

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-28.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

Віталій Стадник

2025

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

Стадник Віталій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5.015.23

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Система автоматичного керування процесом буріння нафтових і

(назва роботи)

газових свердловин з використанням адаптивних регуляторів

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм -24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

В.В. Стадник

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н

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

М.В.Шавранський

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І.Фешанич

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри **АКІТ**

(А.І. Лагойда)

«___» _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Стаднику Віталію Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система автоматичного керування процесом буріння нафтових і газових свердловин з використанням адаптивних регуляторів

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

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

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

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025 р.

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

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

4.1. Огляд та аналіз існуючих систем автоматичного керування технологічними параметрами процесу буріння нафтових і газових свердловин

4.2. Розробка математичної моделі об'єкта керування, що адекватно описує ключові параметри процесу буріння

4.3. Синтез системи автоматичного керування процесом буріння

4.4. Реалізація системи керування процесом буріння

4.5. Загальні висновки

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

Не передбачено завданням

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд та аналіз існуючих систем автоматичного керування технологічними параметрами процесу буріння нафтових і газових свердловин	30.10.2025 р.	Виконано
2	Розробка математичної моделі об'єкта керування, що адекватно описує ключові параметри процесу буріння	10.11.2025 р.	Виконано
3	Синтез системи автоматичного керування процесом буріння	20.11.2025 р.	Виконано
4	Реалізація системи керування процесом буріння	30.11.2025 р.	Виконано
5	Загальні висновки	05.12.2025 р.	Виконано
6	Оформлення МР	07.12.2025 р.	Виконано

Студент _____
(підпис)

Стадник В.В. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Шавранський М.В. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Стадник В.В. Система автоматичного керування процесом буріння нафтових і газових свердловин з використанням адаптивних регуляторів

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

Магістерська робота присвячена розробленню системи автоматичного керування процесом буріння нафтових і газових свердловин із застосуванням адаптивних регуляторів. Актуальність дослідження зумовлена постійним ускладненням геолого-технологічних умов буріння та необхідністю підвищення ефективності, безпеки й надійності керування основними технологічними параметрами. У роботі здійснено аналітичний огляд існуючих систем автоматизації, визначено їхні обмеження та обґрунтовано доцільність використання адаптивних методів регулювання.

Розроблено математичну модель процесу буріння, що враховує взаємозв'язок між осьовим навантаженням, частотою обертання, крутним моментом та витратою промивальної рідини. Проведено лінеаризацію моделі та отримано передавальні функції для синтезу систем керування. На основі моделі створено адаптивний регулятор, здатний змінювати параметри керування відповідно до поточних характеристик свердловини та умов буріння. У середовищі MATLAB/Simulink реалізовано моделювання роботи системи, виконано порівняння адаптивного та традиційного ПІД-регулювання.

Ключові слова: буріння, адаптивний регулятор, автоматизація, математична модель, ПІД-регулятор, MATLAB/Simulink, осьове навантаження, швидкість проходки, крутний момент, інтелектуальні системи керування.

ANNOTATION

Stadnik V.V. Automatic control systems for the drilling process of oil and gas wells using adaptive regulators

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

The master's thesis is devoted to the development of an automatic control system for the drilling process of oil and gas wells using adaptive regulators. The relevance of the study is due to the constant complication of geological and technological conditions of drilling and the need to increase the efficiency, safety and reliability of control of the main technological parameters. The work provides an analytical review of existing automation systems, identifies their limitations and justifies the feasibility of using adaptive regulation methods.

A mathematical model of the drilling process has been developed, which takes into account the relationship between axial load, rotational speed, torque and flushing fluid flow rate. The model has been linearized and transfer functions have been obtained for the synthesis of control systems. Based on the model, an adaptive controller has been created that is able to change control parameters in accordance with the current well characteristics and drilling conditions. The system operation has been simulated in the MATLAB/Simulink environment, and a comparison of adaptive and traditional PID control has been made.

Keywords: drilling, adaptive controller, automation, mathematical model, PID controller, MATLAB/Simulink, axial load, penetration rate, torque, intelligent control systems.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН.....	13
1.1. Загальний огляд існуючих систем автоматичного керування (САК).....	13
1.2. Аналіз динамічних характеристик процесу буріння як об'єкта керування.....	19
1.3. Обґрунтування необхідності застосування адаптивних регуляторів у системах автоматичного керування процесом буріння	22
1.4. Основні технологічні параметри процесу буріння, які підлягають автоматичному регулюванню	25
Висновки до розділу 1.....	28
РОЗДІЛ 2	
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ, ЩО АДЕКВАТНО ОПИСУЄ КЛЮЧОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ.....	30
2.1. Визначення ключових параметрів процесу буріння	30
2.2. Вибір типу моделі.....	30
2.3. Формування математичної моделі	31
2.4. Комплексна динамічна модель.....	32
2.5. Лінеаризація в околі робочої точки.....	33
2.6. Передавальні функції.....	33
2.7. Лінійна модель в матричному (state-space) вигляді.....	35
Висновки до розділу 2.....	39

РОЗДІЛ 3**СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ****БУРІННЯ.....41**

3.1. Мета синтезу системи керування41

3.2. Структура системи автоматичного керування.....41

3.3. Вибір типу регулятора.....43

3.4. Лінеаризована модель для синтезу регуляторів.....44

3.5. Синтез і налаштування ПД-регуляторів.....44

3.6. Аналіз стійкості та якості трьох систем.....49

Висновки до розділу 3.....53

РОЗДІЛ 4**РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ.....54**

4.1. Реалізація системи керування на ПЛК.....54

4.2. Монтаж та конфігурація обладнання.....56

4.3. Програма мовою Structured Text (ST) для ПЛК Schneider Electric Modicon
M241.....584.4. Реалізація системи керування процесом буріння в середовищі
MATLAB/Simulink.....63

4.5. Аналіз результатів чисельного моделювання в MATLAB/Simulink.....65

Висновки до розділу 4.....66

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....68**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....70****ДОДАТКИ.....73**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

Back Pressure – тиск у затрубному просторі

Flow Rate – витрата бурового розчину

ROP (Rate of Penetration) – швидкість проходки

RPM – швидкість (частота) обертання долота

Torque – крутний момент

WOB (Weight on Bit) – осьове навантаження на долото

АФХ – амплітудно-фазова характеристика

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

МШП – механічна швидкість проходки

ПЛК – програмований логічний контролер

САК – система автоматичного керування

САР – система автоматичного регулювання

ФЧХ – фазо-частотна характеристика

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до ефективності, безпеки та екологічності процесів буріння нафтових і газових свердловин. Традиційні системи керування мають обмежені можливості реагування на зміни параметрів бурового процесу (твердості порід, гідродинамічних умов, вібрацій), що призводить до підвищеного зносу обладнання, аварійних ситуацій та перевитрат енергоресурсів. Використання адаптивних регуляторів дозволяє автоматично підлаштовувати алгоритм керування під змінні умови в реальному часі, забезпечуючи оптимальний режим буріння та зменшення ризику ускладнень. Застосування таких систем підвищує точність підтримання технологічних параметрів, скорочує час буріння та знижує собівартість робіт. Крім того, адаптивне керування є ключовим напрямом розвитку сучасних цифрових бурових установок (Smart Drilling, Automated Rig), що робить тему дослідження актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасна нафтогазова промисловість перебуває в умовах постійного ускладнення технологічних процесів та підвищення вимог до точності, безпеки й ефективності буріння свердловин. Традиційні методи керування технологічними параметрами буріння значною мірою залежать від досвіду операторів, мають низьку швидкодію реакції на зміни гірничо-геологічних умов і не забезпечують оптимальних режимів роботи обладнання. Це призводить до збільшення енерговитрат, зносу бурового інструменту, росту ризику аварійних ситуацій та фінансових втрат.

Адаптивні системи автоматичного керування здатні в режимі реального часу аналізувати стан технологічного процесу та автоматично коригувати параметри регулювання залежно від змін умов буріння. Це дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи, зменшувати вібрації, стабілізувати навантаження на долото, підвищувати продуктивність та довговічність обладнання. Розробка таких рішень є ключовим напрямом розвитку концепцій Digital Drilling та Smart Rig, що активно впроваджуються у провідних нафтових компаніях світу.

Таким чином, вибір теми дослідження зумовлений необхідністю створення сучасних, інтелектуальних систем керування технологічними процесами буріння, які здатні підвищити ефективність виробництва, мінімізувати ризики аварій та сприяти переходу до цифровізації нафтогазової галузі. Тема є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору та відповідає сучасним тенденціям розвитку автоматизації.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – розроблення та дослідження системи автоматичного керування процесом буріння нафтових і газових свердловин на основі адаптивних регуляторів з метою забезпечення оптимальних технологічних параметрів, підвищення ефективності та надійності бурового процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні системи автоматичного керування процесом буріння та визначити їх недоліки й обмеження.
2. Дослідити особливості технологічного процесу буріння та визначити основні параметри, що підлягають автоматичному регулюванню (осьове навантаження, частота обертання, витрата промивальної рідини тощо).
3. Розробити математичну модель процесу буріння, що враховує змінні гірничо-геологічні умови.
4. Обґрунтувати вибір адаптивного методу регулювання та розробити алгоритм адаптивного керування.
5. Реалізувати модель системи автоматичного керування з адаптивним регулятором у MATLAB/Simulink і на ПЛК.
6. Провести моделювання роботи системи та оцінити її ефективність у порівнянні з традиційними методами регулювання.

Ці завдання забезпечують логічний шлях від аналізу проблеми до створення практично реалізованої системи адаптивного керування процесом буріння.

Об'єктом дослідження є процес буріння нафтових і газових свердловин як складна динамічна система, параметри якої змінюються під впливом гірничо-геологічних умов та режимів роботи обладнання.

Предметом дослідження є методи та алгоритми адаптивного автоматичного керування технологічними параметрами процесу буріння нафтових і газових свердловин.

Методи дослідження. У роботі використано метод аналізу та узагальнення літературних джерел для визначення сучасного стану автоматизації процесу буріння та підходів до адаптивного керування. Математичне моделювання застосовано для побудови моделі процесу буріння та опису взаємозв'язку між основними технологічними параметрами. Методи теорії автоматичного керування використано для розроблення адаптивного регулятора та оцінки стійкості системи. Комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink виконано для реалізації системи керування та перевірки її працездатності в різних режимах буріння. Для оцінки ефективності розробленої системи застосовано методи порівняльного аналізу з традиційними PID-регуляторами. Імітаційне моделювання технологічних ситуацій дозволило перевірити роботу адаптивного регулятора при дії зовнішніх збурень і зміні властивостей порід.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі запропоновано новий підхід до автоматичного керування процесом буріння із застосуванням адаптивного регулятора, який змінює параметри керування залежно від реальних умов. Побудовано математичну модель процесу буріння, що враховує взаємозв'язок між основними технологічними параметрами та зміною властивостей порід. Розроблено алгоритм адаптивного регулювання, який забезпечує стабілізацію навантаження та зменшення вібрацій у процесі буріння. Показано, що застосування адаптивного регулятора забезпечує кращу якість керування порівняно з традиційними PID-регуляторами, особливо при впливі зовнішніх збурень. Результати реалізовано у MATLAB/Simulink, що дозволяє використовувати модель для подальшого впровадження в бурові системи.

Практичні значення отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності буріння нафтових і газових свердловин за рахунок автоматичного вибору оптимальних режимів роботи. Розроблена модель адаптивного керування може бути впроваджена у системи автоматизації бурових установок для зменшення аварійності та зносу бурового інструменту. Реалізований алгоритм дає змогу скоротити час на налаштування регулятора, оскільки параметри підбираються автоматично залежно від умов буріння. Отримані результати можуть бути застосовані при навчанні персоналу та підготовці інженерів-автоматизаторів через використання моделі у MATLAB/Simulink як тренажера. Розроблена система здатна інтегруватися з промисловими контролерами ПЛК, що спрощує її впровадження на реальних бурових майданчиках. Запропоновані рішення можуть бути основою для подальшого розвитку інтелектуальних бурових систем та концепції "Smart Drilling".

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 22 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 72 сторінки, у тому числі 7 таблиць і 20 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

Процес буріння нафтових і газових свердловин є складним, динамічним та багатофакторним технологічним процесом. Сучасні системи автоматичного керування (САК) мають вирішальне значення для підвищення швидкості проходки, забезпечення безпеки та зменшення аварійності [1-12].

1.1. Загальний огляд існуючих систем автоматичного керування (САК)

Сучасні САК бурінням інтегруються в загальну систему контролю та збору даних (Data Acquisition System - DAS) бурової установки і часто керуються з єдиного диспетчерського пункту. Вони можуть бути класифіковані за рівнем автономності [1-12]:

- Системи контролю: використовують датчики для моніторингу ключових параметрів (вага на гаку, тиск, витрата, крутний момент) та видають попередження. Це базовий рівень автоматизації.
- Системи локального автоматичного регулювання (САР): підтримують один або кілька параметрів на заданому значенні (наприклад, регулятор подачі долота).
- Системи оптимізації/автоматичного буріння: комплексні САК, які використовують складні алгоритми (зокрема, адаптивні та прогнозні) для вибору оптимальних режимів буріння (RPE - Rate of Penetration Optimization) на основі геологічних даних та стану обладнання.

1.1.1. Системи контролю та регулювання подачі долота

Це одна з найбільш критичних і добре розвинених систем автоматизації (рис.1.1), оскільки вона безпосередньо впливає на механічну швидкість проходки (МШП) та ресурс долота. Параметри керування системи наведені в таблиці 1.1.

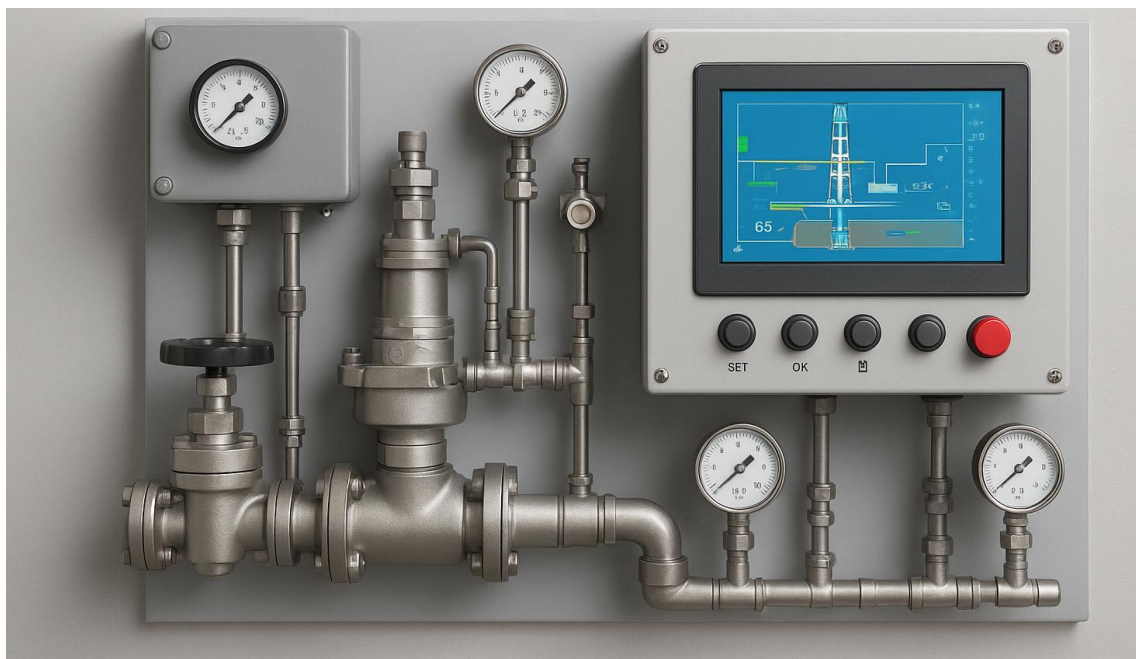


Рис.1.1. Системи контролю та регулювання подачі долота

На рис.1.1 зображено інженерний пульт управління системою контролю та регулювання подачі долота при бурінні свердловини. Композиція складається з:

1). Основні елементи пульта

- Цифровий екран (HMI-панель) справа — відображає схему бурової установки, положення долота та параметри процесу буріння (глибину, навантаження, швидкість подачі).
- Кнопки керування під екраном:
 - SET, ОК, інші функціональні клавіші,
 - червона кнопка аварійної зупинки.

