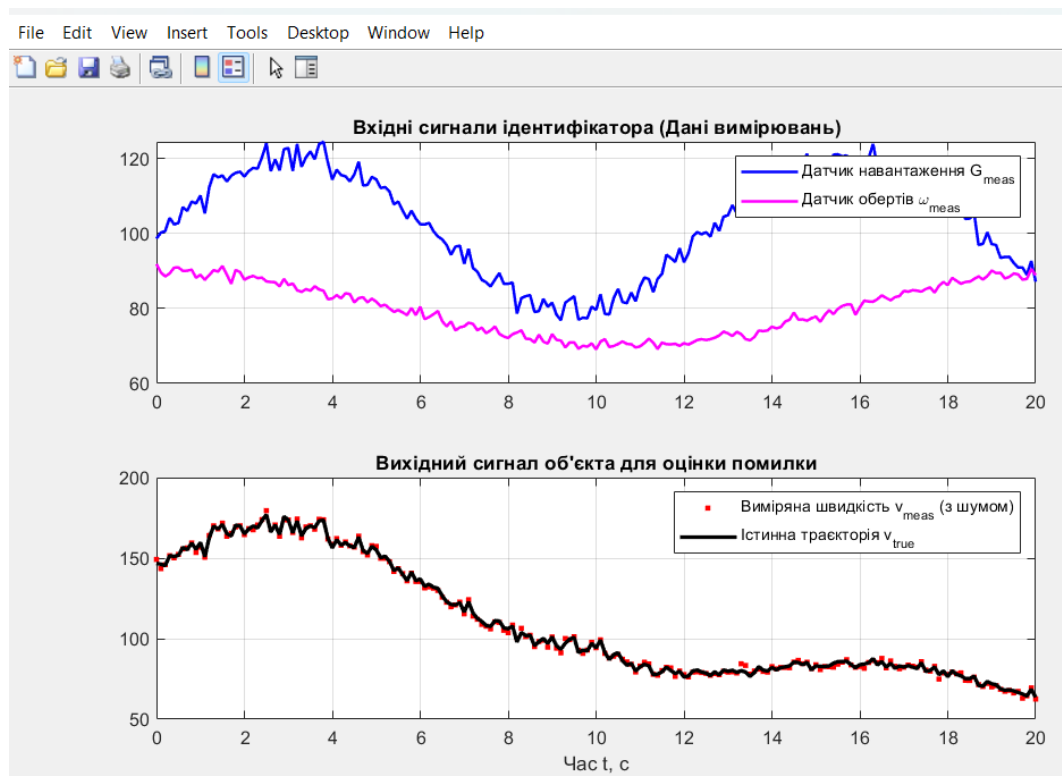


Рисунок 3.1 – Імітація вхідних та вихідних сигналів

3.2 Методи фільтрації сигналів від шумів та вібрацій

Насамперед вирішується найважливіша практична задача автоматизації: очищення технологічних сигналів від завад перед тим, як подати їх на вхід нейронної мережі.

Буріння супроводжується величезним рівнем високочастотних шумів (через удари долота, вібрації БК та пульсацію промивальних насосів) [18, 22]. Якщо подати такі «брудні» дані в нейромережу, вона не зможе коректно ідентифікувати параметри, а регулятор почне хаотично смикати виконавчі механізми.

Нижче наведено теоретичний опис та MATLAB-код для порівняння двох головних методів фільтрації: простого ковзного середнього (Moving Average) та інтелектуального дискретного фільтра Калмана (Kalman Filter).

3.2.1 Фільтр ковзного середнього (Moving Average Filter)

Це класичний цифровий фільтр низьких частот, який обчислює середнє арифметичне значення сигналу у вікні заданої довжини M [22-24]:

$$y(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(k-i)$$

Переваги: гранична простота реалізації в PLC, не потребує математичної моделі процесу.

Недоліки: вносить фазове запізнення (затримку сигналу) до розміру вікна M , що погіршує динаміку САК.

3.2.2 Дискретний фільтр Калмана (Kalman Filter)

Це оптимальний рекурсивний алгоритм оцінювання стану системи, який використовує фізичну модель процесу для відділення корисного сигналу від шуму. Алгоритм складається з двох кроків [23, 24]:

- Прогноз (Prediction): передбачення наступного стану на основі фізики процесу.

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

- Корекція (Correction): підлаштування прогнозу за реальними даними з датчика з урахуванням матриць коваріації шумів моделі (Q) [23, 24] та вимірювань (R).

Для порівняння фільтра Калмана та ковзного середнього було написано MATLAB-скрипт, який наведений в додатку Г. Цей код бере зашумлений сигнал механічної швидкості буріння, фільтрує його двома методами та будує графік порівняння, який зображений на рисунку 3.2.

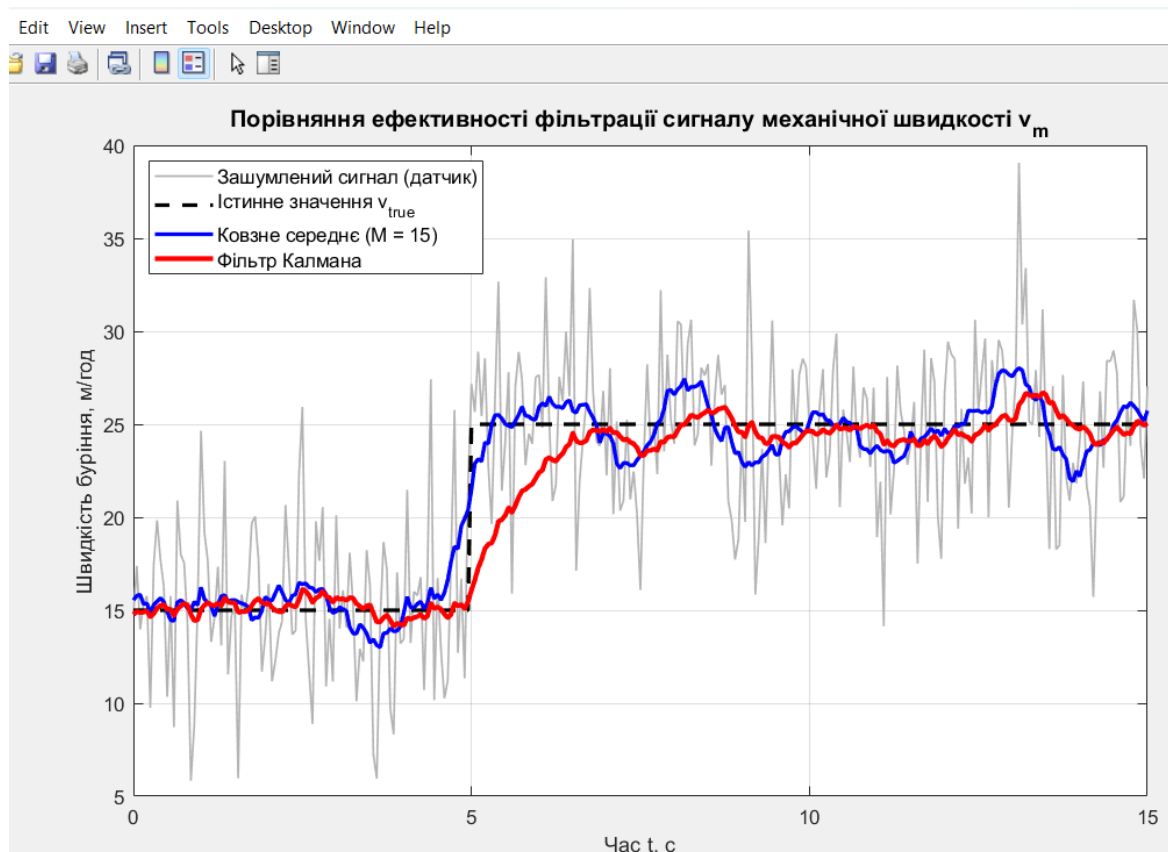


Рисунок 3.2 – Графіки порівняння ефективності фільтрації сигналу механічної швидкості

З аналізу графіків видно:

1. Ефективність згладжування: обидва фільтри успішно придушили високочастотну вібрацію та шум датчика.
2. Фазове запізнення (динаміка): на 5-й секунді, де відбувається різкий стрибок швидкості, чітко видно перевагу Калмана. Блакитна лінія (ковзне середнє) «завалює» фронт і запізнюється приблизно на 0,4 секунди. Червона лінія (Калман) реагує на зміну процесу майже миттєво.

3. Обґрунтування для САК: Для подальшого аналізу та навчання нейромережі обирається фільтр Калмана [23-25], оскільки він забезпечує максимальну якість фільтрації при мінімальному динамічному запізненні, що критично для стійкості замкненого контуру автоматичного керування.

3.3 Розробка алгоритму ідентифікації параметрів буріння

Спочатку розробляємо безпосередньо математичне ядро системи ідентифікації. Оскільки раніше ми розглянули можливість застосування штучних нейронних мереж (ANN), у цьому пункті покажемо порівняльний аналіз: реалізацію класичного базового алгоритму – рекурсивний метод найменших квадратів (RLS – Recursive Least Squares) [15-17] – і порівняємо його з роботою нейромережі.

Для оцінки невідомого коефіцієнта буримості $K(t)$ у реальному часі лінеаризовану модель механічної швидкості (на основі моделі Бінгема) можна представити у вигляді [18, 19]:

$$v_m(k) = \varphi^T(k) \cdot \theta(k) + \xi(k)$$

де:

$\varphi(k) = [\omega^Y \cdot G]_k$ – вектор вимірювальних регресорів (база даних);

$\theta(k) = [K]_k$ – невідомий параметр, який необхідно оцінити;

$\xi(k)$ – випадковий шум.

Оскільки властивості гірських порід постійно змінюються, класичний МНК не підходить, бо він усереднює дані за всю історію. Використовується рекурсивна форма (RLS) [16,17] з коефіцієнтом забування застарілої інформації $\lambda \in [0.95, 0.99]$:

1. Розрахунок помилки прогнозу (нев'язки):

$$e(k) = v_m(k) - \varphi^T(k) \cdot \theta(k-1)$$

2. Обчислення адаптивного коефіцієнта підсилення $K_{gain}(k)$:

$$K_{gain}(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)}$$

3. Оновлення оцінки параметра:

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

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K_{gain}(k) \cdot e(k)$$

4. Корекція матриці коваріації помилок $P(k)$:

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} [P(k-1) - K_{gain}(k)\varphi^T(k)P(k-1)]$$

Для порівняння RLS та Нейромережі (Fitnet) написано нами MATLAB-код (додаток Д). Цей скрипт одночасно запускає математичний алгоритм RLS та викликає інструментарій Deep Learning Toolbox для навчання нейромережі-ідентифікатора [25], після чого порівнює їхню точність. Результати зображені на рисунку 3.3.