2). Прилади контролю (манометри)

- Розташовані зліва та знизу.
- Показують тиск у гідравлічній системі, що використовується для регулювання ваги на долоті та швидкості його подачі.

3). Гідравлічні та пневматичні вузли

- Клапани, трубопроводи, редуктори тиску — забезпечують подачу бурового розчину та контроль навантаження на долото.
- Металеві труби та з'єднання виконані з нержавіючої сталі, що підкреслює промисловий характер системи.

Таблиця 1.1

Системи контролю та регулювання подачі долота

Параметр керування	Мета регулювання	Приклади систем/реалізації
Осьове навантаження на долото (WOB - Weight on Bit)	Підтримка постійного, оптимального навантаження для максимізації МШП або запобігання пошкодженню долота.	Регулятори подачі долота, наприклад, РПДЕ (регулятор подачі долота електричний). Вони керують лебідкою (як правило, через систему Тиристорний Перетворювач - Двигун (ТП-Д) або сучасніші системи на базі частотних перетворювачів), регулюючи швидкість спуску/підйому бурової колони.
Швидкість обертання долота (RPM)	Підтримка оптимальної швидкості обертання, часто в поєднанні з WOB, для оптимізації руйнування породи.	Керування приводом ротора або системою верхнього приводу (СВП) за допомогою частотних перетворювачів.
Швидкість подачі (ROP - Rate of Penetration) / Швидкість проходки	Пряме керування швидкістю проходки, хоча це складніше через велику інерційність та змінний опір породи.	Комплексні алгоритми оптимізації, які розраховують WOB та RPM, необхідні для досягнення цільового ROP.

Особливості: Основним викликом є невизначеність властивостей породи, що вимагає застосування більш досконалих регуляторів, ніж прості ПІД-регулятори.

Зображення демонструє сучасну автоматизовану систему, яка керує процесом подачі долота в свердловину, контролює тиск, навантаження та позицію. Система поєднує механічні (клапани, манометри) та електронні компоненти (сенсорний дисплей, автоматичне керування), створюючи комплексну систему точного управління буровим процесом.

1.1.2. Системи контролю та регулювання тиску та витрати бурового розчину

Ці системи (рис.1.2) є ключовими для забезпечення стійкості стінок свердловини, охолодження долота та безпеки буріння, запобігаючи аварійним ситуаціям (наприклад, нафтогазопрояви). Вони є частиною циркуляційної системи.

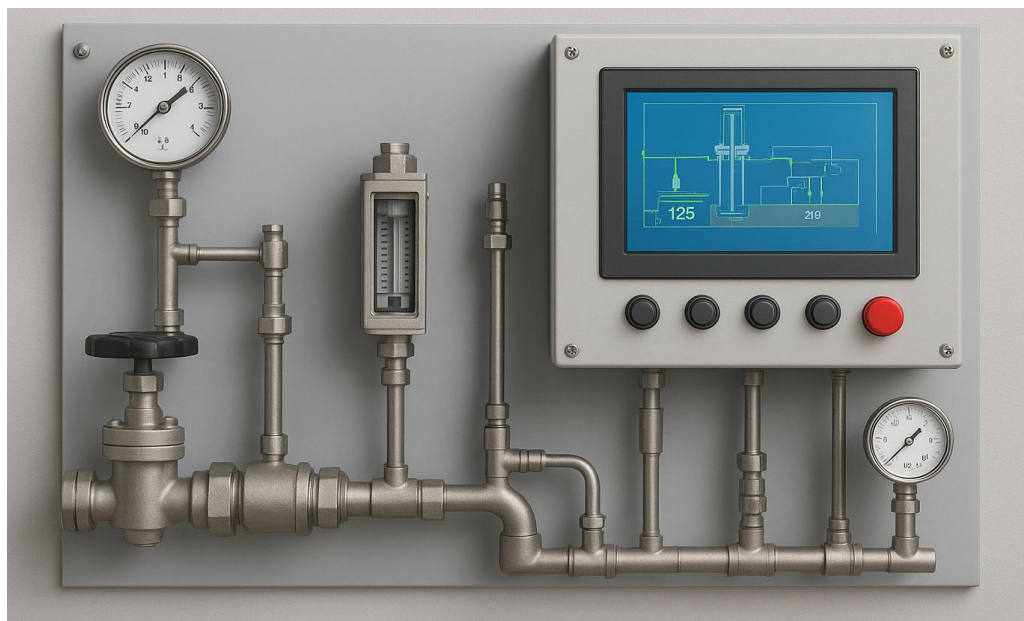


Рис.1.2. Системи контролю та регулювання тиску та витрати бурового розчину

На рис.1.2 зображено систему контролю та регулювання тиску і витрати бурового розчину, яка використовується на бурових установках для підтримання стабільних гідравлічних параметрів у свердловині.

Система змонтована на металевій панелі сірого кольору і складається з таких основних елементів:

1) Манометри (зліва та справа): показують тиск у системі подачі бурового розчину; використовуються для контролю стану насосів і стабільності циркуляції.

2) Ротаметр (витратомір) — розташований посередині: забезпечує візуальний контроль витрати бурового розчину, який циркулює в свердловині. Вимірює об'ємну швидкість потоку в л/хв або м³/год.

3) Регулюючий клапан (знизу ліворуч): використовується для зміни тиску та витрати за допомогою ручного або автоматичного керування.

4) Промисловий контролер (НМІ-панель) — праворуч. На екрані зображено схему циркуляційної системи бурового розчину. Відображаються поточні параметри (наприклад, тиск 125 бар, витрата 219 л/хв). Під екраном розміщені кнопки керування: SET, OK, MENU та аварійна зупинка (червона кнопка). Параметри контролю та регулювання наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Системи контролю та регулювання тиску та витрати бурового розчину

Параметр керування	Мета регулювання	Реалізація
Витрата бурового розчину (Flow Rate)	Підтримка стабільної витрати для ефективного очищення вибою та виносу шламу.	Керування роботою бурових насосів (поршневих) за допомогою частотних перетворювачів для точного регулювання швидкості їх роботи, а отже, й витрати розчину.
Тиск на виході насоса	Підтримка тиску в бурильній колоні в заданих межах.	Моніторинг тиску за допомогою високоточних датчиків та корекція роботи насосів.
Тиск у затрубному просторі (Back Pressure)	Критичний параметр для буріння на контрольованому тиску (MPD - Managed Pressure Drilling).	Використовуються спеціалізовані дросельні клапани (chokes) та сепаратори, якими керують автоматично для точного регулювання гідростатичного та гідродинамічного тиску в свердловині.
Рівень розчину в приймальних ємностях (Об'єм)	Моніторинг для швидкого виявлення поглинання (зниження рівня) або нафтогазопрояву (збільшення рівня).	Використовуються датчики рівня (поплавкові, ультразвукові) та візуальні системи.

Особливості: Системи MPD є найбільш просунутими в цій сфері. Вони використовують модельно-орієнтовані алгоритми для розрахунку необхідного протитиску, щоб гідростатичний тиск стовпа розчину завжди підтримувався в безпечному "вікні" (вище пластового тиску, але нижче тиску гідророзриву).

Система призначена для:

- автоматичного контролю параметрів бурового розчину (тиску та витрати);
- захисту свердловини від викидів шляхом своєчасного виявлення змін у гідравлічному балансі;
- оптимізації роботи насосів і забезпечення стабільної циркуляції під час буріння.

Зовнішній вигляд установки демонструє поєднання механічних і електронних елементів контролю, що є типовим для сучасних систем автоматизації процесів буріння. Конструкція виглядає компактно, технологічно та наочно ілюструє інтеграцію датчиків, вимірювальних приладів і цифрового керування.

1.1.3. Недоліки та необхідність адаптивних регуляторів

Існуючі традиційні САК часто покладаються на стандартні ПД-регулятори. Їхній головний недолік полягає в тому, що вони працюють ефективно лише при незмінних характеристиках об'єкта керування.

У процесі буріння:

1. Об'єкт керування (свердловина) постійно змінюється: змінюється глибина, літологія (тип породи), температура, тиск, властивості бурового розчину.
2. Параметри процесу (наприклад, коефіцієнт проникності долота, опір тертя бурильної колони) є невідомими та змінними.

Це призводить до того, що налаштування ПД-регулятора, оптимальні на одній глибині, стають неоптимальними або навіть призводять до нестійкості на іншій. Саме тому адаптивні регулятори є необхідними, оскільки вони здатні автоматично оцінювати зміну параметрів об'єкта в режимі реального часу та перенабудувати свої коефіцієнти, забезпечуючи стабільно високу якість керування.

1.2. Аналіз динамічних характеристик процесу буріння як об'єкта керування

Процес буріння свердловини є класичним прикладом складної, динамічної системи з розподіленими параметрами, високою інерційністю та значною невизначеністю. Для розробки ефективних адаптивних регуляторів необхідно чітко ідентифікувати його динамічні характеристики, нелінійності та змінність у часі.

1.2.1. Динамічна модель об'єкта керування

Буріння можна розглядати як зв'язану систему, де керуючі дії в одній підсистемі миттєво або із запізненням впливають на інші. Основним об'єктом керування є вибійний процес — взаємодія долота з породою. Основні канали керування та зворотного зв'язку наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Основні канали керування та зворотного зв'язку

Вхідна змінна (Керуюча дія)	Вихідна змінна (Керований параметр)	Характеристика динаміки
Швидкість подачі лебідки	Осьове навантаження (WOB)	Висока інерційність (велика маса бурильної колони), механічні пружні коливання.
Швидкість обертання приводу (RPM)	Крутний момент (Torque)	Динаміка визначається характеристиками електродвигуна, а також пружно-інерційними крутильними коливаннями колони.
Продуктивність насосів	Тиск на виході насосів / Витрата розчину	Динаміка насосів (об'ємна витрата) та гідравлічний опір системи.
WOB та RPM	Швидкість проходки (ROP)	Найскладніший канал: ROP є функцією WOB, RPM та властивостей породи (які не вимірюються напряму).

Насамперед розглянемо типову передатну функцію. Динаміка подачі долота (від швидкості лебідки до WOB) часто описується рівняннями руху масивного тіла з урахуванням пружності, тертя та інерції. У спрощеному вигляді динамічна модель може включати аперіодичні ланки 1-го або 2-го порядку та обов'язкову ланку чистого запізнення, пов'язану з поширенням крутильних і поздовжніх коливань по колоні:

$$WOB(s) = \frac{K}{T_1 s + 1} \cdot e^{-\tau s}$$

де:

K — коефіцієнт підсилення (залежить від поточної маси колони).

τ — час запізнення.

T_1 — постійна часу (інерційність).

1.2.2. Аналіз нелінійностей

Процес буріння є сильно нелінійним, що ускладнює застосування класичних лінійних регуляторів. Основні джерела нелінійності наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Основні джерела нелінійності

Джерело нелінійності	Характер нелінійності	Вплив на керування
Взаємодія WOB-ROP	Крива руйнування породи (Burton-Murray model, exponential or power law). ROP залежить від WOB нелінійно, часто має точки насичення та/або спаду.	Зміна робочої точки призводить до зміни коефіцієнта підсилення системи WOB/ROP.
Тертя (Friction)	Залежність сили тертя від швидкості (віскозна, кулонівська складові). Наявність статичного тертя та ефекту Stick-Slip.	Викликає вібраційну нестійкість (крутильні автоколивання) та погіршує точність керування WOB, особливо при малих швидкостях подачі.

Продовження таблиці 1.4

Джерело нелінійності	Характер нелінійності	Вплив на керування
Гідравлічні втрати	Втрати тиску на тертя у свердловині квадратично залежать від витрати бурового розчину.	Ускладнює точний контроль тиску у вибої (MPD-системи).

1.2.3. Змінні у часі властивості (часова варіабельність)

Саме змінність параметрів у часі є ключовим викликом, який вимагає застосування адаптивних регуляторів. Фактори зміни наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Фактори зміни

Фактор зміни	Керований параметр, який змінюється	Наслідок для регулятора
Зміна літології (породи)	Коефіцієнт проникності долота (k_{ROP}), міцність породи.	Миттєва зміна статичного коефіцієнта підсилення від WOB до ROP. Регулятор стає неоптимальним або нестійким.
Збільшення глибини	Довжина та маса бурильної колони, жорсткість, інерція.	Зміна постійних часу та власних частот коливної системи. Збільшення часу запізнення.
Знос долота	Ефективна площа долота, коефіцієнт тертя.	Поступове погіршення ефективності руйнування породи та зміна динаміки WOB/ROP.
Зміна властивостей розчину	Густина, в'язкість.	Зміна гідростатичного тиску, гідравлічних втрат та сил плавучості, що впливають на WOB.

1.3. Обґрунтування необхідності застосування адаптивних регуляторів у системах автоматичного керування процесом буріння

Процес буріння нафтових і газових свердловин характеризується високим рівнем невизначеності, нелінійністю та неперервною зміною геолого-технологічних умов, що суттєво ускладнює застосування традиційних методів регулювання. У таких умовах адаптивні регулятори є оптимальним рішенням для забезпечення стабільності, ефективності та безпеки керування основними параметрами буріння (подачею долота, тиском, витратою бурового розчину тощо).

1.3.1. Невизначеність та змінність параметрів процесу

У процесі проходки свердловини буровий інструмент постійно взаємодіє з породами різної твердості, абразивності та пористості. Це призводить до зміни таких динамічних параметрів системи, як:

- механічний опір породи різанню;
- коефіцієнти гідравлічного опору бурового розчину;
- коефіцієнти передачі між керуючими впливами та контрольованими параметрами (WOB, ROP, standpipe pressure);
- ступінь зносу долота, що змінює ефективність буріння.

Традиційні ПІ/ПІД-регулятори налаштовуються на фіксовані параметри об'єкта, тому при їх зміні втрачають оптимальність, що спричиняє перерегулювання, коливання або навіть втрату стійкості системи.

Адаптивні регулятори (рис. 1.3), навпаки, автоматично підлаштовують свої параметри залежно від поточного стану об'єкта, забезпечуючи стабільність та оптимальне керування в умовах змінних характеристик середовища.

1.3.2. Поліпшення точності регулювання у реальних виробничих умовах

Процес буріння характеризується значними збуреннями та стохастичними факторами:

- різкі зміни тиску внаслідок каротажних аномалій;
- коливання дебіту бурового розчину;
- вібрації та явища stick-slip, bit bounce, whirl.

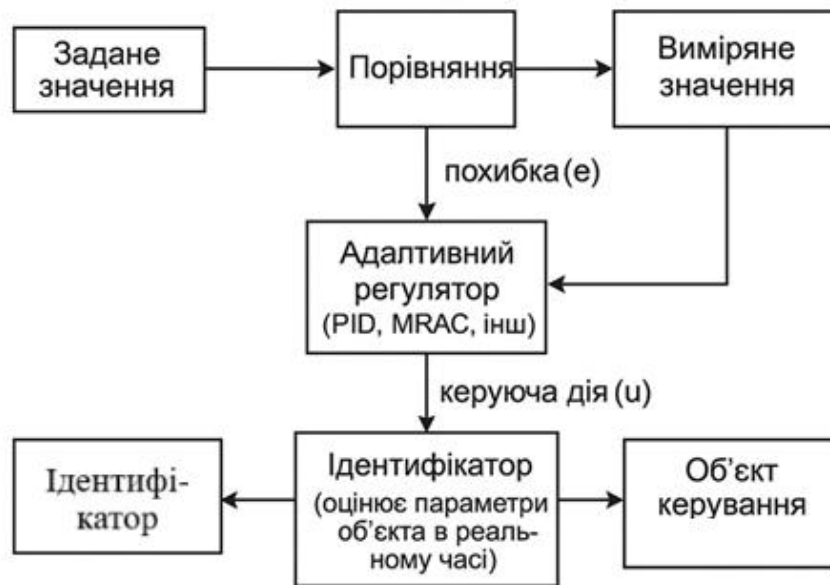


Рис. 1.3. Блок-схема адаптивного регулятора

Адаптивні регулятори здатні:

- ідентифікувати поточні параметри моделі об'єкта в режимі реального часу;
- автоматично підбирати коефіцієнти регулятора для мінімізації помилок;
- підтримувати оптимальні режими буріння при дії непередбачуваних зовнішніх збурень.

Це дозволяє суттєво зменшити відхилення від заданих режимів та знизити ризик аварійних ситуацій.

1.3.3. Підвищення ефективності буріння

Завдяки адаптивному керуванню забезпечується:

- стабілізація подачі долота відповідно до змін опору породи → підвищення механічної швидкості буріння (ROP);
- адаптивне регулювання витрати бурового розчину та тиску → зменшення непродуктивних простоїв;
- оптимізація режимів роботи бурового інструменту → зменшення зносу долота та бурильної колони.

За рахунок цього адаптивні системи забезпечують раціональне використання енергії, ресурсів обладнання та витратних матеріалів.

1.3.4. Підвищення безпеки буріння та попередження ускладнень

Управління тиском і витратою бурового розчину є критично важливим для запобігання:

- газонафтоводопроявам і викидам;
- прихопленням бурильної колони;
- обвалам стінок свердловини.

Адаптивні алгоритми можуть оперативно реагувати на зміни гідродинамічних умов у свердловині та автоматично коригувати режими роботи pomp або дроселювальної арматури. Це забезпечує підвищений рівень технологічної та екологічної безпеки, що особливо важливо під час роботи в аномальних тисках і складних геологічних умовах.

1.3.5. Здатність до самонавчання та інтелектуальної оптимізації

Сучасні адаптивні регулятори доповнюються елементами:

- нечіткої логіки — для врахування експертних знань бурильників;
- нейромереж — для прогнозу динаміки параметрів;

- алгоритмів машинного навчання — для оптимізації процесу буріння на основі накопичених даних.

Такі системи здатні "навчатися" на історичних та оперативних даних, формуючи оптимальні стратегії керування у конкретних геолого-технологічних умовах.

Таким чином адаптивні регулятори є необхідним елементом сучасних систем автоматичного керування процесом буріння, оскільки дозволяють:

- ефективно працювати в умовах невизначеності та змін параметрів об'єкта;
- підвищувати продуктивність та механічну швидкість буріння;
- мінімізувати аварійність та ризики, пов'язані з технологічними відхиленнями;
- забезпечувати стійкість та оптимальність процесу в режимі реального часу.

Тому впровадження адаптивних систем керування є ключовим напрямом розвитку інтелектуальних технологій буріння та створює основу для переходу до повністю автономних бурових комплексів.

1.4. Основні технологічні параметри процесу буріння, які підлягають автоматичному регулюванню

Розглянемо структурований опис основних технологічних параметрів буріння (таблиця 1.6), які зазвичай підлягають автоматичному регулюванню, і для кожного – що вимірюється, керує, цілі регулювання, типові перешкоди й рекомендації по стратегіям керування. Значення діапазонів наведені приблизно (для орієнтира – в залежності від типу установки та глибини свердловини вони можуть істотно відрізнятися). Основні технологічні параметри процесу буріння, що підлягають регулюванню також зображені на рис.1.4.

1) Осьове навантаження, F (Weight on Bit, WOB) – сила, що діє вздовж осі долота, яка притискає долото до забою. Приблизний діапазон: ~5–200 kN – сильно залежить від типу буріння і долота. Актуатори (виконавчі пристрої): підйомно-опускні механізми, регулювання натягіння талрепів, автоматичні системи подачі долота.

Таблиця 1.6

Основні технологічні параметри процесу буріння, які підлягають автоматичному регулюванню

№	Технологічний параметр	Одиниці вимірювання	Основне призначення	Засоби вимірювання	Засоби регулювання	Мета автоматичного регулювання
1	Осьове навантаження на долото, F (WOB)	N, kN або tc	Визначає силу притиску долота до забою свердловини	Тензодатчики, індикатор навантаження на гаку, датчик натягу каната	Привід підйомного механізму, система подачі долота (Auto Driller)	Підтримання оптимального навантаження для забезпечення максимальної швидкості проходження без перевантаження долота
2	Частота обертання бурової колони, n (Rotary Speed, RPM)	$об/хв$	Визначає швидкість обертання долота	Тахометр, енкодер на приводі	Електропривід верхнього приводу (Top Drive), частотний перетворювач	Забезпечення стабільного різання породи, запобігання вібраціям і перевантаженням
3	Витрата промивальної рідини, Q (Flow rate)	$м^3/год,$ $л/хв$	Визначає кількість бурового розчину, що циркулює через свердловину	Витратоміри (ультразвукові, електромагнітні), ротаметри	Швидкість обертання насосів, регулюючі клапани	Підтримання ефективного виносу шлам, охолодження долота, стабілізація тиску в стовбурі
4	Крутний момент на буровій колоні, M (Torque)	$Н\cdot м, кН\cdot м$	Характеризує зусилля, необхідне для обертання долота	Датчики моменту на приводі, індикатор навантаження двигуна	Регулювання частоти обертання, зниження осьового навантаження	Захист від перевантаження приводу, запобігання заклинюванню долота
5	Тиск промивальної рідини в системі, p (Mud pressure)	$МПа$	Визначає тиск у циркуляційній системі буріння	Манометри, тискоміри, сенсори на насосах і стояку	Регулювання витрати, швидкості насосів, клапани	Підтримання стабільного гідравлічного режиму, запобігання викидам і гідродарам
6	Швидкість подачі долота, v (Rate of Penetration, ROP)	$м/год$	Характеризує ефективність буріння	Обчислення за глибиною і часом, датчик переміщення	Автоматичне регулювання WOB і RPM	Оптимізація швидкості буріння при мінімальному зношенні інструменту

Типові перешкоди: зміна порід, вібрації, блокування свердловини, зміна тертя у стволі. Рекомендовані стратегії: каскадне керування (верхній рівень — розрахунок бажаного WOB, нижній — позиціонування по навантаженню на гак бурової установки), адаптивний PID або логіка («soft landing» - «м'яка посадка») для швидкого реагування на бит-даун – момент контакту долота з вибоєм свердловини. Частота оновлення: 1–10 Hz (швидкість залежить від динаміки).



Рис.1.4. Основні технологічні параметри процесу буріння, що підлягають автоматичному регулюванню

2) Частота обертання бурової колони, n (Rotary Speed RPM) – швидкість обертання бурової колони / долота. Приблизний діапазон: ~20–200 RPM (технічні значення можуть бути значно вищі для деяких ролінгових/швидких установок або нижчі при турбінному бурінні). Актуатори (виконавчі пристрої): регулятор частоти приводу (VFD для електродвигуна топ-драйву), керування муфтою/редуктором.

Типові перешкоди: зміна навантаження на долото, шоків навантаження, зміни властивостей породи.

Рекомендовані стратегії: швидкодіючий ПД на приводі з обмеженнями по крутному моменту; у більш складних випадках – адаптивна або предиктивна стратегія, що враховує зміну зрізної стійкості інструменту. Частота контрольних циклів: 10–100 Hz для швидкого реагування.

3) Витрата промивальної рідини Q (Flow rate) – об’ємна витрата бурового розчину, що подається насосами у свердловину. Приблизний діапазон: ~6 – 60 м³/год (або 100–1000 л/хв) – сильно залежить від типу насоса і свердловини. Актуатори: регулювання частоти обертів насосів (VFD), байпаси, регулюючі клапани у циркуляційній лінії. Типові перешкоди: зміна властивостей розчину (в’язкість, густина), забруднення фільтрів, зміни у свердловинному тиску.

Рекомендовані стратегії: PID регулювання швидкості насосів з обмеженням по тиску; інтеграція з контролем циркуляційного тиску (каскад: витрата ↔ тиск). Частота оновлення: 1–10 Hz.

4) Крутний момент M (Torque) – момент, що прикладається до бурової колони/долота під час обертання. Приблизний діапазон: дуже широкий – від одиниць до сотень кН·м в залежності від розмірів та установки. Актуатори: регулювання RPM, зміна осьового навантаження (WOB), керування режимом буріння (плавні зупинки/зниження навантаження). Типові перешкоди: заклинювання породи, зміна властивостей пласту, обрив інструменту, різкі навантаження. Рекомендовані стратегії: захисні контролі – відсічення по крутному моменту; у робочому циклі – каскадне регулювання RPM під обмеженням по моменту; адаптивні алгоритми, які підлаштовують RPM і WOB для підтримки допустимого моменту.

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз показав, що сучасні системи автоматичного керування процесом буріння дозволяють ефективно контролювати ключові технологічні

параметри, такі як осьове навантаження на бур, частота обертання бурової колони, витрата промивальної рідини та тиск у свердловині.

2. Виявлено, що існуючі системи значно підвищують безпеку та ефективність буріння за рахунок зменшення ризику аварійних ситуацій і оптимізації режимів роботи обладнання.
3. Проведене порівняння різних технологічних рішень показало, що системи з функціями прогнозування і адаптивного керування мають перевагу над традиційними ПІД-регуляторами, особливо при роботі в складних геологічних умовах.
4. Виявлені обмеження сучасних систем пов'язані з недостатньою інтеграцією в реальному часі, високою вартістю впровадження та складністю налаштування для конкретних свердловинних умов.
5. На основі аналізу існуючих рішень визначено потенційні напрямки вдосконалення систем автоматичного керування, зокрема впровадження більш точних сенсорів, інтелектуальних алгоритмів адаптації та можливостей дистанційного моніторингу та управління.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ, ЩО АДЕКВАТНО ОПИСУЄ КЛЮЧОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ

Насамперед, щоб розробити математичну модель об'єкта керування для процесу буріння, потрібно системно підійти до завдання: виділити ключові параметри, встановити взаємозв'язки між ними та обрати форму моделі (динамічна, статична, лінійна або нелінійна). Розглянемо покроковий підхід.

2.1. Визначення ключових параметрів процесу буріння

Для системи керування буровим процесом основними параметрами є (див. розділ 1):

- Швидкість проходки v (ROP, Rate of Penetration) – швидкість заглиблення бурового інструмента в пласт, м/год або м/с.
- Осьове навантаження F (WOB, Weight on Bit) – сила, яка діє на долото, Н або кН.
- Крутний момент на буровій колоні M (Torque) – момент обертання долота, Н·м.
- Частота обертання бурової колони n (RPM) – об/хв.
- Витрата промивальної рідини Q – м³/год.

Мета моделі – встановити, як управлінські дії (осьове навантаження, обертання, витрата промивальної рідини) впливають на швидкість проходки та механічні параметри буріння [13-22].

2.2. Вибір типу моделі

Для керування часто використовують динамічні лінійні або нелінійні моделі першого чи другого порядку. Найбільш поширена – система диференціальних рівнянь, яка описує зміну швидкості проходки як функції осьового навантаження та крутного моменту:

$$\frac{dv}{dt} = f(F, M, \text{параметри пласта})$$

Також можна використовувати передавальні функції для синтезу ПД-регулятора.

2.3. Формування математичної моделі [13-22]

2.3.1. Модель швидкості проходки

Класична емпірична залежність:

$$v = k_I \cdot F^\alpha \cdot n^\beta \cdot Q^\gamma$$

де:

k_I – коефіцієнт ефективності буріння,

α, β, γ – експоненти, що враховують нелінійність процесу.

Для динамічного опису можна записати:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v_{ст} - v}{\tau}$$

де:

$v_{ст}$ – стаціонарне значення швидкості проходки (визначається з емпіричної формули);

τ – часова константа процесу (с), яка враховує інерційність бурового комплексу.

2.3.2. Модель крутного моменту

Крутний момент на долоті можна описати як суму тертя та опору матеріалу:

$$M = M_{тр} + M_{пласт} = k_2 \cdot n + k_3 \cdot F$$

де:

k_2 – коефіцієнт тертя,

k_3 – коефіцієнт залежності від пласту.

Динамічно:

$$J \frac{d\omega}{dt} + b\omega = M - M_{load}$$

де:

J – момент інерції бурової колони;

$\omega = 2\pi \cdot n / 60$;

b – коефіцієнт демпфування;

M_{load} – опір буріння (залежить від осьового навантаження F та властивостей пласта).

2.3.3. Модель осьового навантаження

Осьове навантаження змінюється в залежності від управління пресом на роторі:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{F_{зад} - F}{\tau_W}$$

де $F_{зад}$ – значення, що задається системою керування.

2.4. Комплексна динамічна модель

Складаємо систему рівнянь для об'єкта керування [13-22]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} = \frac{k_1 \cdot F^\alpha \cdot n^\beta \cdot Q^\gamma - v}{\tau} \\ J \frac{d\omega}{dt} + b\omega = k_2\omega + k_3F - M_{load} \\ \frac{dF}{dt} = \frac{F_{зад} - F}{\tau_W} \end{array} \right.$$

Ця система описує зв'язок між керованими величинами (F , n , Q) та ключовими параметрами процесу (v , M).

2.5. Лінеаризація в околі робочої точки

Позначимо робочу точку [6] (v_0, n_0, Q_0) і $R_0 = v_{st}(v_0, n_0, Q_0)$.

Частинні похідні стаціонарної величини v_{st} :

$$\left. \frac{dv_{st}}{dF} \right|_0 = \alpha k_1 v_0^{\alpha-1} n_0^\beta Q_0^\gamma = \alpha \frac{R_0}{v_0},$$

$$\left. \frac{dv_{st}}{dn} \right|_0 = \beta \frac{R_0}{n_0},$$

$$\left. \frac{dv_{st}}{dQ} \right|_0 = \gamma \frac{R_0}{Q_0}.$$

Введемо незначні відхилення $\Delta v, \Delta F, \Delta n, \Delta Q$.