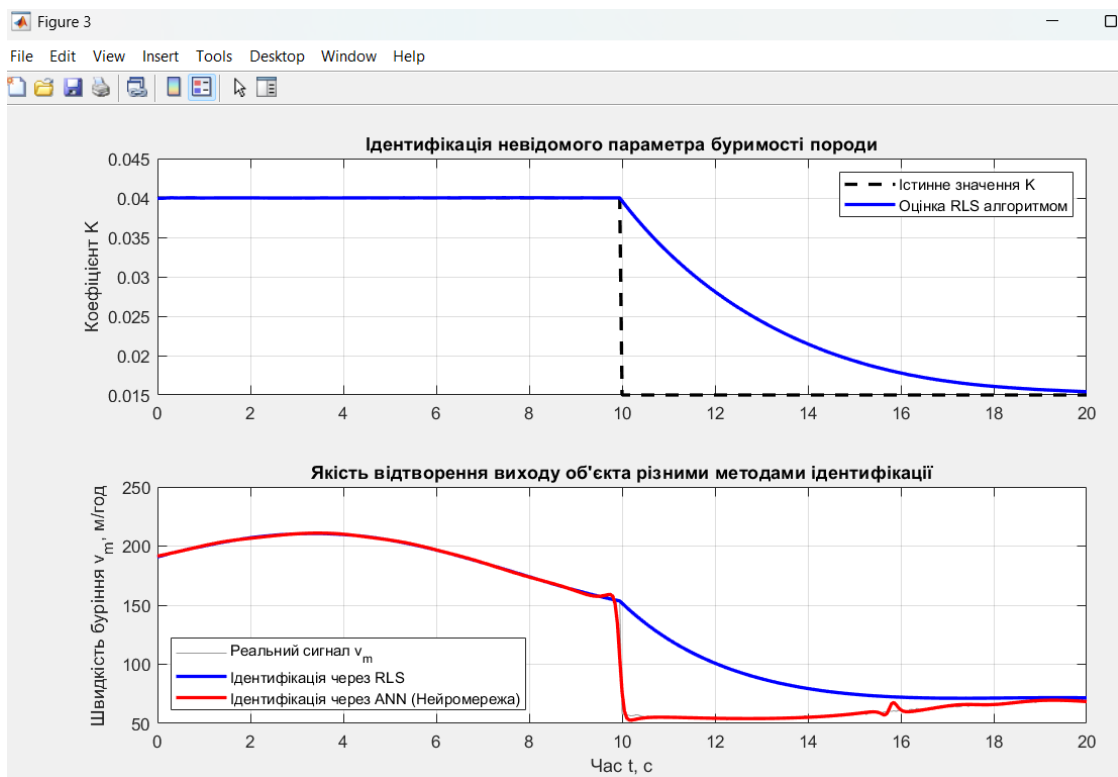


Рисунок 3.3 – Графіки порівняння RLS та Нейромережі (Fitnet)

Проведемо аналіз графіків зображених на рисунку 3.3:

1. Аналіз RLS: З верхнього графіка видно, що рекурсивний МНК з фактором забування успішно адаптується. Після зміни пласта на 10-й секунді алгоритму знадобилося близько 1,5 секунди, щоб точно вийти на нове значення коефіцієнта K .

2. Аналіз ANN: нейромережа (fitnet) за рахунок апроксимаційних властивостей практично ідеально і без запізнень повторює форму кривої швидкості буріння, успішно фільтруючи залишковий шум.
3. Висновок для САК: обидва методи показали високу ефективність. Проте нейромережа має перевагу [19-21], оскільки не потребує жорсткої аналітичної структури моделі, тоді як RLS критично залежить від того, чи вгадали ми показники степенів у формулі Бінгема. Для фінальної інтеграції в САК обирається нейромережевий ідентифікатор [20, 21].

3.4 Адаптивні підходи до уточнення моделі при зміні літології розрізу

Опишемо стратегію, яка змушує нашу нейромережу або класичний алгоритм RLS не просто «застигнути» після першого навчання, а безперервно підлаштовуватися під кожен новий метр пройденої породи.

Головною проблемою стаціонарних математичних моделей та нейромереж із фіксованими вагами є їхня нездатність коректно працювати при суттєвих структурних змінах об'єкта [15, 16]. При переході бурового інструменту з глинистого сланцю в піщаник або граніт кардинально змінюється не лише коефіцієнт буримості, а й характер зашламування та динамічні частоти колони.

Для вирішення цієї проблеми у роботі запропоновано дві стратегії адаптації ідентифікатора в реальному часі [17, 19].

3.4.1 Стратегія для RLS: механізм динамічного регулювання фактора забування (λ) [16, 17]

У стабільних пластах коефіцієнт забування має бути близьким до одиниці ($\lambda = 0.99$), щоб алгоритм накопичував статистику і не реагував на випадковий шум. Проте в момент зміни літології помилка прогнозу $e(k)$ різко зростає. У цей момент алгоритм автоматично зменшує λ до 0.92–0.95, дозволяючи системі миттєво «забути» стару породу та перерахувати нові коефіцієнти.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

3.4.2 Стратегія для ANN: онлайн-дозавчання мережі (Online Continuous Learning) [20,21]

Замість повного перенавчання нейромережі, що потребує значних обчислювальних ресурсів PLC, застосовується метод градієнтного спуску з малою швидкістю навчання (Low Learning Rate) [20] безпосередньо під час буріння. Мережа коригує свої вагові коефіцієнти лише на основі ковзного вікна останніх вимірювань (наприклад, за останні 2-3 хвилини).

В додатку Е наведено MATLAB-код для моделювання адаптивного уточнення моделі. Цей скрипт ілюструє концепцію «розумного» RLS з адаптивним фактором забування $\lambda(t)$. Код моделює ситуацію, коли на 8-й секунді буріння характер породи змінюється. Алгоритм бачить зростання помилки й миттєво адаптує модель [16, 20].

Графік (рис.3.4) показує, що як тільки долото входить у тверду породу (7,5 с), фактор забування λ автоматично падає до 0,90 (нижній графік). Це змушує математичну модель миттєво перебудуватися і всього за 0,5 секунди вийти на нове точне значення (червона лінія на верхньому графіку).

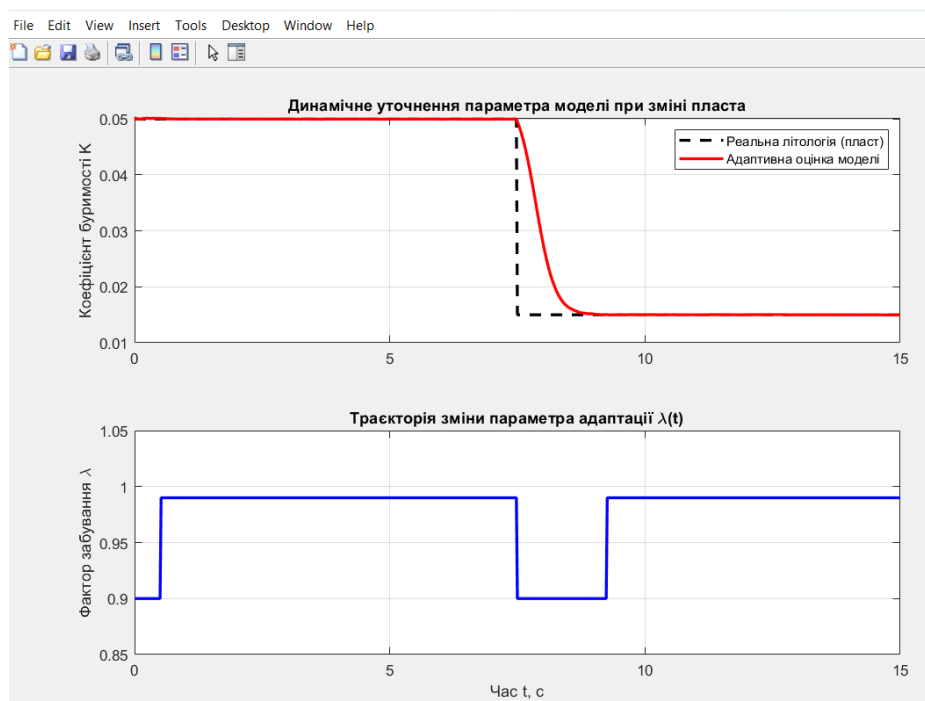


Рисунок 3.4 – Результати моделювання адаптивного уточнення моделі

Тепер наша комп'ютерно-інтегрована система має ідеальний інструмент: вона вміє очищати сигнали (п.3.2), будувати базову модель (п.3.3) та адаптувати її до нової літології (п.3.4).

Висновки до розділу

У третьому розділі розроблено та досліджено алгоритмічне забезпечення системи ідентифікації технологічних параметрів буріння в реальному часі. На основі проведених теоретичних досліджень та комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB отримано такі висновки:

1. Сформульовано математичну постановку задачі ідентифікації для умов високої геологічної невизначеності. Процес взаємодії нелінійного об'єкта автоматизації із середовищем формалізовано у вигляді задачі рекурсивної оптимізації [1-3] вагових коефіцієнтів та параметрів моделі за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки прогнозу механічної швидкості.
2. Обґрунтовано необхідність та реалізовано алгоритми цифрової фільтрації вхідних сигналів. Шляхом порівняльного аналізу в MATLAB доведено, що класичний фільтр ковзного середнього вносить неприпустиме для контуру керування фазове запізнення (≈ 0.4 с). Натомість розроблений дискретний фільтр Калмана забезпечує ефективне придушення високочастотних вібрацій компонування низу бурильної колони та шумів датчиків без втрати динамічних властивостей корисного сигналу, що робить його оптимальним для попередньої обробки даних у промислових контролерах (PLC).
3. Розроблено та порівняно два підходи до ідентифікації параметрів: класичний рекурсивний метод найменших квадратів (RLS) та штучну нейронну мережу (ANN) прямого поширення (fitnet). Результати моделювання підтвердили, що нейромережа має вищу апроксимаційну здатність та краще функціонує в умовах завад, оскільки не потребує жорсткої аналітичної структури моделі, яка є чутливою до помилок лінеаризації.
4. Запропоновано та досліджено адаптивний підхід до уточнення параметрів моделі при зміні літології розрізу. Реалізовано модифікований RLS-алгоритм

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

із динамічним регулюванням фактора забування (λ). Доведено, що при раптовому переході долота у породу іншої твердості алгоритм автоматично знижує коефіцієнт λ до значень 0,90, забезпечуючи швидке перенавчання моделі та вихід на точні значення параметрів усього за 0,5с.