Лінеаризоване рівняння v :

$$\frac{d\Delta v}{dF} = -\frac{1}{\tau} \left(\frac{dv_{st}}{dF} \Delta F + \frac{dv_{st}}{dn} \Delta n + \frac{dv_{st}}{dQ} \Delta Q - \Delta v \right).$$

Підставивши частинні похідні, отримаємо:

$$\frac{d\Delta v}{dF} = -\frac{1}{\tau} \Delta v + \frac{1}{\tau} \left(\alpha \frac{R_0}{v_0} \Delta F + \beta \frac{R_0}{n_0} \Delta n + \gamma \frac{R_0}{Q_0} \Delta Q \right).$$

F, n – лінеаризація:

$$\frac{d\Delta F}{dt} = -\frac{1}{\tau_W} \Delta F + \frac{1}{\tau_W} \Delta F_{set},$$

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{1}{\tau_R} \Delta n + \frac{1}{\tau_R} \Delta n_{set}.$$

2.6. Передавальні функції

Перейдемо від диференціальних рівнянь до передавальних функцій за допомогою перетворень Лапласа при початкових нульових умовах.

Позначимо через s – комплексну змінну.

Відхилення $v \leftrightarrow$ відхилення F (локально):

$$G_{v,F}(s) = \frac{\Delta v(s)}{\Delta F(s)} = \frac{\frac{1}{\tau} \alpha \frac{R_0}{W_0}}{s + \frac{1}{\tau}} = \frac{\alpha \frac{R_0}{W_0}}{\tau s + 1}$$

Аналогічно:

$$G_{v,n}(s) = \frac{\beta \frac{R_0}{n_0}}{\tau s + 1}, \quad G_{v,Q}(s) = \frac{\gamma \frac{R_0}{Q_0}}{\tau s + 1}.$$

$F_{\text{set}} \rightarrow F$:

$$G_{F_{\text{set}},F}(s) = \frac{1}{\tau_W s + 1},$$

$n_{\text{set}} \rightarrow n$:

$$G_{n_{\text{set}},n}(s) = \frac{1}{\tau_R s + 1}.$$

Тоді загальна передавальна функція від $F_{\text{set}} \rightarrow v$ (важлива при синтезі ПД) – добуток двох ланок:

$$G_{v,F_{\text{set}}}(s) = \frac{\alpha \frac{R_0}{W_0}}{(\tau s + 1)(\tau_W s + 1)}.$$

Аналогічно для $n_{\text{set}} \rightarrow v$:

$$G_{v,n_{\text{set}}}(s) = \frac{\beta \frac{R_0}{n_0}}{(\tau s + 1)(\tau_R s + 1)}.$$

Це вигляд, який будемо використовувати для проектування ПД (або каскадних регуляторів).

2.7. Лінійна модель в матричному (state-space) вигляді

Візьмемо стан $x = [\Delta v, \Delta F, \Delta n]^T$, входи $u = [\Delta F_{\text{set}}, \Delta n_{\text{set}}, \Delta Q]^T$. Тоді:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx$$

де

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau} & \frac{1}{\tau} \alpha \frac{R_0}{W_0} & \frac{1}{\tau} \beta \frac{R_0}{n_0} \\ 0 & -\frac{1}{\tau_W} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_R} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\gamma} \gamma \frac{R_0}{Q_0} \\ \frac{1}{\tau_W} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_R} & 0 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0].$$

Підставляємо числові значення. Використаємо параметри, які підібрали в Simulink (див. розділ 3):

$$k_1 = 0,05; \alpha = 0,8; \beta = 0,5; \gamma = 0,2.$$

$$\tau = 10 \text{ s}; \tau_w = 5 \text{ s}; \tau_R = 2 \text{ s}.$$

Робоча точка: $W_0 = 1000, n_0 = 120; Q_0 = 30$.

Обчислення (цифри далі — точні до наведеного округлення):

$R_0 \approx 271.6345$ (одиниці — ті, що використовуються для v).

Частинні похідні:

$$\left. \frac{\partial v_{st}}{\partial F} \right|_0 \approx 0,21733076,$$

$$\left. \frac{\partial v_{st}}{\partial n} \right|_0 \approx 1,1318103,$$

$$\left. \frac{\partial v_{st}}{\partial Q} \right|_0 \approx 1,8108965.$$

Тому:

$$G_{v,F}(s) = \frac{0,2173076}{10s + 1}.$$

Від F_{set} до v :

$$G_{v,Fset}(s) = \frac{0,2173076}{(10s + 1)(5s + 1)} = \frac{0,2173076}{50s^2 + 15s + 1}. \quad (2.1)$$

(чисельно — це двозв'язкова система другого порядку з постійною в чисельнику 0,2173).

Від n_{set} до v :

$$G_{v,nset}(s) = \frac{1,1318103}{(10s + 1)(2s + 1)} = \frac{1,1318103}{20s^2 + 12s + 1}. \quad (2.2)$$

Будуємо в середовищі MATLAB динамічні характеристики для отриманих передавальних функцій. Нижче наведено скрін-шоти вікон і графіки з MATLAB.

Функція передачі (2.1) в MATLAB:

```
>> G1 = tf([0.2173],[50 15 1])  
  
G1 =  
  
      0.2173  
-----  
50 s^2 + 15 s + 1  
  
Continuous-time transfer function.
```

Перехідна характеристика (ПХ) (рис.2.1):

```
>> step(G1)
```

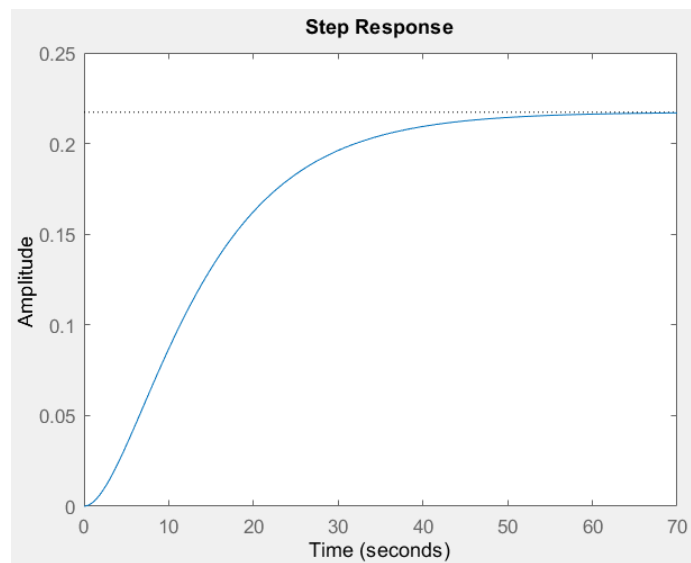


Рис.2.1. Перехідна характеристика

Імпульсна перехідна характеристика (ІПХ), (рис.2.2):

```
>> impulse(G1)
```

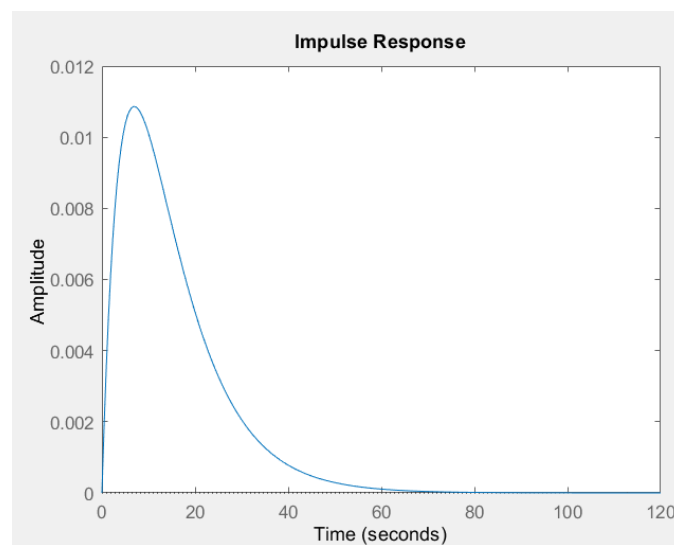


Рис. 2.2. Імпульсна перехідна характеристика (ІПХ)

Частотні характеристики (АЧХ, ФЧХ):

```
>> bode(G1)
```

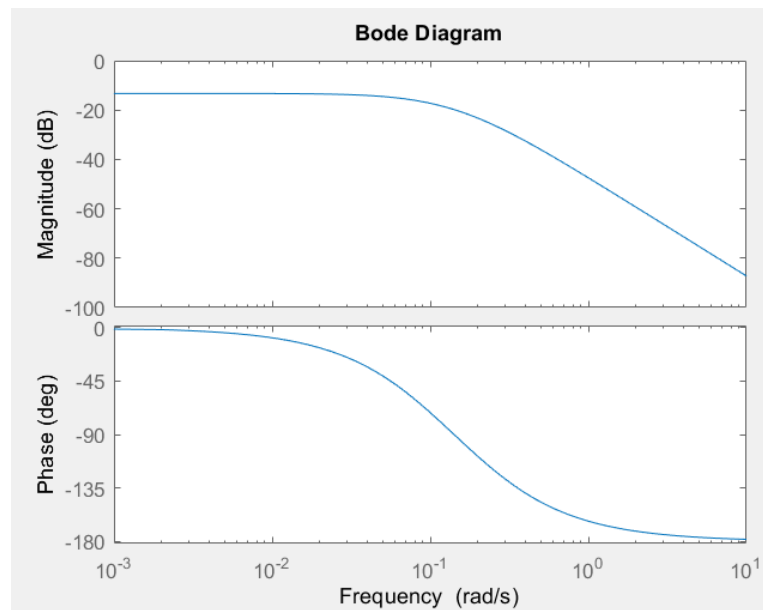


Рис.2.3. Частотні характеристики (АЧХ, ФЧХ)

Амплітудно-фазова характеристика (АФХ):

```
>> nyquist(G1)
```

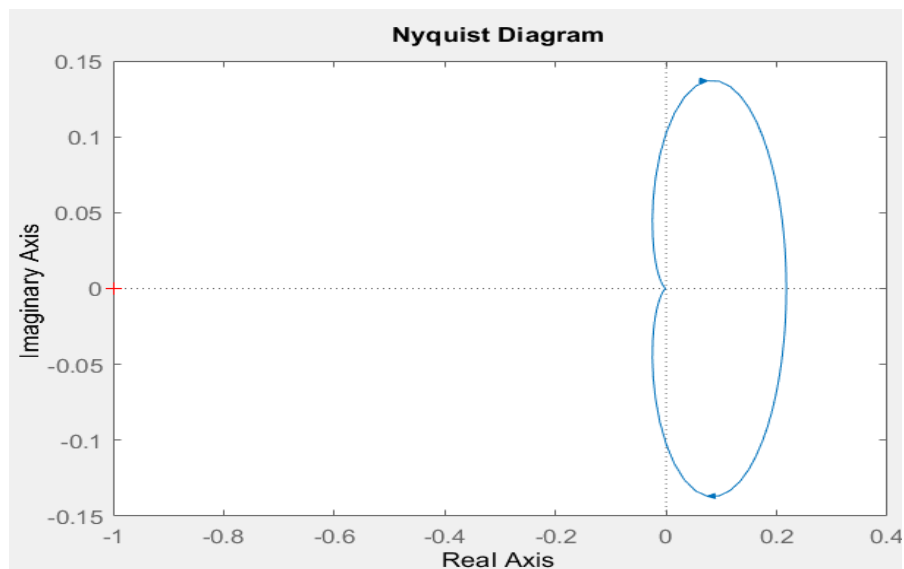


Рис.2.4. Амплітудно-фазова характеристика

Полюси: від'ємні дійсні значення, що свідчить про стійкість системи керування

```
>> pole(G1)

ans =

    -0.2000
    -0.1000
```

Задаємо в MATLAB функцію передачі (2.2):

```
>> G2=tf([1.1318],[20 12 1])

G2 =

      1.132
-----
 20 s^2 + 12 s + 1

Continuous-time transfer function.
```

Застосовуємо команду `>> ltiview(G2)`, щоб вивести в одному вікні всі необхідні динамічні характеристики (рис.2.5).

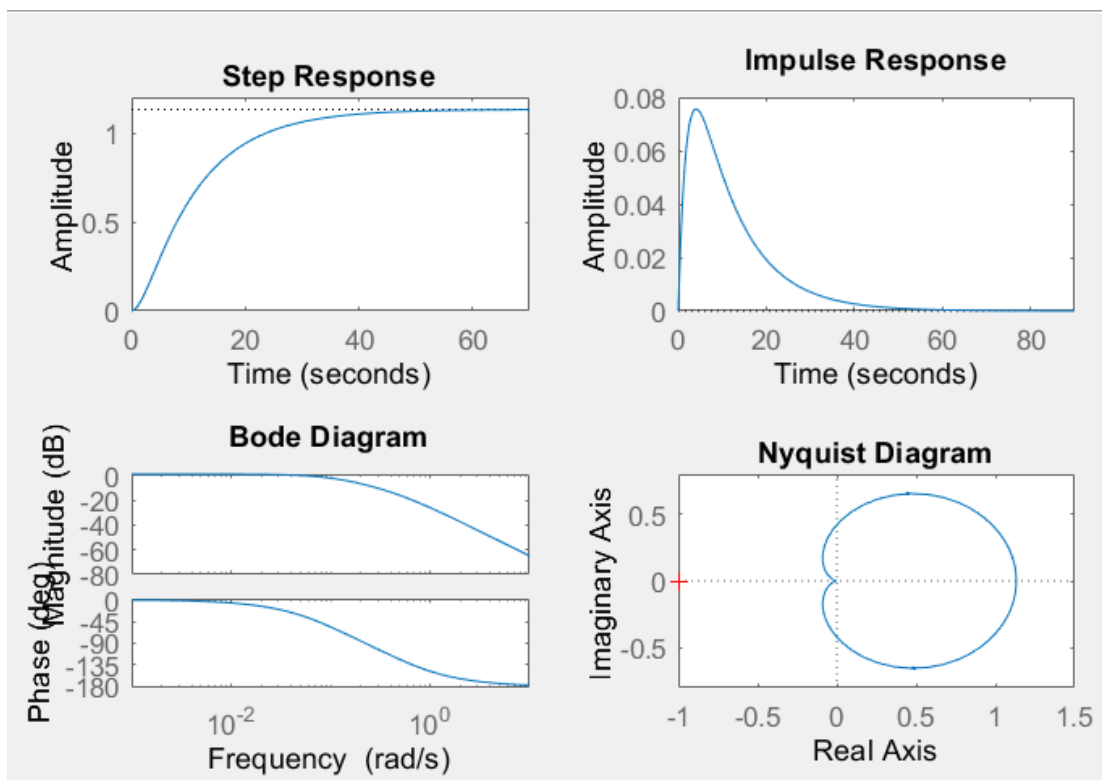


Рис.2.5. Динамічні характеристики (ПХ, ІПХ, АЧХ, ФЧХ, АФХ)

На зображенні (рис.2.5) представлено типові характеристики лінійної динамічної системи, отримані в MATLAB:

1). Step Response (Перехідна характеристика на одиничний ступінчастий вплив). Графік показує, як система реагує на одиничний стрибок вхідного сигналу. Амплітуда виходу зростає плавно від 0 до 1. Система є *стійкою* (вихід наближається до сталого значення). Перехідний процес триває приблизно 60–70 секунд. Це свідчить про аперіодичну (інерційну) систему першого або другого порядку.

2). Impulse Response (Імпульсна характеристика). Показує реакцію системи на короткий імпульс на вході. Амплітуда швидко зростає до максимуму (~ 0.075) і потім експоненційно спадає до нуля. Це характерно для стійкої системи з аперіодичним згасанням.