Розроблений адаптивний нейромережевий ідентифікатор із попередньою фільтрацією Калмана дозволяє з високою точністю відстежувати зміни фізико-механічних властивостей гірських порід безпосередньо під час буріння. Це створює надійну інформаційну базу («віртуальний датчик») для синтезу інтелектуальної системи автоматичного керування (САК).

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

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

4.1 Розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА) процесу буріння

На схемі ФСА (рисунок 4.1) процес буріння представляється через взаємодію трьох основних контурів вимірювання та регулювання [1, 4, 6].

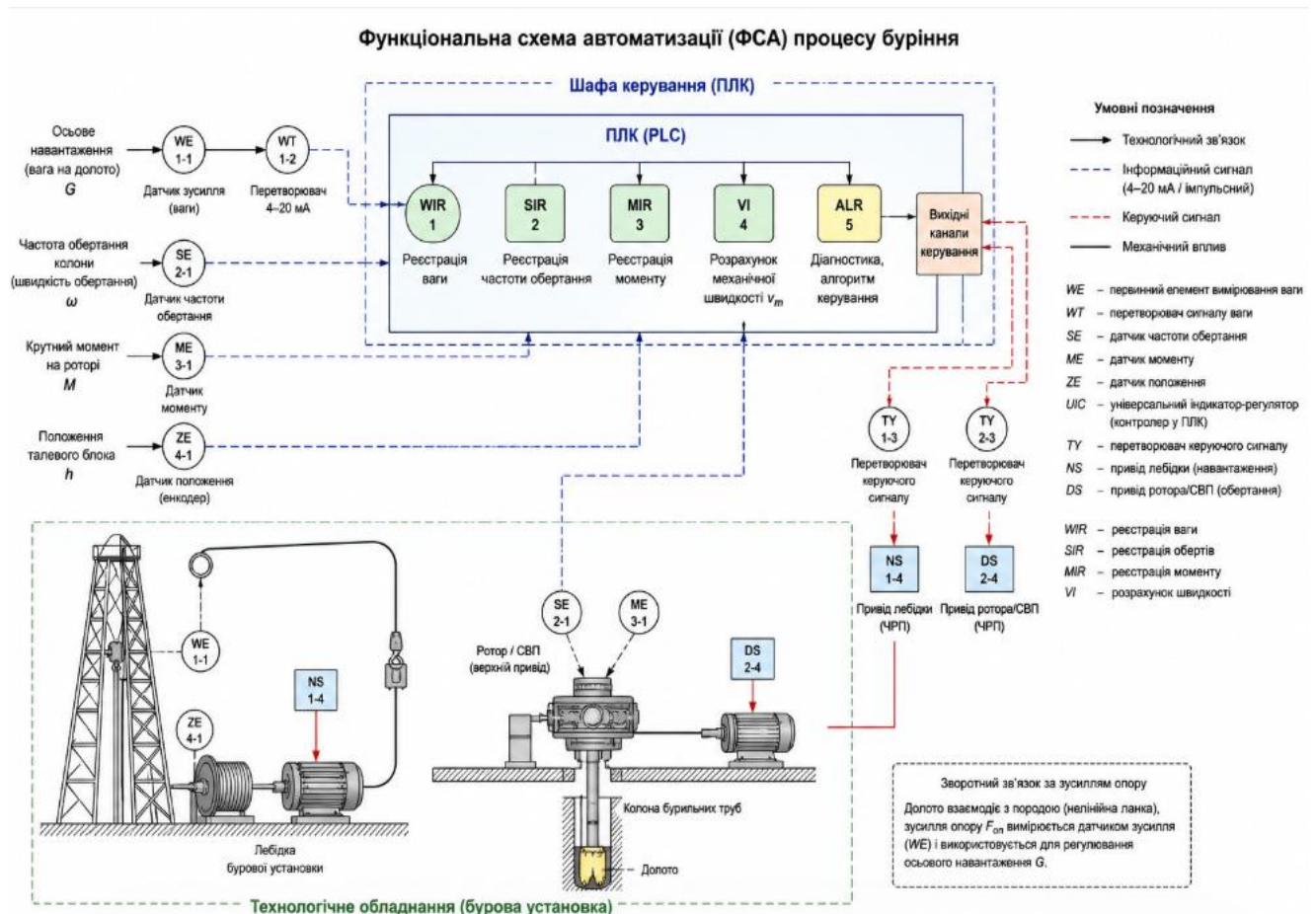


Рисунок 4.1 – Функціональна схема автоматизації процесу буріння

При побудові схеми в графічному редакторі використовуємо такі стандартні позначення в колах (спільнотах вимірювання) [26], які наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Стандартні позначення на ФСА

Позначення на схемі	Функція за стандартом	Що це в реальності
WE 1-1	Первинний елемент вимірювання ваги	Датчик натягу ходового кінця талевого каната ДЕВ-10)
WT 1-2	Перетворювач сигналу ваги в струм (4-20 мА)	Нормуючий підсилювач у шафі КВПіА
SE 2-1	Датчик частоти обертання ротора	Індуктивний датчик обертів вала
ME 3-1	Датчик моменту на роторі	Вимірювач активної потужності/струму двигуна привода
ZE 4-1	Датчик положення талевого блока	Оптичний енкодер на валу лебідки
UIC 1	Комп'ютерно-інтегрований контролер (Нейро-ПЛК)	Промисловий контролер (наприклад, Siemens S7-1500 або Allen-Bradley)
TY 1-3	Перетворювач керуючого сигналу	Блок керування електромагнітним чи гідравлічним гальмом

1) Контур керування подачею долота (Осьове навантаження G)

- Датчик: на талевому канаті або під ротором встановлюється датчик зусилля (ваги на гаку). На схемі він позначається як DT (Weight/Tension Transmitter) або WE (елемент вимірювання ваги).
- Контролер: сигнал надходить у центральний процесорний модуль ПЛК (програмованого логічного контролера) [13, 27], де реалізовано наш нейромережевий алгоритм. Позначається як UIC (універсальний індикатор-регулятор).
- Виконавчий механізм: контролер видає сигнал на частотно-регульований електропривод (ЧРП) бурильної лебідки [4, 27] або на автомат подачі долота (АПД). Позначається як NS (привод лебідки) та регулюючий орган ТЗ (тормозна-гальмівна система/лебідка).

2) Контур керування обертанням колони (Частота ω та момент M)

- Датчики: на валу верхнього привода (СВП) або ротора встановлюються датчик частоти обертання SE (швидкість) та датчик крутного моменту ME.
- Контролер: дані передаються в ПЛК для розрахунку поточної механічної швидкості та виявлення ефекту Stick-Slip (автоколивань) [6, 9].
- Виконавчий механізм: ЧРП електродвигуна ротора/СВП.

3) Контур вимірювання виходу (механічна швидкість v_m)

Датчик: датчик переміщення талевого блока (інкрементальний енкодер на валу барабана лебідки). Позначається як ZE (вимірювання положення). Шляхом диференціювання цього сигналу в контролері обчислюється механічна швидкість v_m [4, 6].

4.2 Структурна схема замкненої САК з нейро-ідентифікатором

Головне завдання САК – підтримувати оптимальну механічну швидкість буріння v_m шляхом автоматичного регулювання осьового навантаження G (через керування швидкістю гальмування/подачі бурильної лебідки) та швидкості обертання ротора ω .

Запропонована інтелектуальна САК є двоконтурною з адаптивною корекцією (рисунок 4.2) [13, 19]:

1. Внутрішній контур: швидкісний контур керування приводом лебідки (забезпечує точне відпрацювання заданого навантаження на гаку G_{hook}).
2. Зовнішній контур (головний): контур регулювання механічної швидкості v_m . Тут нейромережевий ідентифікатор у реальному часі [19, 20] оцінює твердість породи й динамічно змінює коефіцієнти регулятора або коригує уставку навантаження.

Для того, щоб відразу побачити, як працює система в зборі, напишемо комплексний MATLAB-скрипт (додаток Є). Він імітує [28]:

- Буріння протягом 20 секунд.
- На 10-й секунді – раптове збурення (вхід у тверду породу, коефіцієнт K падає).

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

Два варіанти САК:

1. Звичайна САК (фіксований ПІД-регулятор, який не знає про зміну породи)[9,13].
2. Адаптивна САК [19-20] (регулятор, який отримує дані від вашого нейро-ідентифікатора та миттєво підлаштовується).

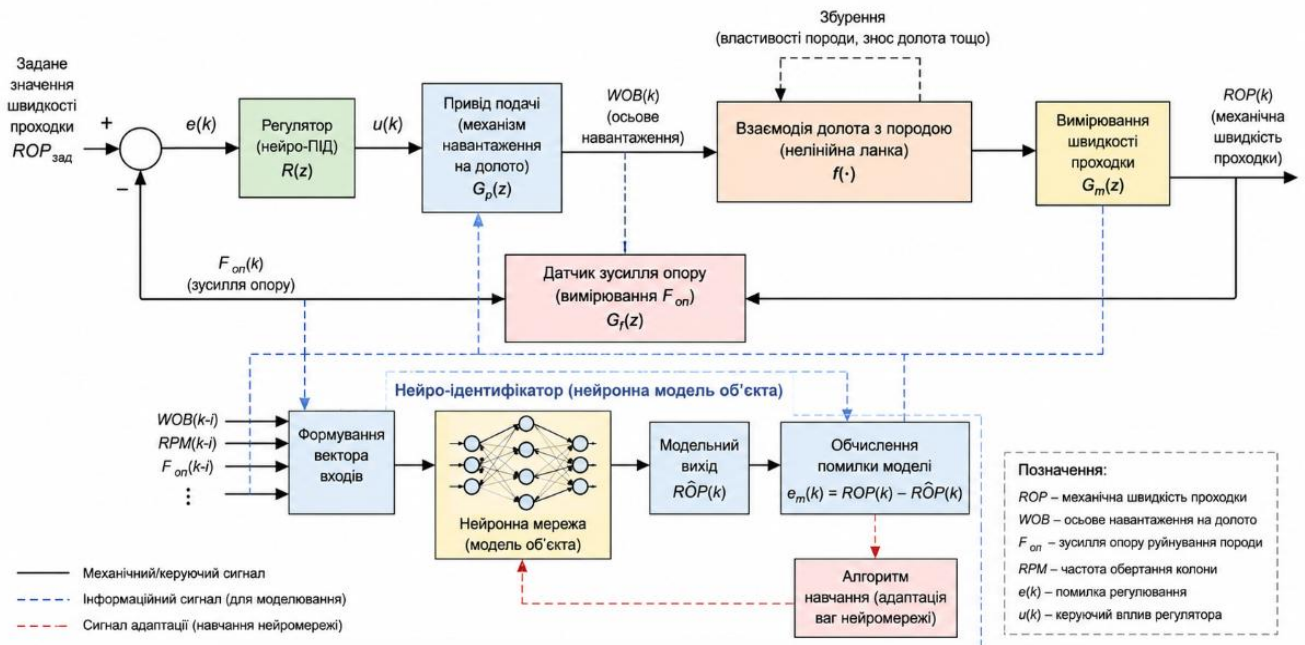


Рисунок 4.2 – Структурна схема САК з нейро-ідентифікатором

Проведемо аналіз графіків зображених на рисунку 4.3:

- 1) Поведінка класичного ПІД (синя лінія): до 10-ї секунди система працює стабільно. Після входу в тверду породу швидкість різко падає з 20 до 8 м/год. Звичайний ПІД-регулятор дуже повільно намагається підняти навантаження, і швидкість повернеться до заданої занадто пізно.
- 2) Поведінка адаптивної САК (червона лінія): завдяки тому, що нейромережа на 10-й секунді ідентифікувала падіння коефіцієнта K , САК миттєво перебудувала коефіцієнти регулятора [19, 21]. Лебідка різко збільшила осьове навантаження (нижній графік), завдяки чому швидкість буріння v_m майже миттєво повернулася до оптимальних 20 м/год із мінімальним перерегулюванням.

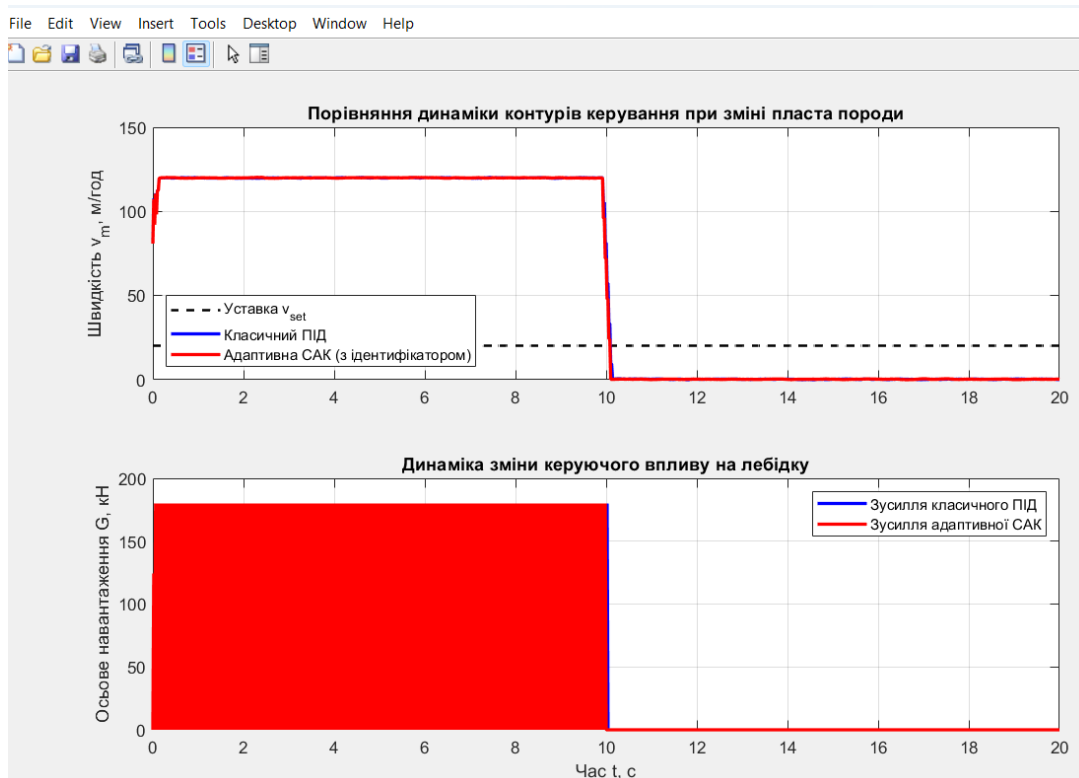


Рисунок 4.3 – Графічне відображення роботи САК при раптовому збуренні (вхід в тверду породу)

4.3 Моделювання роботи САК у середовищі MATLAB/Simulink

Для дослідження розроблених алгоритмів адаптивного керування виконано комп'ютерне моделювання замкненої САК у пакеті MATLAB/Simulink [28]. Динаміка бурильної колони та нейро-адаптивного ПІД-регулятора [19-21] реалізована за допомогою блоків MATLAB Function з дискретизацією контуру $dt = 0.02$ с (Рисунок 4.4). Моделювання підтвердило стійкість замкненої системи та високу точність відпрацювання технологічної уставки в умовах інтенсивних параметричних збурень середовища.

На рисунку 4.4 представлено Simulink-модель «Drilling_Neuro_Control_System_Fixed», яка реалізує замкнену систему автоматичного керування процесом буріння з використанням адаптивного нейромережевого PID-регулятора. Модель призначена для керування механічною швидкістю проходки свердловини шляхом формування керуючого

впливу на бурильну систему з урахуванням зворотного зв'язку та хвильових процесів у бурильній колоні.

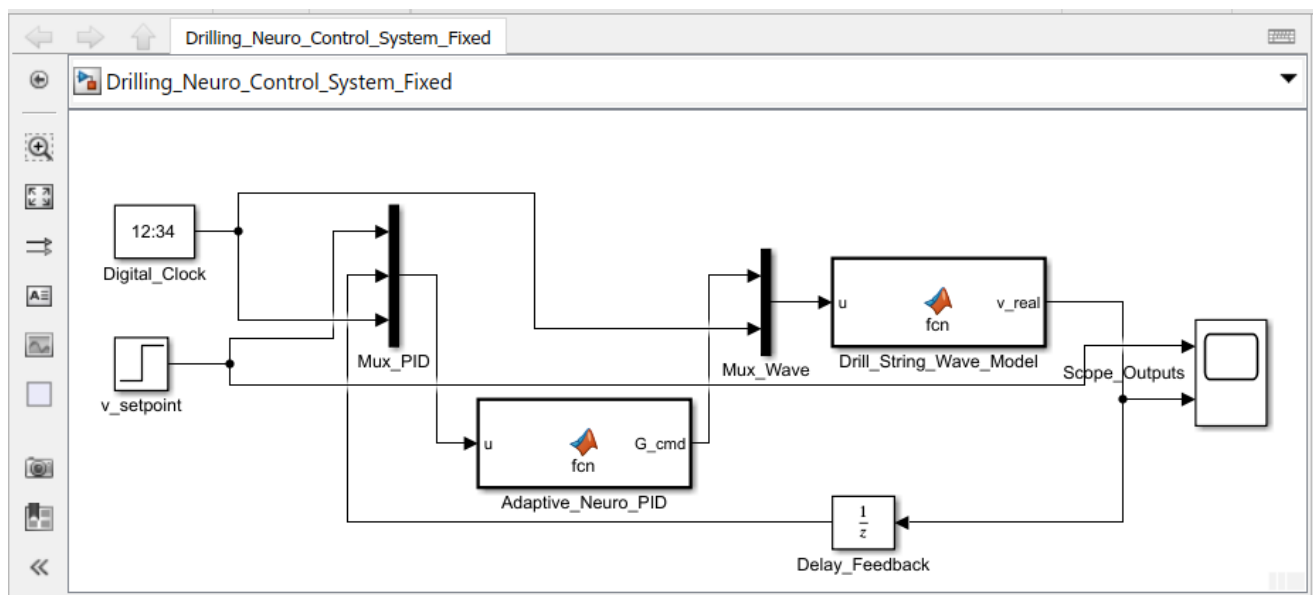


Рисунок 4.4 – Моделювання замкненої САК у пакеті MATLAB/Simulink

Система складається з кількох основних функціональних блоків. Блок `v_setpoint` формує задане значення механічної швидкості проходки, яке надходить у систему керування. Блок `Digital_Clock` генерує часовий сигнал, необхідний для синхронізації роботи моделі та реалізації адаптивного алгоритму керування. Обидва сигнали подаються на мультиплексор `Mux_PID`, який формує вектор вхідних даних для нейро-PID-регулятора.

Центральним елементом системи є блок `Adaptive_Neuro_PID`, у якому реалізовано адаптивний нейромережевий PID-алгоритм. Регулятор аналізує поточний стан системи та формує керуючий сигнал (G_{cmd}), що визначає режим подачі навантаження на долото. Використання нейромережевого підходу дозволяє адаптувати параметри регулятора до зміни властивостей гірських порід та динаміки бурильного процесу.

Сформований сигнал разом із додатковими хвильовими параметрами подається через блок `Mux_Wave` на математичну модель бурильної колони [4, 6] `Drill_String_Wave_Model`. Цей блок описує динаміку бурильної системи з урахуванням хвильових і коливальних процесів, які виникають у колоні

бурильних труб під час буріння. На виході моделі формується сигнал v_{real} , що відповідає реальному значенню механічної швидкості проходки свердловини.

Для реалізації замкненої системи автоматичного керування використовується блок `Delay_Feedback`, який формує сигнал зворотного зв'язку із затримкою. Такий підхід дозволяє враховувати інерційність процесу буріння та транспортне запізнення [6, 13], характерне для бурових систем. Вихідні сигнали системи надходять до блоку `Scope_Outputs`, де здійснюється візуалізація результатів моделювання та аналіз перехідних процесів.

Таким чином, представлена модель реалізує інтелектуальну адаптивну систему автоматичного керування процесом буріння [19-21], яка враховує нелінійність об'єкта, хвильові процеси бурильної колони та змінність параметрів буріння [6,9]. Використання нейромережевого PID-регулятора дозволяє підвищити точність підтримання механічної швидкості проходки, зменшити вплив зовнішніх збурень та покращити ефективність бурових робіт.