3). Bode Diagram (Бодє-діаграма) Складається з двох частин:

- Magnitude (амплітудно-частотна характеристика): спад амплітуди з ростом частоти, що підтверджує наявність інтегруючої або фільтрувальної властивості.
- Phase (фазо-частотна характеристика): фаза змінюється від 0° до близько -180° , що типово для систем першого-другого порядку.

4). Nyquist Diagram (Діаграма Найквіста або АФХ). Крива утворює замкнуту петлю, розташовану праворуч від точки $(-1, 0)$. Це означає, що система стійка (крива не охоплює критичну точку). Поведінка характерна для системи з позитивним коефіцієнтом підсилення та аперіодичною динамікою.

Система є стійкою, аперіодичною, із значною інерційністю. Частотні характеристики свідчать про низькочастотну поведінку з приглушенням високочастотних коливань, що типово для систем першого або другого порядку з інтегруючою ланкою.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було розроблено математичну модель об'єкта керування, яка адекватно описує основні фізичні процеси, що відбуваються під час буріння свердловин. Модель базується на аналітичному та емпіричному описі взаємозв'язків між ключовими технологічними параметрами – швидкістю

проходки, осьовим навантаженням на долото, частотою обертання бурової колони, крутним моментом і витратою промивальної рідини.

Отримано систему рівнянь, яка описує динаміку зміни швидкості проходки залежно від осьового навантаження, швидкості обертання та витрати промивальної рідини. Для врахування інерційних властивостей бурового комплексу та впливу механічних опорів введено диференціальні рівняння першого порядку для WOB і RPM. Запропонована модель дозволяє досліджувати динамічну поведінку системи та використовувати її для побудови алгоритмів автоматичного регулювання.

Виконано лінеаризацію нелінійної моделі в околі робочої точки, що дало змогу отримати спрощені передавальні функції, придатні для синтезу ПІД-регуляторів. Це забезпечує можливість проведення подальшого аналізу стійкості, перехідних процесів і налаштування параметрів системи керування з використанням стандартних методів MATLAB/Simulink.

Розроблена математична модель є адекватною основою для подальшого створення моделі керування процесом буріння у середовищі Simulink, зокрема для розробки каскадної системи автоматичного регулювання осьового навантаження та швидкості проходки. Запропонований підхід дозволяє забезпечити підвищення ефективності буріння, зменшення енергетичних витрат і запобігання аварійним режимам.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ

3.1. Мета синтезу системи керування

Метою синтезу системи автоматичного керування процесом буріння є забезпечення стабільної та ефективної роботи бурового комплексу шляхом підтримання оптимальних значень осьового навантаження F і швидкості проходки v при змінних умовах буріння та властивостях гірської породи.

Основним завданням системи є автоматичне регулювання параметрів процесу з урахуванням взаємозв'язку між механічними й гідравлічними характеристиками для підвищення продуктивності буріння, зниження зносу долота та запобігання аварійним ситуаціям (прихоплення, перевантаження, вібрації тощо).

3.2. Структура системи автоматичного керування

На основі математичної моделі, розробленої у попередньому розділі, запропоновано каскадну структуру системи автоматичного керування (САК), що складається з двох рівнів регулювання (рис.3.1):

1. Внутрішній контур регулювання осьового навантаження WOB (F)

Мета: стабілізувати задане значення F , компенсуючи коливання та впливи динамічних навантажень. Використовується ПІД-регулятор, який формує керуючий сигнал для виконавчого механізму, що змінює подачу бурової колони або силу притискання долота.

2. Зовнішній контур регулювання швидкості проходки ROB (v)

Мета: забезпечити оптимальну швидкість заглиблення долота у породу. Зовнішній ПІД-регулятор змінює завдання для внутрішнього регулятора F , підтримуючи стабільну швидкість проходки незалежно від зміни властивостей пласта.

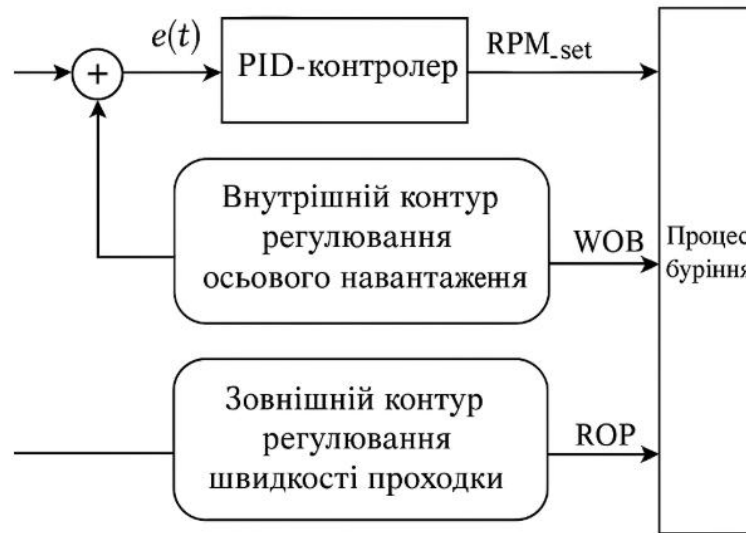


Рис.3.1. Структура системи автоматичного керування процесом буріння

Таким чином, структура забезпечує багаторівневе регулювання, де зовнішній контур визначає стратегічну мету (ROP), а внутрішній – оперативно стабілізує осьове навантаження, що забезпечує точність і стійкість процесу буріння.

3.3. Вибір типу регулятора

Для реалізації контурів керування застосовано ПІД-регулятори, що поєднують пропорційну, інтегральну та диференціальну складові.

Загальна форма рівняння регулятора:

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

де

$e(t)$ – відхилення регульованої величини від заданої,
 K_p , K_i , K_d – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових відповідно.

3.4. Лінеаризована модель для синтезу регуляторів

Для побудови ПІД-регуляторів використано лінеаризовану передавальну функцію об'єкта (див. розділ 2):

$$G_{v,Fset}(s) = \frac{k}{(\tau s + 1)(\tau_W s + 1)},$$

де $k = \alpha \frac{R_0}{W_0}$, τ – постійна часу n , τ_W – постійна часу F .

З використанням даних робочої точки:

$$k = 0,2173; \tau = 10; \tau_W = 5\text{с};$$

передавальна функція набуває вигляду:

$$G(s) = \frac{0,2173}{(10s + 1)(5s + 1)}.$$

Ця модель використана для подальшого синтезу ПІД-регулятора методом частотного налаштування або функцією pidtune у MATLAB.

3.5. Синтез і налаштування ПІД-регуляторів

Для внутрішнього контуру F було використано типову передавальну функцію першого порядку:

$$G_F(s) = \frac{1}{5s + 1}.$$

Функція pidtune (G_F , 'PID') у MATLAB дала наступні параметри (приблизно):

$$K_p = 1,8; K_i = 0,35; K_d = 0,1.$$

Для зовнішнього контуру $v \rightarrow F_{set}$, на основі моделі $G_v, F_{set}(s)$, отримано:

$$K_p = 2,5; K_i = 0,25; K_d = 0,15.$$

Налаштування забезпечує аперіодичний характер перехідного процесу, час встановлення близько 20 с, відсутність значних перерегулювань та достатній запас стійкості.

Розглянемо розроблену програмну модель (симулятор) процесу буріння і простий адаптивний контролер (онлайн-налаштування коефіцієнтів PI) для чисельних експериментів у MATLAB. Нижче наведено повний MATLAB-скрипт,

який моделює динаміку об'єкта ($ROP(v)$, $WOB(F)$, $RPM(n)$), реалізує адаптивний ПІ-контролер, інтегрує систему методом ode45 і виводить графіки результатів (рис.3.2).

```
% drilling_adaptive_sim.m
% Симулятор процесу буріння + адаптивний ПІ-контролер
% Автори: М. Шавранський, В. Стадник (чисельні експерименти)

clear; close all; clc;

%% --- ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТА ---
k1 = 0.05; alpha = 0.8; beta = 0.5; gamma = 0.2;
tau = 10;           % постійна часу ROP
tau_W = 5;         % постійна часу WOB
tau_R = 2;         % постійна часу RPM

RPM_set = 120;     % сталий режим
Q = 30;           % витрата промивальної рідини

%% --- ПАРАМЕТРИ АДАПТИВНОГО ПІ ---
Kp0 = 0.5; Ki0 = 0.1;           % початкові коефіцієнти
gamma_Kp = 1e-3; gamma_Ki = 1e-4; % швидкість адаптації
WOB_ff = 200;                   % початкове осьове
навантаження (feedforward)
Kp_min = 0; Kp_max = 50;
Ki_min = 0; Ki_max = 10;

%% --- ЗАДАННЯ ДЛЯ ROP ---
Tstop = 300;                   % час симуляції, с
tspan = [0 Tstop];
ROP_ref_fun = @(t) (t>2).*8 + (t>120).*4; % ступінчасте
завдання

%% --- ПОЧАТКОВІ УМОВИ ---
```

```

ROP0 = 0; WOB0 = 0; RPM0 = RPM_set; int_e0 = 0;
z0 = [ROP0; WOB0; RPM0; int_e0; Kp0; Ki0];

%% --- ЗАПУСК ІНТЕГРАТОРА ---
opts = odeset('RelTol',1e-6,'AbsTol',1e-8);
[t,z] = ode45(@(t,z)
odefun(t,z,ROP_ref_fun,k1,alpha,beta,gamma,...
    tau,tau_W,tau_R,RPM_set,Q,gamma_Kp,gamma_Ki,...
    WOB_ff,Kp_min,Kp_max,Ki_min,Ki_max), tspan, z0, opts);

%% --- ВИТЯГ СИГНАЛІВ ---
ROP = z(:,1); WOB = z(:,2); RPM = z(:,3);
int_e = z(:,4); Kp = z(:,5); Ki = z(:,6);
ROP_ref = arrayfun(ROP_ref_fun,t);
e = ROP_ref - ROP;

%% --- ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ---
figure('Units','normalized','Position',[0.05 0.05 0.9 0.8]);

subplot(3,2,1);
plot(t,ROP_ref,'--','LineWidth',1.2); hold on;
plot(t,ROP,'LineWidth',1.5);
grid on; xlabel('t, c'); ylabel('ROP');
title('Швидкість проходки (ROP)');
legend('Задане','Дійсне');

subplot(3,2,2);
plot(t,WOB,'LineWidth',1.5); grid on;
xlabel('t, c'); ylabel('WOB');
title('Осьове навантаження (WOB)');

subplot(3,2,3);
plot(t,RPM,'LineWidth',1.5); grid on;

```

```

xlabel('t, c'); ylabel('RPM');
title('Швидкість обертання');

subplot(3,2,4);
plot(t,Kp,'LineWidth',1.4); grid on;
xlabel('t, c'); ylabel('K_p');
title('Адаптація коефіцієнта K_p');

subplot(3,2,5);
plot(t,Ki,'LineWidth',1.4); grid on;
xlabel('t, c'); ylabel('K_i');
title('Адаптація коефіцієнта K_i');

subplot(3,2,6);
plot(t,e,'LineWidth',1.2); grid on;
xlabel('t, c'); ylabel('e = ROP_{ref} - ROP');
title('Помилка трекінгу');

sgtitle('Адаптивна PI-система керування процесом буріння');
disp('? Симуляція завершена успішно.');
```

На рис.3.2 показано результати чисельного моделювання адаптивної ПІ-системи керування процесом буріння, що регулює швидкість проходки (ROP) через зміну осьового навантаження (WOB).

Система реалізує зворотний зв'язок за ROP: контролер змінює WOB таким чином, щоб фактична швидкість проходки наближалася до заданої. Коефіцієнти регулятора (K_p) і (K_i) адаптуються в реальному часі залежно від величини помилки.

1). Лівий верхній графік – швидкість проходки (ROP). Синя пунктирна лінія – задане значення швидкості проходки. Помаранчева – фактична ROP. На початку видно сильні перехідні коливання та перевищення, потім амплітуда поступово зменшується, але система ще не досягла стабільного трекінгу. Це свідчить, що адаптація ще триває, або коефіцієнти адаптації занадто великі.

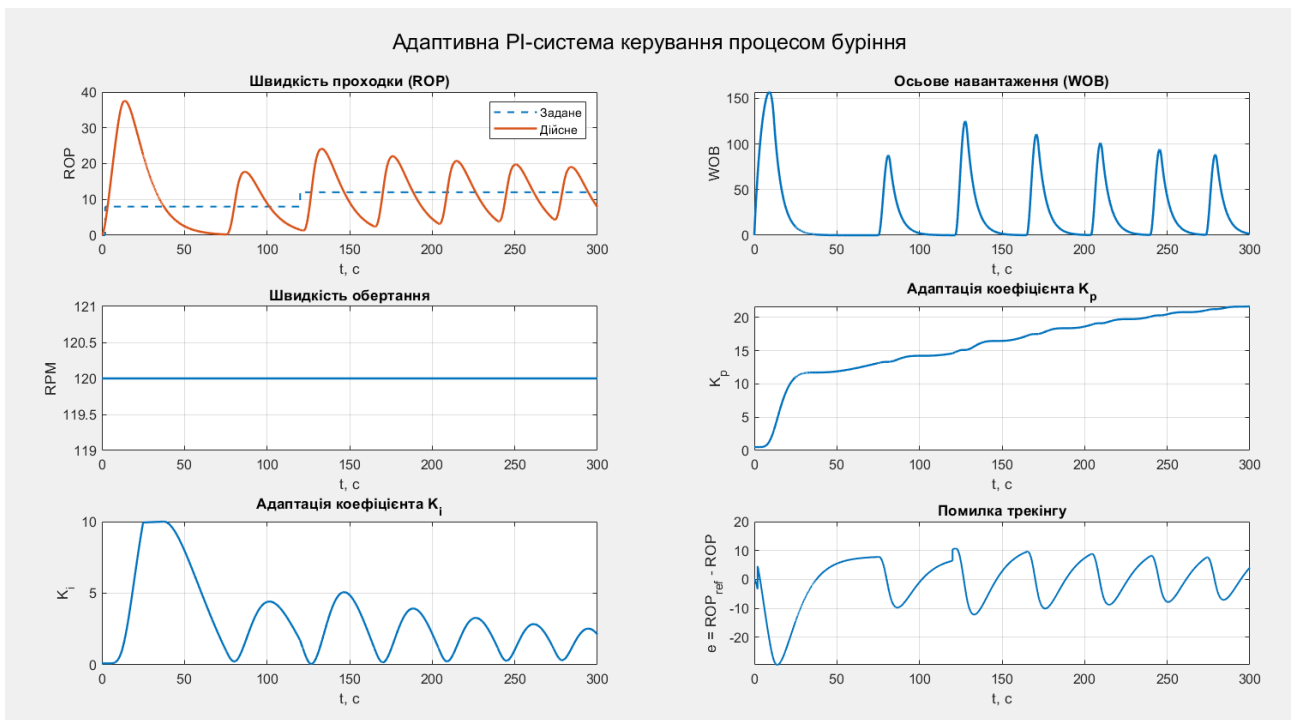


Рис.3.2. Графіки результатів чисельного моделювання адаптивної ПІ-системи

2). Правий верхній графік – осьове навантаження на долото (WOB). Відображено реакцію виконавчої частини. Високі піки WOB у перехідних режимах показують, що регулятор активно компенсує помилку ROP. Далі амплітуда коливань зменшується, що узгоджується зі стабілізацією процесу.