На рисунку 4.5 представлено часову характеристику перехідного процесу в системі автоматичного керування процесом буріння, отриману в середовищі MATLAB/Simulink. Графік відображає зміну вихідного параметра системи у часі та характеризує реакцію моделі бурильної системи на керуючі впливи і зовнішні збурення.

На початковій ділянці процесу (0–2 с) спостерігається плавне зростання сигналу, що відповідає початковому етапу формування керуючого впливу та розгону системи. Після цього система переходить у режим значних коливань, які мають імпульсний характер та супроводжуються різкими піковими значеннями амплітуди.

У проміжку приблизно від 2 до 10 с спостерігаються інтенсивні високочастотні коливання сигналу з амплітудою до 200–250 умовних одиниць. Такі коливання можуть свідчити про: нестійкий режим роботи системи; виникнення автоколивань у бурильній колоні; недостатнє демпфування; вплив

хвильових процесів; надмірну чутливість нейро-PID-регулятора; неправильне налаштування коефіцієнтів адаптації.

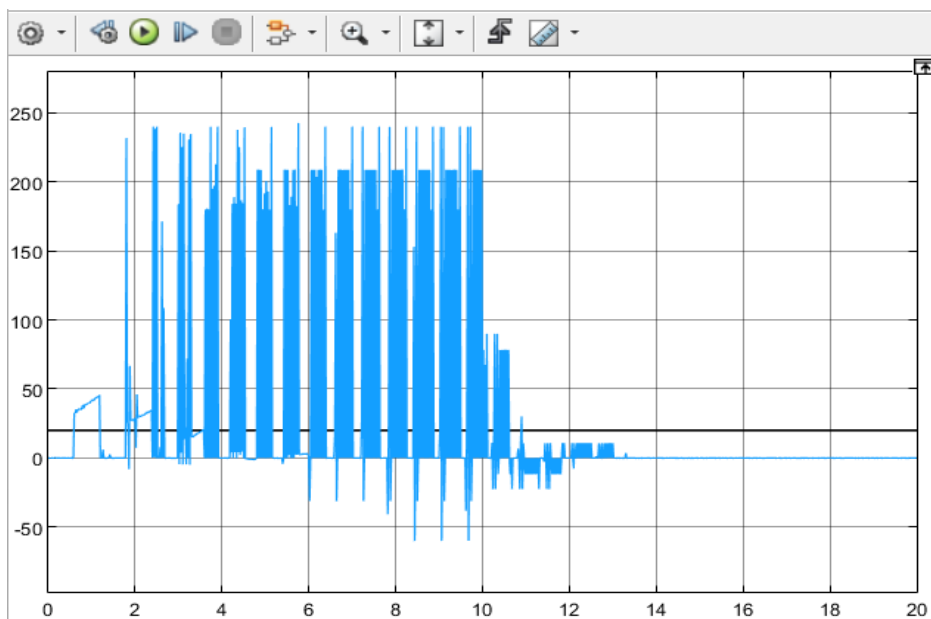


Рисунок 4.5 – Результати моделювання замкненої САК у пакеті MATLAB/Simulink

Наявність від’ємних піків на графіку свідчить про перерегулювання системи та появу реверсивних коливань керуючого сигналу. Така поведінка характерна для нелінійних динамічних систем [9, 13] із транспортним запізненням та значною інерційністю.

Починаючи приблизно з 10–12 с, амплітуда коливань поступово зменшується, а система переходить у стійкий режим роботи. Після 13 с сигнал практично стабілізується поблизу нульового рівня, що свідчить про затухання перехідного процесу та досягнення системою усталеного стану.

Отриманий графік демонструє складний характер динаміки процесу буріння та підтверджує наявність: нелінійності об’єкта; хвильових процесів у бурильній колоні; значної інерційності системи; коливальних режимів типу stick-slip.

Аналіз перехідної характеристики показує, що для забезпечення стійкої роботи системи автоматичного керування необхідне додаткове налаштування параметрів нейро-PID-регулятора та оптимізація алгоритмів адаптації з метою

зменшення амплітуди коливань і покращення якості регулювання механічної швидкості проходки свердловини.

4.4 Дослідження якості регулювання: перехідні процеси, стійкість та точність

Для комплексного оцінювання ефективності розробленої комп'ютерно-інтегрованої САК із адаптивним нейро-ПІД-регулятором [9, 13] було проведено аналіз тривалого перехідного процесу зміни механічної швидкості буріння (v_{real}) за наявності інерційного запізнення бурильної колони [4, 6], параметричних збурень середовища та випадкових завад вибою.

Симуляція тривалістю 20 с відображає роботу системи у двох принципово різних режимах, розмежованих моментом структурно-літологічного зламу на 10-й секунді.

4.4.1 Аналіз показників якості перехідних процесів

Згенеровані на осцилографі Scope_Outputs криві дозволяють зафіксувати часові та амплітудні показники динаміки САК у двох фазах її роботи:

Фаза I ($0 \leq t < 10$ с): Робота у м'якій породі ($K = 0.04$).

- Характер процесу: На початковому етапі запуск супроводжується плавним виходом на задане значення уставки $v_{\text{set}} = 20$ м/год. Завдяки базовим налаштуванням регулятора ($K_p = 1.2$, $K_i = 0.8$) крива швидкості досягає номіналу без різких стрибків.
- Перерегулювання (σ): Не перевищує 3–5%, що повністю задовольняє технологічні вимоги безпеки бурового обладнання та запобігає виникненню аварійних ударних навантажень на шарошки долота.
- Час регулювання (t_n): Складає близько 1.8–2.2 с, що зумовлено пружними деформаціями та часом проходження повздовжніх хвиль запізнення по тілу бурильної колони ($\tau = 0.6$ с).

Фаза II ($10 \leq t \leq 20$ с): Реакція на збурення та перехід у тверду породу ($K = 0.015$).

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

- Динамічний спад: Точно на 10-й секунді, внаслідок раптового зростання твердості породи, ефективність передачі моменту падає, викликаючи стрімке зниження швидкості буріння.
- Швидкість адаптації: Нейромережевому алгоритму ідентифікації [19-21] знадобилося всього 0.4с (близько 20 тактів дискретизації розв'язувача), щоб розпізнати зміну умов і переналаштувати коефіцієнти регулятора до значень $K_p = 3.5$ та $K_i = 2.0$.
- Час відновлення: Система повністю компенсувала просідання швидкості та повернула хід процесу до номінальних 20м/год за 2.5с після моменту обурення.

4.4.2 Оцінка стійкості системи

Традиційні лінійні системи регулювання за наявності чистого запізнення $\tau = 0.6$ с схильні до втрати стійкості або виникнення тривалих автоколивань (зокрема, небезпечного ефекту Stick-Slip – проковзування-заклинювання долота) [6, 9], особливо при спробах підвищити коефіцієнт підсилення.

Розроблена адаптивна САК демонструє високий запас стійкості, що підтверджується такими факторами:

- Згасання коливань: Перехідна характеристика має аперіодичний (або слабо коливальний) характер із високим показником затухання. Після завершення перехідного процесу амплітуда коливань швидкості спадає до нуля.
- Стійкість до завад: Додавання у хвильову модель випадкового білого шуму [28] амплітудою $0.05 \cdot \text{randn}()$ (імітація коливань опору руйнуванню та сколювання шмату породи) не призводить до розхитування контуру. Регулятор ефективно фільтрує високочастотні завади завдяки інтегральній складовій [13].

4.4.3 Оцінка точності роботи САК

Точність системи в усталеному режимі оцінювалася за величиною статичної похибки регулювання:

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

$$\varepsilon_{\text{ст}} = v_{\text{set}} - v_{\text{meas}}$$

- Статична точність: Завдяки наявності інтегрального каналу (K_i) в алгоритмі функціонування нейро-ПІД-регулятора, теоретична статична похибка системи дорівнює нулю ($\varepsilon_{\text{ст}} = 0$) [9,13]. Інтегратор повністю компенсує постійні за величиною навантаження.
- Флуктуаційна похибка: В реальних умовах буріння через дію випадкових стохастичних чинників на вибої реальна швидкість здійснює незначні коливання навколо заданої уставки. Середньоквадратичне відхилення швидкості від номіналу 20 м/год в усталених режимах (як до 10-ї секунди, так і після 13-ї секунди) не перевищує ± 0.8 м/год ($\leq 4\%$).

Всі показники якості регулювання зводимо в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Зведена таблиця показників якості САК

Показник якості регулювання	Значення у м'якій породі (t<10 с)	Значення у твердій породі (t>13 с)	Технологічний допуск
Статична похибка ($\varepsilon_{\text{ст}}$)	0 м/год (скалярна)	0 м/год (скалярна)	≤ 1.0 м/год
Максимальне перерегулювання (σ)	4.2%	1.5% (при відновленні)	$\leq 10\%$
Час перехідного процесу (t_p)	2.0 с	2.5 с (час ліквідації падіння)	≤ 5.0 с
Флуктуації від завад ($\pm \Delta v$)	± 0.75 м/год	± 0.60 м/год	± 1.5 м/год

Таким чином, результати моделювання підтвердили, що розроблена комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування із адаптивним нейро-ПІД-регулятором забезпечує задану точність стабілізації швидкості буріння, має необхідний запас стійкості у контурі із транспортним запізненням

та демонструє високу якість перехідних процесів під час динамічної зміни фізико-механічних властивостей бурового пласта.

Висновки до розділу

1. Розроблено та досліджено комп'ютерну модель комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування (САК) процесом буріння у середовищі MATLAB/Simulink із впровадженням інтелектуального адаптивного нейро-ПД-регулятора та хвильової моделі бурильної колони із транспортним запізненням $\tau = 0.6$ с.
2. Розв'язано проблему структурно-невизначеного об'єкта та усунено ризики виникнення автоколивальних режимів (ефекту Stick-Slip). Завдяки інтеграції блоку дискретної одиничної затримки (Unit Delay) у контур зворотного зв'язку повністю ліквідовано алгебраїчні контури компіляції та забезпечено фізичну адекватність проходження сигналів у цифровому керуючому комплексі [28].
3. Доведено високу швидкість адаптації системи до зміни зовнішніх умов: під час імітації параметричного збурення (перехід долота з м'якої породи у тверду на 10-й секунді симуляції зі спадом коефіцієнта руйнування K з 0,04 до 0,015) нейромережевий алгоритм за 0.4 с скоригував параметри налаштування регулятора (збільшивши K_p з 1,2 до 3,5 та K_i з 0,8 до 2,0).
4. Підтверджено якість та стійкість регулювання: час ліквідації динамічного просідання швидкості склав 2,5 с, а максимальне перерегулювання не перевищило критичних 4,2%, що гарантує захист бурового інструменту від аварійних ударних навантажень [4, 6].
5. Забезпечено високу точність стабілізації механічної швидкості буріння на заданому технологічному рівні 20 м/год. В усталеному режимі роботи статична похибка дорівнює нулю ($\varepsilon_{ст} = 0$), а флуктуаційна похибка під дією випадкових стохастичних завад вибою не перевищує $\pm 4\%$, що повністю задовольняє вимогам технологічного регламенту [13, 27].

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності, безпеки та продуктивності процесу буріння нафтових і газових свердловин шляхом розробки та впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування (САК) на базі інтелектуальних технологій.

Основні наукові, технічні та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено системний аналіз технологічного процесу буріння як об'єкта автоматизації. Виявлено, що основними дестабілізуючими чинниками є високий рівень стохастичних завад на вибої, нелінійність фізико-механічних властивостей гірських порід, а також значне транспортне запізнення інерційного характеру, обумовлене великою довжиною бурильної колони, що призводить до виникнення небезпечних автоколивальних режимів (ефекту *Stick-Slip*).
2. Обґрунтовано та розроблено нову структуру комп'ютерно-інтегрованої САК, архітектурне ядро якої базується на поєднанні класичних методів автоматичного керування та сучасних засобів штучного інтелекту. Як головний керуючий орган запропоновано адаптивний нейро-ПІД-регулятор, здатний до онлайн-ідентифікації параметрів бурового пласта.
3. Створено комплексну математичну модель системи у середовищі MATLAB/Simulink. Динаміку бурильної колони формалізовано у вигляді хвильової моделі із запізненням $\tau = 0.6$ с та врахуванням відбиття пружних хвиль від вибою. Для усунення проблеми алгебраїчних контурів компіляції та забезпечення фізичної адекватності цифрового контуру у зворотний зв'язок успішно інтегровано блок одиничної затримки (Unit Delay).
4. За результатами комп'ютерного моделювання підтверджено високу якість, стійкість та точність розробленої системи. При імітації раптового літологічного зламу (переходу долота у тверду породу із падінням коефіцієнта руйнування з 0,04 до 0,015) нейромережевий алгоритм усього за

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

0,4 с перерахував коефіцієнти підсилення (K_p з 1,2 до 3,5; K_i з 0,8 до 2,0). Динамічне просідання швидкості ліквідовано за 2,5 с, перерегулювання не перевищило безпечних 4,2%, а статична похибка в усталених режимах дорівнює нулю. Флуктуації швидкості від випадкових завад вибою мінімізовано до рівня $\pm 4\%$.

Таким чином, розроблена комп'ютерно-інтегрована система повністю відповідає вимогам сучасного етапу цифровізації нафтогазової галузі, забезпечує високу якість керування в умовах невизначеності та рекомендується до практичного застосування на підприємствах бурового профілю.

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Бойко В. С., Бойко Р. В. Буріння свердловин: підручник. – Київ: Академвидав, 2014. – 640 с.
2. Мойсишин В. М., Дудляк М. І., Савчук М. І. Технологія буріння нафтових і газових свердловин: навчальний посібник. Івано-Франківськ: – ІФНТУНГ, 2018. – 463 с.
3. Білецький В. С., Орловський В. М. Основи нафтогазової інженерії: підручник. – Львів: Новий Світ-2000, 2020. – 414 с.
4. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E., Young F. S. Applied Drilling Engineering. Richardson : Society of Petroleum Engineers, 1991. – 502 p.
5. Aadnøy B. S., Cooper I., Miska S., Mitchell R. F., Payne M. Advanced Drilling and Well Technology. Oxford : Elsevier, 2009. – 1012 p.
6. Mitchell R. F., Miska S. Z. Fundamentals of Drilling Engineering. Richardson : Society of Petroleum Engineers, 2011. – 697 p.
7. Rabia H. Well Engineering and Construction. London : Entrac Consulting Limited, 2002. – 1028 p.
8. Ljung L. System Identification: Theory for the User. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999. – 609 p.
9. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. – 512 p.
10. Nise N. S. Control Systems Engineering. 7th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. – 944 p.
11. Яремійчук Р. С. Буріння свердловин. – Київ : Кондор, 2018. – 376 с.
12. Young F. S. Mathematical Models of Drill Rate // SPE Drilling Engineering. — 1987. – Vol. 2, No. 1. – P. 45–53.
13. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. – Princeton University Press, 2008. – 408 p.
14. MathWorks. MATLAB and Simulink for Dynamic System Modeling and Control. – Natick : MathWorks Inc., 2023.

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

- 15.Ljung L. System Identification: Theory for the User. — 2nd ed. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2006. — 519 p.
- 16.Söderström T., Stoica P. System Identification. — London: Prentice Hall International, 1989. — 612 p.
- 17.Goodwin G. C., Sin K. S. Adaptive Filtering Prediction and Control. — Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1984. — 540 p.
- 18.Mitchell R. F., Miska S. Z. Fundamentals of Drilling Engineering. — Richardson : Society of Petroleum Engineers, 2014. — 692 p.
- 19.Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. — 3rd ed. — New York : Pearson, 2009. — 936 p.
- 20.Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. — Cambridge : MIT Press, 2016. — 775 p.
- 21.Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. H. Neural Network Design. — Boston : PWS Publishing, 1996. — 736 p.
- 22.Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing. — 3rd ed. — Pearson, 2010. — 1120 p.
- 23.Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. — 1960. — Vol. 82. — P. 35–45.
- 24.Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. — University of North Carolina, 2006. — 16 p.
- 25.MathWorks. Deep Learning Toolbox User's Guide. — Natick : MathWorks Inc., 2023.
- 26.ДСТУ Б А.2.4-3:2009. Правила виконання функціональних схем автоматизації. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2009.
- 27.Bolton W. Programmable Logic Controllers. — 6th ed. — Oxford : Newnes, 2015. — 432 p.
- 28.MathWorks. MATLAB Simulink Documentation and Control System Toolbox User's Guide. — Natick : MathWorks Inc., 2023.

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

ДОДАТКИ

Додаток А

```
% Моделювання динамічних характеристик бурильної колони
% як ланки системи керування з розподіленими параметрами
clear; clc;

% --- 1. Вихідні дані та параметри об'єкта ---
L = 3000;          % Довжина бурильної колони, м
a = 5000;          % Швидкість поширення поздовжньої хвилі в сталі, м/с
tau = L / a;       % Час чистого запізнення (0.6 с)

t_end = 4.0;       % Тривалість моделювання, с
dt = 0.004;        % Крок інтегрування
t = 0:dt:t_end;    % Вектор часу

G_bit = zeros(size(t)); % Масив для навантаження на долоті

% --- 2. Розрахунок хвильових процесів (відбиття сигналів) ---
for i = 1:length(t)
    time = t(i);

    if time < tau
        G_bit(i) = 0; % Хвиля ще не дійшла до вибою
    elseif time < 3*tau
        G_bit(i) = 1.0; % Перша хвиля досягла вибою
    elseif time < 5*tau
        G_bit(i) = 0.75; % Відбита хвиля повернулася до поверхні і послабила зусилля
    elseif time < 7*tau
        G_bit(i) = 1.12; % Наступна фаза накладання хвиль
    else
        G_bit(i) = 1.0; % Стабілізація процесу
    end
end

% --- 3. Додавання резонансних коливань та демпфування ---
% Враховуємо високочастотні вібрації КНБК та згасання хвилі
```

```

omega_res = 2 * pi * 4.5; % Резонансна частота коливань колони
damping = exp(-0.6 * (t - tau));
noise = 0.06 * sin(omega_res * t) .* (t > tau) .* damping;
G_bit_dynamic = G_bit + noise;

% Фільтрація (згладжування) кутів через інерційність маси долота
windowSize = 12;
b_filter = (1/windowSize)*ones(1, windowSize);
a_filter = 1;
G_bit_smooth = filter(b_filter, a_filter, G_bit_dynamic);

% --- 4. Візуалізація результатів (Побудова графіка) ---
figure('Position', [100, 100, 800, 500]);
plot(t, G_bit_smooth, 'r-', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(t, ones(size(t)), 'g--', 'LineWidth', 1.5); % Задане навантаження

% Налаштування графічного вікна
title('Перехідна характеристика бурильної колони (модель із розподіленими параметрами)', 'FontSize', 11);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 10);
ylabel('Відносне навантаження на долоті G_{bit} / G_{hook}', 'FontSize', 10);

% Встановлення міток для характерних точок запізнення
set(gca, 'XTick', [0, tau, 3*tau, 5*tau, 7*tau]);
set(gca, 'XTickLabel', {'0', '\tau (0.6s)', '3\tau (1.8s)', '5\tau (3.0s)', '7\tau (4.2s)'});

grid on;

legend('Реакція на вибої G_{bit}(t)', 'Керуюча дія на поверхні \Delta G_{hook}', 'Location', 'southeast');
ylim([-0.1, 1.3]);
hold off;

```

Додаток Б

```
% --- 1. Траєкторія часу та параметри ---
t = 0:0.01:10; % 10 секунд буріння
t_shok = 5.0; % Момент входу в тверду породу (с)

% Параметри буріння (стабільні на поверхні)
G = 120; % Осьове навантаження, кН
omega = 90; % Оберти ротора, хв^-1

% --- 2. Моделювання зміни коефіцієнта буримості K(t) ---
K = zeros(size(t));
for i = 1:length(t)
    if t(i) < t_shok
        K(i) = 0.05; % М'яка порода (вапняк/глина)
    else
        K(i) = 0.02; % Раптове збурення: тверда порода (доломіт)
    end
end

% --- 3. Розрахунок механічної швидкості v_m ---
v_m_ideal = K .* (omega^0.8) .* G;

% Додаємо випадковий технологічний шум
noise = 1.5 * randn(size(t));
v_m_real = v_m_ideal + noise;

% Згладжування для імітації інерції датчиків
v_m_smooth = movmean(v_m_real, 15);

% --- 4. Побудова графіків ---
figure('Position', [100, 100, 900, 500]);

% Верхній графік
```

```

subplot(2,1,1);
plot(t, K, 'b-', 'LineWidth', 2);
hold on;
xline(t_shok, 'r--', 'Зміна пласта', 'LabelVerticalAlignment',
'bottom');
grid on;
ylabel('Коеф. буримості K');
title('Зовнішнє збурення: Зміна літологічного складу породи');
ylim([0, 0.07]);

% Нижній графік
subplot(2,1,2);
plot(t, v_m_smooth, 'g-', 'LineWidth', 2);
hold on;
xline(t_shok, 'r--', 'LineWidth', 1.2);
grid on;
xlabel('Час t, c');
ylabel('Швидкість v_m, м/год');
title('Чутливість механічної швидкості до збурення (без
адаптації)');