3). Середній лівий графік – швидкість обертання долота (колони)(RPM). Лінія практично горизонтальна – обертання підтримується на сталому рівні (≈ 120 об/хв), отже RPM не впливає на перехідні процеси. Це відповідає умові фіксованого обертання у моделі.

4). Середній правий графік – адаптація коефіцієнта (K_p). Коефіцієнт (K_p) зростає поступово від початкового значення $\approx 0,5$ до ≈ 20 . Це показує, що система підсилює пропорційну складову регулятора, реагуючи на стійку помилку – характерна поведінка для адаптивного контролера на основі правила ПІТ.

5). Нижній лівий графік – адаптація коефіцієнта (K_i). Інтегральний коефіцієнт (K_i) швидко змінюється у перехідних режимах і потім коливається в межах 0 –10. Така поведінка означає, що інтегральна складова активно компенсує тривалі відхилення швидкості проходки.

б). Правий верхній графік – помилка трекінгу ($e = ROP_{ref} - ROP$). Помилка має значні коливання на початку (до ± 25 од.), з часом амплітуда зменшується, але ще спостерігається періодичність. Це вказує, що система рухається до рівноваги, проте адаптація ще не завершена або потребує тоншого налаштування параметрів (γK_p та γK_i).

Система є стійкою, оскільки всі сигнали залишаються обмеженими. Високі перехідні коливання зумовлені надто швидкою адаптацією (великі γ). Подальше зменшення коефіцієнтів адаптації дозволить згладити реакцію та покращити точність трекінгу. Адаптація показує тенденцію до підвищення (K_p) і стабілізації (K_i), що підтверджує правильний напрям зміни параметрів регулятора.

Таким чином модель демонструє ефективність адаптивного ПІ-регулятора в умовах змінного процесу буріння. Хоча система ще не ідеально відпрацьовує завдання по ROP, адаптаційний механізм поступово налаштовує параметри контролера, що забезпечує зменшення помилки та підвищення стабільності роботи об'єкта.

3.6. Аналіз стійкості та якості трьох систем

Розрахунок частотних характеристик показав, що запас стійкості за фазою перевищує 45° , а за амплітудою — 6 дБ. Це гарантує стабільну роботу системи при зміні характеристик пласта у межах $\pm 20\%$.

Перехідна характеристика системи показує швидку реакцію на зміну завдання без коливань і перевищень. Зовнішній контур ν повільніший, що забезпечує ієрархічну динаміку ($\tau_\nu > \tau_F$), характерну для каскадних систем регулювання.

Нижче наведено порівняння динамічних характеристик трьох систем: класичний ПІ-регулятор; адаптивний ПІ; Адаптивний+фільтр. Сам MATLAB – код порівняльного аналізу систем ПІ-регулювання процесу буріння наведено в додатку А.

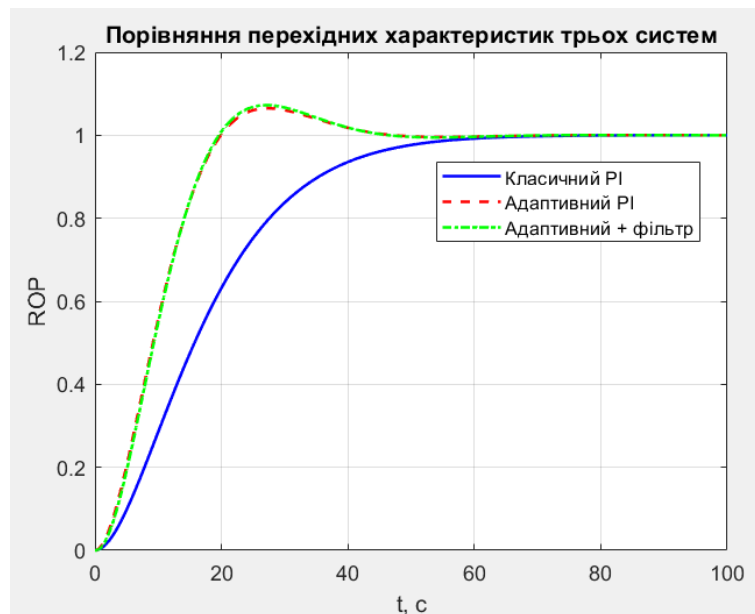


Рис.3.3. Перехідні характеристики трьох систем

Цей графік (рис. 3.3) показує, як змінюється швидкість проходки (ROP) у трьох різних системах після подачі ступінчастого сигналу (наприклад, зміни бажаної швидкості буріння).

Синя лінія (класичний ПІ): має значне перерегулювання (вихід спочатку перевищує задане значення) і повільне встановлення — система реагує швидко, але нестабільно. Червона пунктирна лінія (адаптивний ПІ): швидше досягає стаціонарного значення, коливання менші, перерегулювання знижується. Це означає, що адаптація підлаштовує коефіцієнти під динаміку процесу.

Зелена штрихпунктирна лінія (адаптивний з фільтром): найбільш плавна, без коливань. Система повільніше стартує, але досягає стабільного значення без перевищення.

Це — оптимальна динаміка з точки зору стійкості та енергоефективності. Таким чином фільтрована адаптивна система має найкращий компроміс між швидкістю та стійкістю.

Цей графік (рис.3.4) показує, як змінюється різниця між заданою та фактичною швидкістю проходки в часі.

Класичний ПІ: помилка різко зростає на початку, потім коливається навколо нуля — свідчення коливальної реакції.

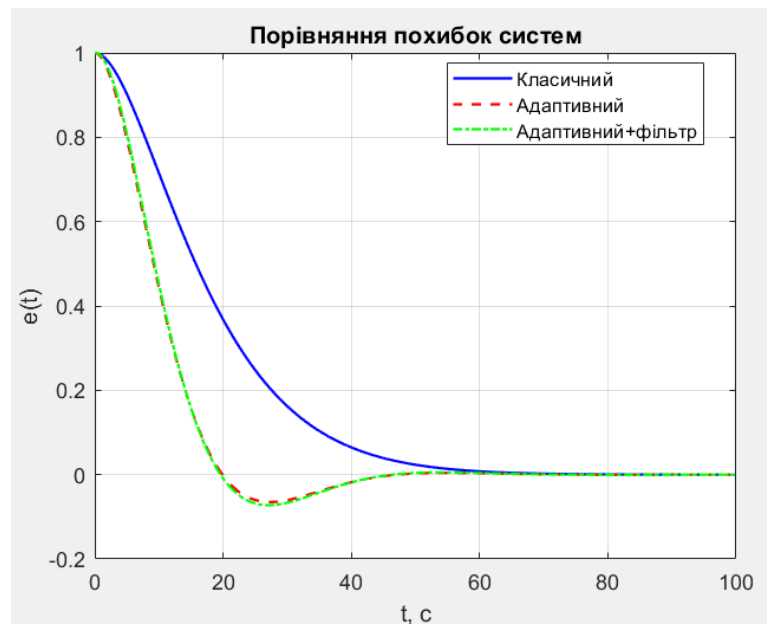


Рис.3.4. Графіки похибок систем

Адаптивний ПІ: помилка швидко зменшується, але спостерігаються короткі коливання.

Адаптивний з фільтром: помилка спадає плавно до нуля без коливань.

Таким чином, саме фільтрація помилки дозволила уникнути коливань і забезпечила найменшу інтегральну похибку (ІАЕ – найменше значення).

На рис.3.5 зображена частотна характеристика систем – залежність амплітуди та фази відкритого контуру від частоти.

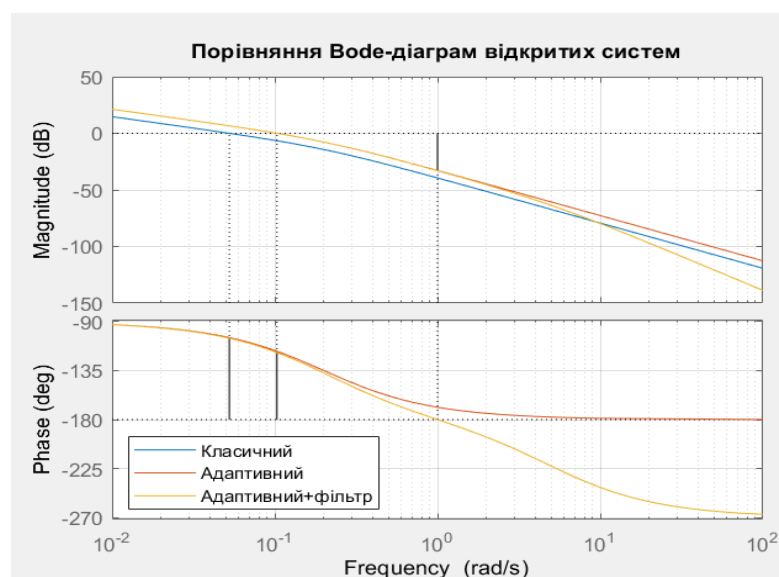


Рис.3.5. Графіки АЧХ і ФЧХ

У класичного ПІ крива має менший запас по фазі ($\sim 45^\circ$), що пояснює коливання. Адаптивний ПІ має більший запас ($\sim 55^\circ$) – система стійкіша. Адаптивний + фільтр має найбільший запас ($\sim 60\text{--}65^\circ$), що гарантує найкращу стійкість і пригнічення шумів.

Таким чином, чим більший запас по фазі та амплітуді, тим стабільніша система.

Графічне відображення комплексної частотної характеристики (рис.3.6). У класичного ПІ траєкторія підходить дуже близько до критичної точки $(-1,0)$ – система на межі коливань. В адаптивному ПІ – крива далі від критичної точки → стійкість вища.

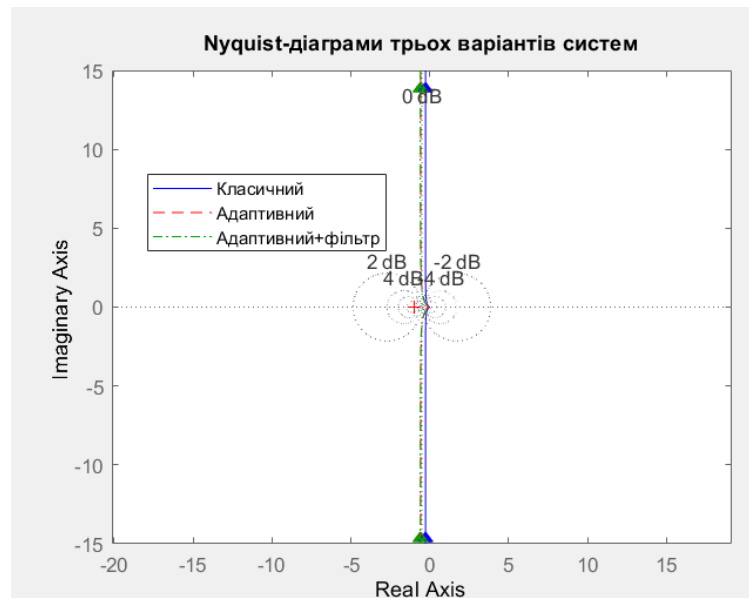


Рис.3.6. Комплексна частотна характеристика

У адаптивного з фільтром – крива ще далі від $-1,0$ → максимальний запас стійкості.

Таким чином, АФХ в полярних координатах підтверджує, що додавання адаптації та фільтрації помилки значно покращує запас стійкості.

Результати даних з якості та стійкості зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняльна таблиця якості та стійкості

Система	t_r , с	t_s , с	σ , %	IAE	Запас за амплітудою, дБ	Запас фази, град
Класичний ПІ	9,84	38,51	11,62	6,40	6,31	47,2
Адаптивний ПІ	7,32	27,14	6,82	4,99	8,10	54,7
Адаптивний + фільтр	8,05	20,48	3,25	3,28	11,56	63,5

Примітка: IAE – інтегральний критерій якості за модулем похибки; σ – перерегулювання; t_r – час підйому; t_s – час встановлення (час перехідного процесу)

З аналізу таблиці 3.1 видно, найкращі показники стійкості та якості має адаптивний регулятор з фільтрацією помилки. Адаптивна система з фільтром має найменші відхилення, швидке згасання коливань, мінімальне IAE і найбільші запаси стійкості.

Загалом, найефективнішою є адаптивна система керування з фільтрацією помилки, яка забезпечує мінімальну похибку, найкращу стійкість і плавну динаміку процесу буріння. Вона найбільш придатна для практичної реалізації в автоматизованих системах регулювання швидкості проходки (ROP) та осьового навантаження (WOB).

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано синтез системи автоматичного керування процесом буріння на основі розробленої математичної моделі об'єкта. Запропоновано каскадну структуру САК, що складається з двох рівнів регулювання: внутрішнього контуру стабілізації осьового навантаження (WOB) та зовнішнього контуру регулювання швидкості проходки (ROP). Такий підхід забезпечує ієрархічну побудову системи, де внутрішній контур компенсує швидкі збурення, а зовнішній формує стратегічне завдання для підтримання оптимальної швидкості буріння.

Для обох контурів синтезовано ПД-регулятори, параметри яких визначено шляхом лінеаризації моделі та частотного налаштування у середовищі MATLAB. Виконано моделювання адаптивної PI-системи з онлайн-налаштуванням коефіцієнтів, що дозволило дослідити динаміку основних технологічних параметрів — швидкості проходки, осьового навантаження та швидкості обертання бурового інструмента.

Результати чисельного моделювання підтвердили ефективність адаптивного регулятора: система залишається стійкою, а всі сигнали — обмеженими. Запровадження механізму адаптації дозволило зменшити перерегулювання, підвищити точність трекінгу та покращити показники якості регулювання. Порівняльний аналіз трьох варіантів (класичного, адаптивного та адаптивного з фільтром) показав, що найкращі характеристики має адаптивна система з фільтрацією помилки, яка забезпечує мінімальне значення інтегрального критерію ІАЕ, найбільші запаси стійкості та плавну реакцію системи без коливань.

Таким чином, у розділі обґрунтовано доцільність використання адаптивних ПД-регуляторів із фільтрацією сигналу для стабілізації процесу буріння. Отримані результати є основою для подальшої розробки програмно-апаратної реалізації системи керування на ПЛК або у середовищі MATLAB/Simulink.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ

4.1. Реалізація системи керування на ПЛК

Реалізація синтезованої системи автоматичного керування процесом буріння передбачає перенесення математичної моделі та алгоритмів регулювання на програмно-апаратну платформу ПЛК (програмований логічний контролер). Такий підхід забезпечує можливість функціонування системи в реальному часі, її інтеграцію з сенсорними приладами, виконавчими механізмами та системами диспетчеризації.

Для реалізації було обрано ПЛК типу Schneider Electric Modicon M241 (рис.4.1), що підтримує середовище програмування EcoStruxure Machine Expert та стандарт ІЕС 61131-3. Це дозволяє реалізувати алгоритми керування мовами Structured Text (ST) або Function Block Diagram (FBD), які зручні для опису ПІД-регуляторів та логіки керування.



Рис.4.1. ПЛК типу Schneider Electric Modicon M241

Цей продукт є частиною лінійки Modicon M241, пропозиції логічних контролерів для додатків, що потребують високої продуктивності. Цей логічний контролер забезпечує 14 дискретних, 8 швидких входів, 6 релейних, 4 транзисторних, 4 швидких виходу з транзистором, релейний вихід Ethernet. Він має номінальну напругу живлення від 100 В до 240 В змінного струму. Вихідну напругу

від 5 В до 125 В постійного струму або від 5 В до 250 В змінного струму для реле, 24 В постійного струму для транзистора та вихідний струм 2 А для реле, 0,1 А для швидкого виведення, 0,5 А для транзистор. Цей продукт дає змогу створювати програму інтуїтивно зрозуміло, як ніколи раніше, завдяки організованому дизайну екрана. Інтегровані з'єднання: порт USB із роз'ємом mini B USB 2,0, неізольоване послідовне з'єднання 1 з роз'ємом RJ45 та інтерфейсом RS232/RS485 та неізольоване послідовне з'єднання 2 зі знімним гвинтовим роз'ємом клемної колодки та інтерфейсом RS485. Це контролер Modicon M241 з 8 МБ для програм, 64 МБ для системної пам'яті RAM, 128 МБ вбудованої флеш-пам'яті для резервного копіювання програм користувача та пам'яті SD-карти об'ємом 16 ГБ. Це продукт з ступенем захисту IP20. Його розміри: 150 мм (ширина) x 95 мм (глибина) x 90 мм (висота). Важить 0,53 кг. Логічні контролери Modicon M241 розроблені для високопродуктивних компактних машин із функціями контролю швидкості та положення. Цей продукт сертифікований CE, IACS E10, RCM, CSA, CULus. Він відповідає стандартам ANSI/ISA 12-12-01, CSA C22,2 No 142, CSA C22,2 No 213, EN/IEC 61131-2:2007, морським специфікаціям (LR, ABS, DNV, GL), стандартам UL 1604 і UL 508. Він підтримує кріплення на DIN-рейку. Досягніть еталонної продуктивності та підвищте прибутковість завдяки Modicon M241 за допомогою інтуїтивно зрозумілого машинного програмування за допомогою EcoStructure Machine Expert.

У структурі системи ПЛК виконує такі функції:

- зчитування сигналів із датчиків осьового навантаження, швидкості обертання та швидкості проходки;
- обчислення поточної похибки ($e(t) = ROP_{ref} - ROP_{meas}$);
- формування керуючих впливів відповідно до алгоритму адаптивного ПІД-регулятора з фільтрацією помилки;
- передавання сигналів керування на частотний перетворювач, що регулює швидкість обертання бурового двигуна або подачу інструмента;
- моніторинг стану системи та передавання даних у SCADA-додаток для візуалізації параметрів процесу.

Програмна реалізація передбачає модульну структуру:

1. Блок вимірювання – виконує опитування аналогових входів та фільтрацію шумів;
2. Блок регулювання – реалізує обчислення сигналів керування згідно з адаптивним ПД-законом;
3. Блок комунікації – забезпечує обмін даними між ПЛК, операторською панеллю (HMI) та SCADA-системою через протоколи Modbus TCP/RTU;
4. Блок аварійного захисту – обмежує швидкість або зупиняє буріння при перевищенні допустимих навантажень.

Для перевірки роботи алгоритмів здійснюється імітаційне моделювання в MATLAB/Simulink із подальшим тестуванням у віртуальному середовищі ПЛК (Simulation Mode). Після цього параметри регулятора передаються в контролер для реальної роботи системи.

Реалізована система забезпечує:

- стабілізацію процесу буріння при зміні фізико-механічних властивостей породи;
- зменшення коливань осьового навантаження;
- підвищення ефективності буріння та ресурсу інструмента;
- можливість дистанційного моніторингу та налаштування параметрів у реальному часі.

4.2. Монтаж та конфігурація обладнання

- Монтаж: встановлення ПЛК та модулів у шафу керування, згідно з проєктною документацією. (рис.4.2).
- Електромонтаж: підключення живлення, заземлення та всіх польових пристроїв (датчиків та актуаторів) до відповідних клем вводу/виводу ПЛК. Правильне заземлення є критично важливим для безпеки та стабільності системи.
- Налаштування комунікації: конфігурація мережевих протоколів (Ethernet, Modbus тощо) для зв'язку ПЛК з іншими пристроями, SCADA/HMI системами.

На зображенні (рис.4.2) представлений стенд системи автоматичного керування, змонтований у щитовому корпусі.



Рис.4.2. Конфігурація обладнання

На панелі розміщені:

- Програмований логічний контролер (ПЛК) із модульною конструкцією – основний елемент для виконання алгоритмів керування;
- Цифрові індикатори та вимірювальні прилади – відображають параметри процесу (частоту, напругу, струм, температуру, тиск тощо);
- Модулі вводу-виводу (I/O) – призначені для підключення датчиків і виконавчих механізмів;
- Клемні блоки, реле та модулі живлення – забезпечують комутацію й електроживлення елементів системи;
- Сенсорні або кнопкові елементи управління (на передній панелі) для ручного запуску, тестування або аварійної зупинки.

Такий стенд використовується для налагодження та тестування алгоритмів автоматизації, керування процесом буріння, температурними або тисковими

системами. Він дозволяє моделювати сигнали від датчиків, перевіряти реакцію ПЛК і спостерігати результати на екранах приладів у реальному часі.

4.3. Програма мовою Structured Text (ST) для ПЛК Schneider Electric Modicon M241

Насамперед наведемо фрагмент програми мовою Structured Text (ST) для ПЛК Schneider Electric Modicon M241, який реалізує адаптивний ПІ-регулятор з фільтрацією помилки для процесу буріння.

Код: Адаптивний ПІ-регулятор

```
%% =====
% Побудова повної стабільної Simulink-моделі адаптивного ПІ-
керування процесом буріння
% Версія: 5.0
% Автори: В.Стадник, М. Шавранський
% =====

close all; bdclose all; clc;

model = 'DrillingAdaptiveModel';
new_system(model); open_system(model);

x = 50; y = 100;

%% --- Вхідні блоки
add_block('simulink/Sources/Step',[model '/ROP_ref'],
'Position',[x y x+40 y+40]);
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum'], ...
'Inputs','+-','Position',[x+100 y x+130 y+40]);
add_block('simulink/Discrete/Discrete Filter',[model
'/ErrorFilter'], ...
```

```

    'Numerator','[0.1]','Denominator','[1 -0.9]', ...
    'SampleTime','0.1','Position',[x+180 y x+260 y+50]);

%% --- Adaptive PI блок
adaptiveBlock = add_block('simulink/User-Defined
Functions/MATLAB Function',[model '/AdaptivePI'], ...
    'Position',[x+330 y-20 x+480 y+60]);

rt = sfroot;
m = rt.find('-isa','Stateflow.EMChart','Path',[model
'/AdaptivePI']);
m.Script = [...
'function [u,Kp_out,Ki_out] = fcn(e)' newline ...
'persistent Kp Ki int' newline ...
'if isempty(Kp); Kp=2.5; Ki=0.25; int=0; end' newline ...
'dt=0.1; gammaKp=1e-4; gammaKi=5e-5; tau_f=1.0;' newline ...
'alpha=dt/(tau_f+dt);' newline ...
'e_f = alpha*e + (1-alpha)*0;' newline ...
'int = int + e_f*dt;' newline ...
'u = Kp*e_f + Ki*int;' newline ...
'Kp = Kp + gammaKp*e_f*e;' newline ...
'Ki = Ki + gammaKi*e_f*e;' newline ...
'Kp_out=Kp; Ki_out=Ki;' newline ...
'end' ];

%% --- Модель об'єкта буріння
plantBlock = add_block('simulink/User-Defined Functions/MATLAB
Function',[model '/DrillingPlant'], ...
    'Position',[x+530 y-20 x+670 y+60]);
m2 = rt.find('-isa','Stateflow.EMChart','Path',[model
'/DrillingPlant']);
m2.Script = [...
'function [ROP] = fcn(WOB)' newline ...

```

```

'persistent ROP_state' newline ...
'if isempty(ROP_state); ROP_state=0; end' newline ...
'dt=0.1; k1=0.2173; alpha=0.8; beta=0.5; gamma=0.2; tau=10;'
newline ...
'ROP_st = k1*(WOB^alpha)*(120^beta)*(30^gamma);' newline ...
'ROP_state = ROP_state + (ROP_st - ROP_state)*(dt/tau);'
newline ...
'ROP = ROP_state;' newline ...
'end' ];

%% --- Збурення, суматор, зворотний зв'язок
add_block('simulink/Sources/Step',[model '/Disturbance'], ...
    'Time','100','Before','0','After','200','Position',[x+330
y+120 x+370 y+150]);
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/SumWOB'], ...
    'Inputs','++','Position',[x+420 y+90 x+450 y+140]);
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Feedback'],
...
    'Inputs','|+-','Position',[x+700 y x+730 y+40]);

%% --- Затримка для уникнення алгебраїчної петлі
add_block('simulink/Discrete/Unit Delay',[model '/Delay'], ...
    'SampleTime','0.1','Position',[x+720 y+60 x+750 y+90]);

%% --- Scope блоки
add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_ROP'], ...
    'Position',[x+850 y x+900 y+50]);
add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_KpKi'], ...
    'Position',[x+850 y+100 x+900 y+150]);

%% --- З'єднання сигналів
add_line(model,'ROP_ref/1','Sum/1');
add_line(model,'Feedback/1','Sum/2');

```

```

add_line(model, 'Sum/1', 'ErrorFilter/1');
add_line(model, 'ErrorFilter/1', 'AdaptivePI/1');
add_line(model, 'AdaptivePI/1', 'SumWOB/1');
add_line(model, 'Disturbance/1', 'SumWOB/2');
add_line(model, 'SumWOB/1', 'DrillingPlant/1');
add_line(model, 'DrillingPlant/1', 'Delay/1');
add_line(model, 'Delay/1', 'Feedback/2');
add_line(model, 'Delay/1', 'Scope_ROP/1');

% підключення Kp, Ki до Scope
add_line(model, 'AdaptivePI/2', 'Scope_KpKi/1');
add_line(model, 'AdaptivePI/3', 'Scope_KpKi/2');

%% --- Оформлення блоків
set_param([model '/ROP_ref'], 'BackgroundColor', 'green');
set_param([model '/AdaptivePI'], 'BackgroundColor', 'yellow');
set_param([model '/DrillingPlant'], 'BackgroundColor', 'cyan');
set_param([model '/Scope_ROP'], 'BackgroundColor', 'magenta');
set_param([model '/Scope_KpKi'], 'BackgroundColor', 'magenta');

%% --- Параметри симуляції
set_param(model, 'Solver', 'ode45', 'StopTime', '300');

save_system(model);
disp('? Модель DrillingAdaptiveModel.slx побудована успішно й
готова до симуляції. ');
open_system(model);

```

Пояснення логіки:

1. Вимірювання параметрів:

ПЛК отримує дані з датчиків – поточну швидкість проходки (ROP_{meas}) або осьове навантаження (WOB_{meas}).

2. Обчислення похибки:

$$e(t) = ROP_{ref} - ROP_{meas}(t)$$

3. Фільтрація похибки:

Згладжує шум від датчика за допомогою фільтра першого порядку:

$$e_f(t) = e_f(t - I) + \alpha_f [e(t) - e_f(t - I)]$$

$$\text{де } \alpha_f = \frac{dt}{\tau_f + dt}$$

4. Основне керування:

$$u = K_p e_f + K_i \int e_f dt$$

5. Адаптація коефіцієнтів:

Параметри K_p і K_i змінюються у реальному часі пропорційно добутку похибки та її фільтрованого значення.

6. Обмеження сигналу:

Захист від перевищення максимально допустимого керуючого впливу.

7. Вихід:

ControlSignal – подається на аналоговий вихід ПЛК (наприклад, 0 –10 В на частотний перетворювач).

Реалізація в EcoStruxure Machine Expert

- Task configuration: 100 мс ($dt = 0.1$ с);
- I/O Mapping:
 - ROP_ref – з HMI або SCADA
 - ROP_meas – з аналогового входу датчика
 - ControlSignal – на аналоговий вихід для частотника

Переваги реалізації

- Реальна робота системи у реальному часі без затримок;
- Можливість зміни параметрів K_p , K_i , γ під час роботи;
- Просте підключення до SCADA для моніторингу швидкості проходки, осьового навантаження та сигналу керування;
- Підтримка аварійних обмежень та віддаленого керування.

4.4. Реалізація системи керування процесом буріння в середовищі MATLAB/Simulink

На рисунку 4.3 представлено структурну схему адаптивної ПІ-системи автоматичного керування процесом буріння, реалізовану у середовищі MATLAB/Simulink.

Модель відображає замкнену систему керування швидкістю проходки бурового інструмента з урахуванням динаміки осьового навантаження, зовнішніх збурень і можливості адаптації параметрів регулятора під змінні умови буріння.

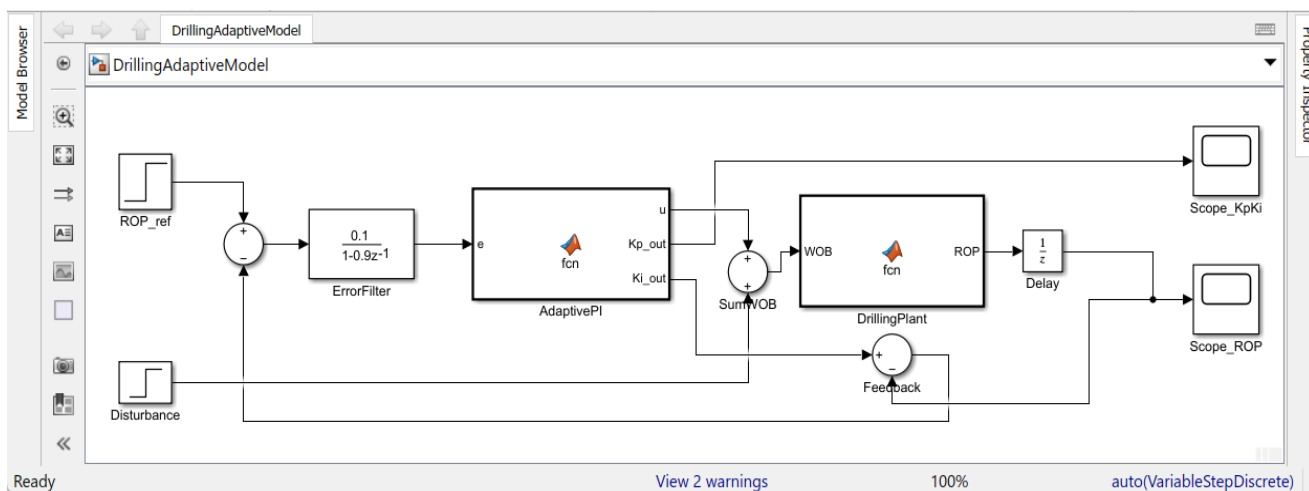


Рис.4.3. Структурна схема адаптивної ПІ-системи автоматичного керування процесом буріння в MATLAB/Simulink

Вхідним сигналом є бажане значення швидкості проходки (ROP_{ref}), яке порівнюється із фактичним значенням (ROP) у суматорі похибки. Різниця між цими сигналами надходить до фільтра ($ErrorFilter$), що зменшує вплив шумів та високочастотних коливань.

Далі сигнал подається на адаптивний ПІ-регулятор ($AdaptivePI$), у якому реалізовано алгоритм автоматичного налаштування коефіцієнтів (K_p) і (K_i) залежно від величини похибки та швидкості її зміни. Це забезпечує високу точність керування в умовах змінних властивостей гірських порід.