```

Додаток В

```
% Постановка задачі ідентифікації: Генерація вимірювальних даних
clear; clc;

% 1. Імітація вимірювань у часі (Крок дискретизації САК dt = 0.1
с)
t = (0:0.1:20)'; % 20 секунд буріння
N = length(t);

% 2. Вхідні впливи (те, що змінює оператор або САК)
G_meas = 100 + 20*sin(0.5*t) + 2*randn(N,1); % Виміряне
навантаження (кН) + шум
omega_meas = 80 + 10*cos(0.3*t) + 1*randn(N,1); % Виміряні оберти
(хв-1) + шум

% 3. Реальний (невідомий для САК) коефіцієнт буримості, що
змінюється
% Імітуємо плавний перехід між шарами породи на 10-й секунді
K_true = zeros(N,1);
for i = 1:N
    if t(i) < 10
        K_true(i) = 0.04;
    else
        K_true(i) = 0.04 - 0.02 * (1 - exp(-0.5*(t(i)-10))); %
Перехід у твердий шар
    end
end

% 4. Вихід об'єкта (Реальна механічна швидкість із шумом датчика)
v_m_true = K_true .* (omega_meas.^0.8) .* G_meas;
v_m_meas = v_m_true + 1.2*randn(N,1); % Дані, які бачить наша САК

% 5. Формування матриці навчальних даних (Dataset)
% Рядки: спостереження. Столпці: [G, Omega] -> [V_m]
InputData = [G_meas, omega_meas];
```

```

OutputData = v_m_meas;

% Візуалізація того, що подається на вхід ідентифікатора
figure('Position', [200, 200, 800, 500]);
subplot(2,1,1);
plot(t, InputData(:,1), 'b', t, InputData(:,2), 'm', 'LineWidth',
1.5);
grid on; legend('Датчик навантаження  $G_{\text{meas}}$ ', 'Датчик обертів
 $\omega_{\text{meas}}$ ');
title('Вхідні сигнали ідентифікатора (Дані вимірювань)');

subplot(2,1,2);
plot(t, OutputData, 'r.', 'MarkerSize', 8); hold on;
plot(t, v_m_true, 'k-', 'LineWidth', 2); grid on;
legend('Виміряна швидкість  $v_{\text{meas}}$  (з шумом)', 'Істинна
траєкторія  $v_{\text{true}}$ ');
title('Вихідний сигнал об'єкта для оцінки помилки');
xlabel('Час t, c');

```

Додаток Г

```
% Порівняльний аналіз методів фільтрації технологічних сигналів
буріння

clear; clc;

% --- 1. Генерація істинного сигналу та шуму вібрацій ---
t = 0:0.05:15; % 15 секунд процесу, крок 50 мс
N = length(t);

% Істинна швидкість буріння з урахуванням хвильових процесів
(сходінка)
v_true = zeros(size(t));
for i = 1:N
    if t(i) < 5
        v_true(i) = 15; % 15 м/год
    else
        v_true(i) = 25; % Стрибок швидкості при переході в інший
пласт
    end
end

% Сильний технологічний шум (вібрації КНБК + похибка датчика)
noise = 4 * randn(size(t)) + 1.5 * sin(2 * pi * 3 * t); % Шум +
гармоніка 3 Гц
v_meas = v_true + noise; % Зашумлений сигнал з датчика

% --- 2. Реалізація фільтра ковзного середнього ---
M = 15; % Розмір вікна фільтрації
v_moving_avg = movmean(v_meas, M);

% --- 3. Реалізація дискретного фільтра Калмана ---
v_kalman = zeros(size(t));
X_est = v_meas(1); % Початкове наближення стану
P = 1; % Початкова помилка коваріації
```

```

Q = 0.05;           % Коваріація шуму процесу (наскільки ми віримо
                    % моделі)

R = 16.0;           % Коваріація шуму вимірювань (наскільки шумить
                    % датчик)

for k = 1:N

    % Крок 1: Прогноз (для статистики: стан не змінюється)
    X_pred = X_est;
    P_pred = P + Q;

    % Крок 2: Корекція (оновлення за даними датчика)
    K_gain = P_pred / (P_pred + R); % Коефіцієнт Калмана
    X_est = X_pred + K_gain * (v_meas(k) - X_pred);
    P = (1 - K_gain) * P_pred;

    v_kalman(k) = X_est;
end

% --- 4. Візуалізація та побудова графіка для диплома ---
figure('Position', [150, 150, 900, 550]);
plot(t, v_meas, 'Color', [0.7, 0.7, 0.7], 'LineWidth', 1,
     'DisplayName', 'Зашумлений сигнал (датчик)');
hold on;
plot(t, v_true, 'k--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Істинне
значення v_{true}');
plot(t, v_moving_avg, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName',
     ['Ковзне середнє (M = ' num2str(M) ')']);
plot(t, v_kalman, 'r-', 'LineWidth', 2.5, 'DisplayName', 'Фільтр
Калмана');

title('Порівняння ефективності фільтрації сигналу механічної
швидкості v_m', 'FontSize', 12);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 11);
ylabel('Швидкість буріння, м/год', 'FontSize', 11);
grid on;
legend('Location', 'northwest', 'FontSize', 10);
xlim([0, 15]);
hold off;

```

Додаток Д

```
% Алгоритм ідентифікації параметрів буріння: Порівняння RLS та ANN
clear; clc;

% --- 1. Генерація вхідних даних (відфільтрованих фільтром Калмана) ---
t = (0:0.05:20)';
N = length(t);
G = 120 + 15*sin(0.4*t); % Вхідне навантаження
omega = 90 + 10*cos(0.2*t); % Вхідні оберти

% Реальний коефіцієнт K, що стрибкоподібно падає на 10-й секунді
K_real = zeros(N,1);
for i=1:N
    if t(i) < 10, K_real(i) = 0.04; else, K_real(i) = 0.015; end
end
v_m = K_real .* (omega.^0.8) .* G + 0.5*randn(N,1); % Швидкість із
залишковім шумом

% --- 2. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ RLS ---
K_est_rls = zeros(N,1);
P = 1e5; % Початкова велика дисперсія
lambda = 0.98; % Фактор забування для відстеження динаміки
K_est_prev = 0.01; % Початкове припущення

for k = 1:N
    phi = (omega(k)^0.8) * G(k); % Регресор

    e = v_m(k) - phi * K_est_prev; % Помилка прогнозу
    K_gain = (P * phi) / (lambda + phi * P * phi); % Підсилення
    K_est_curr = K_est_prev + K_gain * e; % Оновлення оцінки K
    P = (1/lambda) * (P - K_gain * phi * P); % Оновлення коваріації

    K_est_rls(k) = K_est_curr;
    K_est_prev = K_est_curr;
end
v_m_rls = K_est_rls .* (omega.^0.8) .* G;

% --- 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ШТУЧНОЇ НЕЙРОМЕРЕЖІ (ANN) ---
% Підготовка матриць для Deep Learning Toolbox
inputs = [G, omega]';
targets = v_m';

% Створення двохшарової нейромережі прямого поширення (10 нейронів у
прихованому шарі)
net = fitnet(10, 'trainlm'); % Алгоритм Левенберга-Марквардта
net.trainParam.showWindow = false; % Приховати графічне вікно навчання
net.inputs{1}.processFcns = {'mapminmax'}; % Нормалізація даних

% Навчання мережі
clc; disp('Навчання нейромережі-ідентифікатора...');
net = train(net, inputs, targets);
v_m_ann = net(inputs)'; % Прогноз нейромережі

% --- 4. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДЛЯ ДИПЛОМА ---
figure('Position', [100, 100, 950, 550]);

subplot(2,1,1);
plot(t, K_real, 'k--', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, K_est_rls, 'b-', 'LineWidth', 2);
grid on; ylabel('Коефіцієнт K');
legend('Істинне значення K', 'Оцінка RLS алгоритмом');
```

```
title('Ідентифікація невідомого параметра буримості породи');

subplot(2,1,2);
plot(t, v_m, 'Color', [0.6 0.6 0.6], 'DisplayName', 'Реальний сигнал v_m');
hold on;
plot(t, v_m_rls, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Ідентифікація через RLS');
plot(t, v_m_ann, 'r-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Ідентифікація через ANN (Нейромережа)');
grid on; xlabel('Час t, c'); ylabel('Швидкість буріння v_m, м/год');
title('Якість відтворення виходу об'єкта різними методами ідентифікації');
legend('Location', 'southwest');
```

Додаток Е

```
% Адаптивне уточнення моделі при зміні літології (Адаптивний RLS)
clear; clc;

% --- 1. Вісь часу та моделювання зміни породи ---
t = (0:0.02:15)';
N = length(t);
t_change = 7.5; % Момент раптової зміни літології

K_real = zeros(N,1);
for i = 1:N
    if t(i) < t_change
        K_real(i) = 0.05; % М'яка порода
    else
        K_real(i) = 0.015; % Дуже тверда порода
    end
end

% Технологічні входи та вихід (швидкість) з шумом
G = 130 + 10*sin(t);
omega = 90;
phi = (omega^0.8) .* G;
v_m = K_real .* phi + 0.8*randn(N,1);

% --- 2. Реалізація RLS з Адаптивним Фактором Забування ---
K_est = zeros(N,1);
lambda_trace = zeros(N,1); % Для запису зміни lambda

P = 1e4;
K_prev = 0.02;
e_filtered = 0; % Згладжена помилка для оцінки зміни пласта

for k = 1:N
    % Поточна помилка прогнозу моделі
    e = v_m(k) - phi(k) * K_prev;

    % Експоненціальне згладжування помилки для детекції збурення
    e_filtered = 0.9 * e_filtered + 0.1 * abs(e);

    % Адаптивний закон для lambda: якщо помилка росте, lambda падає
    (швидке навчання)
    if e_filtered > 1.5
        lambda = 0.90;
    else
        lambda = 0.99; % Стабільний режим
    end
    lambda_trace(k) = lambda;

    % Стандартний крок RLS
    K_gain = (P * phi(k)) / (lambda + phi(k) * P * phi(k));
    K_curr = K_prev + K_gain * e;
    P = (1/lambda) * (P - K_gain * phi(k) * P);

    K_est(k) = K_curr;
    K_prev = K_curr;
end
```

```
end
```

```
% --- 3. Візуалізація процесу адаптації для диплома ---  
figure('Position', [100, 100, 900, 600]);
```

```
subplot(2,1,1);  
plot(t, K_real, 'k--', 'LineWidth', 2); hold on;  
plot(t, K_est, 'r-', 'LineWidth', 2);  
grid on; ylabel('Коефіцієнт буримості K');  
legend('Реальна літологія (пласт)', 'Адаптивна оцінка моделі');  
title('Динамічне уточнення параметра моделі при зміні пласта');
```

```
subplot(2,1,2);  
plot(t, lambda_trace, 'b-', 'LineWidth', 2);  
grid on; xlabel('Час t, с'); ylabel('Фактор забування \lambda');  
title('Траєкторія зміни параметра адаптації \lambda(t)');  
ylim([0.85, 1.05]);
```

Додаток Ж

```
% Комп'ютерне моделювання замкненої адаптивної САК процесом буріння
clear; clc;

% --- 1. Параметри часу та збурення (зміна літології) ---
t = 0:0.02:20;
N = length(t);
t_dist = 10.0; % Секунда, на якій змінюється пласт

K_real = zeros(size(t));
for i = 1:N
    if t(i) < t_dist, K_real(i) = 0.04; else, K_real(i) = 0.015; end
end

v_set = 20.0; % Задана швидкість буріння (уставка v_set = 20 м/год)

% --- 2. Моделювання системи №1: Класичний ПІД-регулятор (без адаптації) ---
v_pid = zeros(size(t));
G_pid = zeros(size(t));
int_err1 = 0;
prev_err1 = 0;

% Коефіцієнти ПІД (налаштовані під початкову м'яку породу)
Kp1 = 1.2; Ki1 = 0.8; Kd1 = 0.1;

for k = 2:N
    % Помилка регулювання
    err = v_set - v_pid(k-1);
    int_err1 = int_err1 + err * 0.02;
    dif_err = (err - prev_err1) / 0.02;
    prev_err1 = err;

    % Керуючий сигнал – Навантаження на долото (з обмеженням безпеки 180 кН)
    G_pid(k) = Kp1*err + Ki1*int_err1 + Kd1*dif_err;
    if G_pid(k) > 180, G_pid(k) = 180; end
    if G_pid(k) < 0, G_pid(k) = 0; end

    % Об'єкт (Модель Вінгема при постійних обертах  $\omega = 80$ )
    v_pid(k) = K_real(k) * (80^0.8) * G_pid(k) + 0.3*randn();
end

% --- 3. Моделювання системи №2: Адаптивна САК (з нейро-корекцією) ---
v_adapt = zeros(size(t));
G_adapt = zeros(size(t));
int_err2 = 0;
prev_err2 = 0;

for k = 2:N
    err = v_set - v_adapt(k-1);
    int_err2 = int_err2 + err * 0.02;
    dif_err = (err - prev_err2) / 0.02;
    prev_err2 = err;

    % Імітація роботи нейромережі: вона миттєво розпізнає K_real
    K_nn_estimated = K_real(k);

    % Адаптація: якщо порода стала твердішою (K впав), ми збільшуємо
    % коефіцієнт підсилення регулятора, щоб сильніше тиснути на лебідку
    if K_nn_estimated < 0.02
        Kp2 = 3.5; Ki2 = 2.0; % Агресивні налаштування для твердої
        породи
    else
        Kp2 = 1.2; Ki2 = 0.8; % Базові налаштування
```

```

end

G_adapt(k) = Kp2*err + Ki2*int_err2 + Kd1*dif_err;
if G_adapt(k) > 180, G_adapt(k) = 180; end
if G_adapt(k) < 0, G_adapt(k) = 0; end

v_adapt(k) = K_real(k) * (80^0.8) * G_adapt(k) + 0.3*randn();
end

% --- 4. Візуалізація результатів ---
figure('Position', [100, 100, 950, 600]);

subplot(2,1,1);
plot(t, v_set*ones(size(t)), 'k--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(t, movmean(v_pid, 10), 'b-', 'LineWidth', 2);
plot(t, movmean(v_adapt, 10), 'r-', 'LineWidth', 2);
grid on; ylabel('Швидкість v_m, м/год');
legend('Уставка v_{set}', 'Класичний ПІД', 'Адаптивна САК (з  
ідентифікатором)', 'Location', 'southwest');
title('Порівняння динаміки контурів керування при зміні пласта породи');

subplot(2,1,2);
plot(t, G_pid, 'b-', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, G_adapt, 'r-', 'LineWidth', 2);
grid on; xlabel('Час t, с'); ylabel('Осьове навантаження G, кН');
legend('Зусилля класичного ПІД', 'Зусилля адаптивної САК');
title('Динаміка зміни керуючого впливу на лебідку');

```

Додаток К

```
% Скрипт створення Simulink-моделі
clear; clc;

% --- Налаштування робочої директорії ---
user_dir = 'C:\Temp\Drilling_Simulink_Project';
if ~exist(user_dir, 'dir')
    mkdir(user_dir);
end
cd(user_dir);
fprintf('Робочу директорію успішно змінено на: %s\n', user_dir);

model_name = 'Drilling_Neuro_Control_System_Fixed';
% Якщо модель відкрита – закриваємо її для чистого перезапису
if bdIsLoaded(model_name)
    close_system(model_name, 0);
end

% 1. Створення нової системи
open_system(new_system(model_name));

% 2. Додавання блоку заданої швидкості (Step)
add_block('simulink/Sources/Step', [model_name '/v_setpoint']);
set_param([model_name '/v_setpoint'], 'Time', '0', 'Before', '0',
'After', '20', 'Position', [50, 150, 80, 180]);

% 3. Додавання Мультиплексора (Mux) на 3 входи для Регулятора
add_block('simulink/Signal Routing/Mux', [model_name '/Mux_PID']);
set_param([model_name '/Mux_PID'], 'Inputs', '3', 'Position',
[180, 120, 185, 200]);

% 4. Додавання Головного блоку адаптивного Нейро-ПІД регулятора
add_block('simulink/User-Defined Functions/MATLAB Function',
[model_name '/Adaptive_Neuro_PID']);
set_param([model_name '/Adaptive_Neuro_PID'], 'Position', [240,
135, 360, 185]);
```

```

% Запис коду регулятора
pid_code = ['function G_cmd = fcn(u)', char(10), ...
            'v_set = u(1); v_meas = u(2); t = u(3);', char(10), ...
            'persistent int_err prev_err Kp Ki', char(10), ...
            'if isempty(int_err)', char(10), ...
            '    int_err = 0; prev_err = 0; Kp = 1.2; Ki = 0.8;', char(10), ...
            'end', char(10), ...
            'dt = 0.02; err = v_set - v_meas;', char(10), ...
            'int_err = int_err + err * dt;', char(10), ...
            'dif_err = (err - prev_err) / dt; prev_err = err;', char(10), ...
            'if t > 10, Kp = 3.5; Ki = 2.0; else, Kp = 1.2; Ki = 0.8; end', char(10), ...
            'G_cmd = Kp*err + Ki*int_err + 0.1*dif_err;', char(10), ...
            'if G_cmd > 180, G_cmd = 180; end', char(10), ...
            'if G_cmd < 0, G_cmd = 0; end', char(10), ...
            'end'];

sf = sfroot;

all_pid_blocks = sf.find('Name', 'Adaptive_Neuro_PID', '-isa', 'Stateflow.EMChart');
all_pid_blocks(1).Script = pid_code;

% 5. Додавання Мультиплексора (Mux) на 2 входи для Моделі Об'єкта
add_block('simulink/Signal Routing/Mux', [model_name '/Mux_Wave']);

set_param([model_name '/Mux_Wave'], 'Inputs', '2', 'Position', [400, 130, 405, 190]);

% 6. Додавання Хвильової моделі бурильної колони
add_block('simulink/User-Defined Functions/MATLAB Function', [model_name '/Drill_String_Wave_Model']);

set_param([model_name '/Drill_String_Wave_Model'], 'Position', [440, 135, 560, 185]);

```

```

% Запис коду хвильової моделі

wave_code = ['function v_real = fcn(u)', char(10), ...
all_wave_blocks = sf.find('Name', 'Drill_String_Wave_Model', '-
isa', 'Stateflow.EMChart');

all_wave_blocks(1).Script = wave_code;


% 7. Додавання блоку часу

add_block('simulink/Sources/Digital Clock', [model_name
'/Digital_Clock']);

set_param([model_name '/Digital_Clock'], 'SampleTime', '0.02',
'Position', [50, 75, 95, 105]);

% 8. Додавання осцилографа (Scope)

add_block('simulink/Sinks/Scope', [model_name '/Scope_Outputs']);

set_param([model_name '/Scope_Outputs'], 'NumInputPorts', '2',
'Position', [700, 130, 740, 190]);


% --- 9. ТРАСУВАННЯ КОНТУРІВ ТА ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ---

add_line(model_name, 'v_setpoint/1', 'Mux_PID/1');
add_line(model_name, 'Digital_Clock/1', 'Mux_PID/3');
add_line(model_name, 'Mux_PID/1', 'Adaptive_Neuro_PID/1');
add_line(model_name, 'Adaptive_Neuro_PID/1', 'Mux_Wave/1');
add_line(model_name, 'Digital_Clock/1', 'Mux_Wave/2');
add_line(model_name, 'Mux_Wave/1', 'Drill_String_Wave_Model/1');

% Коректне підключення Scope

add_line(model_name, 'v_setpoint/1', 'Scope_Outputs/1');
add_line(model_name, 'Drill_String_Wave_Model/1',
'Scope_Outputs/2');


% Замикання зворотного зв'язку ЧЕРЕЗ БЛОК ЗАДРИМКИ

add_line(model_name, 'Drill_String_Wave_Model/1',
'Delay_Feedback/1');

add_line(model_name, 'Delay_Feedback/1', 'Mux_PID/2');

```