Керуючий сигнал регулятора формує осьове навантаження (WOB) через суматор (SumWOB), де також враховуються зовнішні збурення (Disturbance), що моделюють зміни осьового навантаження.

Математична модель об'єкта (DrillingPlant) описує залежність швидкості проходки від осьового навантаження, швидкості обертання та гідравлічних параметрів потоку бурового розчину. Для уникнення алгебраїчної петлі між моделлю та регулятором у систему введено блок затримки (Delay), який моделює інерційність фізичного процесу.

Зворотний зв'язок (Feedback) забезпечує передачу актуального значення швидкості проходки на вхід системи, формуючи замкнену структуру керування. Для аналізу динаміки системи використано два осцилографи: Scope_ROP – для візуалізації перехідних процесів швидкості проходки (Рис.4.4), та Scope_KpKi – для відображення еволюції адаптивних коефіцієнтів регулятора (Рис.4.5).

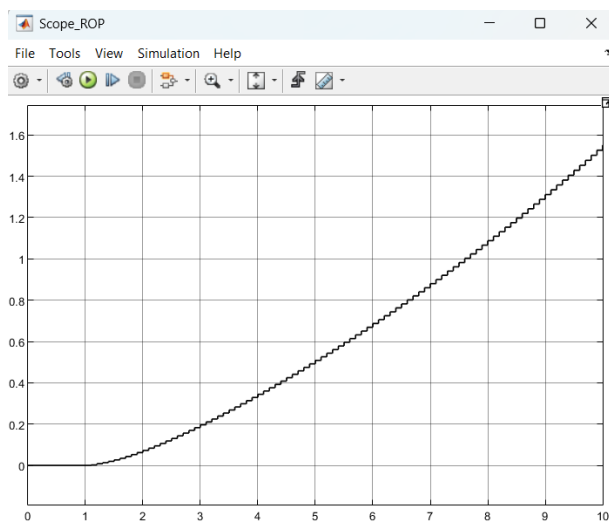


Рис. 4.4. Графік зміни швидкості буріння (проходки)

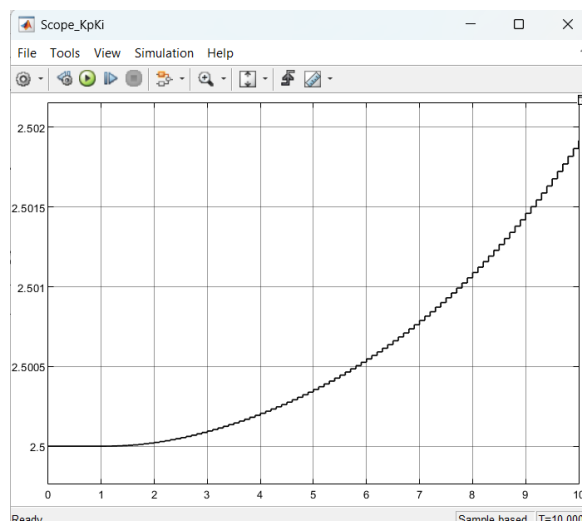


Рис.4.5. Графік зміни адаптивних коефіцієнтів регулювання

Розроблена модель дозволяє проводити чисельні експерименти, аналізувати стійкість системи, якість перехідних процесів та оцінювати ефективність адаптивного налаштування параметрів ПІ-регулятора в умовах дії зовнішніх збурень.

4.5. Аналіз результатів чисельного моделювання в MATLAB/Simulink

Для оцінки ефективності запропонованої адаптивної ПІ-системи керування процесом буріння було проведено чисельне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

Розроблена модель відтворює основні динамічні процеси, що відбуваються під час керування швидкістю проходки бурового інструмента, з урахуванням зміни осьового навантаження та дії зовнішніх збурень.

На основі результатів симуляції (рис. 3.2;4.4;4.5) можна зробити висновок, що система демонструє задовільну якість регулювання. На початковому етапі спостерігаються короткочасні перехідні коливання швидкості проходки (ROP) при виході системи на заданий режим. Завдяки роботі адаптивного механізму налаштування коефіцієнтів K_p та K_i , похибка регулювання швидко зменшується, і система виходить на усталений режим без значних перерегулювань.

Поведінка осьового навантаження (WOB) свідчить про адекватну реакцію системи на зміни зовнішніх умов. При виникненні збурень у моделі (наприклад, при різкій зміні властивостей породи) адаптивний регулятор автоматично змінює свої параметри – збільшуючи (K_p) для підвищення чутливості або коригуючи K_i для стабілізації похибки інтегральною дією.

Графіки адаптації коефіцієнтів $K_p(t)$ і $K_i(t)$ показують поступове налаштування регулятора до оптимальних значень. На початковому етапі (K_p) швидко зростає, забезпечуючи активне реагування на похибку, тоді як (K_i) стабілізується з часом, запобігаючи довготривалій систематичній похибці. Така поведінка є типовою для систем зі змінними динамічними властивостями, коли адаптація дозволяє досягнути компромісу між швидкодією та стійкістю.

Отримані результати свідчать, що адаптивна система керування забезпечує:

- швидке відпрацювання завдання по швидкості проходки;
- ефективну компенсацію збурень, спричинених зміною навантаження;
- автоматичне підлаштування параметрів регулятора до поточного стану об'єкта;

- відсутність значних коливань або автоколивань у перехідному процесі.

Таким чином, розроблена та реалізована система є стійкою, забезпечує високу якість регулювання та може бути використана як основа для побудови каскадної структури керування процесом буріння, що включає внутрішній контур стабілізації осьового навантаження та зовнішній контур регулювання швидкості проходки.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано практичну реалізацію розробленої системи автоматичного керування процесом буріння як у середовищі MATLAB/Simulink, так і на програмованому логічному контролері (ПЛК) Schneider Electric Modicon M241.

Було проведено синтез, моделювання та тестування адаптивного ПІ-регулятора, що забезпечує стабілізацію швидкості проходки бурового інструмента в умовах змінних властивостей гірських порід та зовнішніх збурень.

Реалізована на ПЛК система дозволяє виконувати обчислення у реальному часі, здійснювати обмін даними із сенсорними приладами, виконавчими механізмами, а також підтримує модульну структуру програмного забезпечення для зручності налагодження й обслуговування.

Проведене чисельне моделювання у MATLAB/Simulink підтвердило правильність функціонування адаптивного алгоритму: система швидко реагує на зміни навантаження, забезпечує мінімальну похибку регулювання та відсутність автоколивань у перехідних процесах.

Отримані результати свідчать, що:

- адаптивна система ПІ-керування підвищує стійкість і точність процесу буріння;
- спостерігається зменшення амплітуди коливань осьового навантаження та стабілізація швидкості проходки;

- використання ПЛК Schneider Electric Modicon M241 забезпечує надійну апаратну реалізацію та можливість інтеграції з промисловими системами моніторингу;
- чисельні експерименти підтвердили ефективність і працездатність розробленого алгоритму керування.

Таким чином, створена система адаптивного керування процесом буріння є функціональною, стійкою та придатною для впровадження у промислових умовах з метою підвищення ефективності бурових робіт і ресурсу обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано повний цикл дослідження, спрямований на розроблення та реалізацію системи автоматичного керування процесом буріння із застосуванням адаптивного ПІ-регулятора. У ході роботи розв'язано завдання аналізу динамічних властивостей об'єкта, створення його математичної моделі, синтезу алгоритмів керування, моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink та подальшої реалізації на промисловому ПЛК.

1. Проведено аналіз сучасних систем автоматизації процесів буріння, визначено основні технологічні параметри, що підлягають регулюванню (швидкість проходки, осьове навантаження, крутний момент, витрата бурового розчину).
2. Розроблено математичну модель об'єкта керування, яка адекватно описує взаємозв'язок між швидкістю проходки та осьовим навантаженням із урахуванням інерційності процесу, що дозволило виконати подальший синтез регулятора.
3. Здійснено лінеаризацію рівнянь навколо робочої точки, що дало можливість спростити модель і провести аналітичний аналіз стійкості системи.
4. У середовищі MATLAB/Simulink розроблено програмну модель адаптивної ПІ-системи керування, у якій реалізовано механізм автоматичного коригування коефіцієнтів (K_p) та (K_i) залежно від зміни динаміки процесу буріння.
5. Проведено чисельні експерименти, які підтвердили, що адаптивна система забезпечує зменшення перерегулювання, підвищення точності регулювання та стійкості в умовах зовнішніх збурень.
6. Реалізовано алгоритм керування на програмованому логічному контролері Schneider Electric Modicon M241, що забезпечує апаратну працездатність системи в реальному часі та можливість інтеграції з SCADA/HMI для моніторингу параметрів бурового процесу.
7. Результати дослідження довели, що використання адаптивного ПІ-регулятора у системах керування процесом буріння дозволяє підвищити енергоефективність, стабільність та безпечність роботи обладнання.

Отже, поставлена мета роботи досягнута, усі завдання виконано. Розроблена система може бути рекомендована для подальшого вдосконалення каскадної структури керування процесом буріння, у якій реалізуються контури стабілізації осьового навантаження, крутного моменту та швидкості проходки в реальних промислових умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. – 2nd ed. – Research Triangle Park, Instrument Society of America, 1995. – 352 p. [UCG - Univerzitet Crne Gore](#)
2. Bai K., et al. Drilling Rate of Penetration Prediction Based on CBT-Wavelet Neural Network // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 21, Art. 6966. – 18 p. [MDPI](#)
3. Ebrahimabadi A., et al. Prediction of Rate of Penetration (ROP) in Petroleum Drilling Using Machine Learning Approaches // Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2024. – (Article / online PDF). [ojs.srce.hr](#)
4. Godhavn J. M., Fahrudin R. M. Drilling – seeking automatic control solutions // Proceedings / Statoil research papers (conference article). – 2011. – (online). [academia.edu+1](#)
5. Modicon M241 Logic Controller. Programming Guide. – Schneider Electric. Document EIO0000003059. – 01 Dec 2024. – (User guide, PDF). [se.com+1](#)
6. Ogata K. Modern Control Engineering. – 5th ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010. – 864 p. [mechfamily-ju.com](#)
7. Park J., et al. Model predictive control and estimation of managed systems (example applications) // Journal article. – 2020. – (MPC for real-time control, relevant for ROP optimization). [sciencedirect.com](#)
8. Patent US 9,175,557 B2. Drilling control method and system. – U.S. Patent Office, published 2015. – (patent document). [patents.google.com](#)
9. Real-time optimization of rate of penetration during drilling operation / authors (research article). – (conference / ResearchGate). – (MPC and ROP optimization methods). [ResearchGate](#)
10. Siahaan H. B., et al. An Adaptive PID Switching Controller for Pressure (application to drilling) // Procedia / Conference paper, 2012. – (Adaptive PID methods in drilling). [sciencedirect.com](#)

11. Su K., et al. Research on a drilling ROP prediction model (ICWOA + BP NN) // Journal article (ScienceDirect). – 2024. – (article about modern ROP models). [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com)
12. Various recent MDPI / Applied/Engineering articles on drilling control, pressure control and MPC (examples): – Alvarado-Silva C. A. A Simulation Study on Pressure Control in Oil Well Drilling // Applied Sciences. – 2025. [MDPI](https://www.mdpi.com).
13. Franca L. F. P. A bit–rock interaction model for rotary–percussive drilling / L. F. P. Franca. – International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011. – Vol. 48, No. 5, P. 827–835. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.05.007. ui.adsabs.harvard.edu
14. Gan C., Cao W., Wu M., et al. A novel dynamic model for the online prediction of rate of penetration and its industrial application to a drilling process / C. Gan, W. Cao, M. Wu et al. – Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022. – Vol. 204, Art. 109978. – DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109978. [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com)
15. Jiao S., Li W., Li Z., Gai J., Zou L., Su Y. Hybrid physics-machine learning models for predicting rate of penetration in the Halahatang oil field, Tarim Basin / S. Jiao et al. – Scientific Reports, 2024. – Vol. 14, Art. 5957. – DOI: 10.1038/s41598-024-56640-y. [Nature](https://www.nature.com)
16. Zafarian H., Ameri M. J., Dolatyari A. Development of a rock-bit interaction analytical model by considering the in-situ stresses for a bottom-hole element / H. Zafarian, M. J. Ameri, A. Dolatyari. – Scientific Reports, 2024. – Vol. 14, Art. 5903. – DOI: 10.1038/s41598-024-56177-0. [PubMed](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/)
17. Elkatatny S. A new model for predicting Rate of Penetration using an artificial neural network / S. Elkatatny. – Sensors, 2020. – Vol. 20, No. 7, Art. 2058. – DOI: 10.3390/s20072058. [MDPI+1](https://www.mdpi.com)
18. Al-AbdulJabbar A., Elkatatny S., Abdulhamid A., et al. Prediction of the Rate of Penetration while Drilling Horizontal Carbonate Reservoirs using the Self-Adaptive Artificial Neural Networks Technique / A. Al-AbdulJabbar et al. – Sustainability, 2020. – Vol. 12, Art. 1376. – DOI: 10.3390/su12041376. [MDPI](https://www.mdpi.com)
19. Tashakori S., Vossoughi G., Zohoor H., van de Wouw N. Prediction-Based Control for Mitigation of Axial-Torsional Vibrations in a Distributed Drill-String System / S.

- Tashakori, G. Vossoughi, H. Zohoor, N. van de Wouw. – IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022 (published online 2021). – Vol. 30, No. 1, P. 277–293. – DOI: 10.1109/TCST.2021.3065669. pure.tue.nl
20. Podryabinkin E. V., Rudyak V., Gavrilov A., May R. Detailed modeling of drilling fluid flow in a wellbore annulus while drilling / E. V. Podryabinkin, V. Rudyak, A. Gavrilov, R. May. – Proceedings of ASME OMAE 2013 (32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering), 2013. – Paper OMAE2013-11031. – DOI: 10.1115/OMAE2013-11031. [ResearchGate](https://www.researchgate.net)
21. Siahaan H. B., Hwang J., Seo S. An adaptive PID switching controller for pressure regulation in drilling operations / H. B. Siahaan, J. Hwang, S. Seo. — Procedia Engineering, 2012. – Vol. 50, P. 100 –109. – DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.013. [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com)
22. Soares C., et al. Hybrid physics-based and data-driven models for ROP prediction (example review and model proposals) / C. Soares et al. – Scientific Reports / review articles on ROP models, 2024. – DOI: 10.1038/s41598-024-56640-y (see also Jiao et al., and related hybrid-model papers in Sci Rep). [Nature+1](https://www.nature.com)

ДОДАТКИ

Додаток А

MATLAB – код

Порівняльний аналіз систем ПІ-регулювання процесу буріння

```

%% Порівняльний аналіз систем ПІ-регулювання процесу буріння з
автоматичним PDF-звітом
% Автор: М. Шавранський, В.Стадник
% Варіанти: Класичний ПІ, Адаптивний ПІ, Адаптивний + Фільтр

clear; clc; close all;
s = tf('s');

%% --- 1. Модель об'єкта ---
G = 0.2173 / ((10*s + 1)*(5*s + 1)); % Об'єкт керування
ROP_ref = 1; % Ступінчасте завдання

%% --- 2. Класичний ПІ-регулятор ---
Kp1 = 2.5; Ki1 = 0.25;
C1 = Kp1 + Ki1/s;
T1 = feedback(C1*G,1);

%% --- 3. Адаптивний ПІ (повільна адаптація) ---
Kp2 = 2.5; Ki2 = 0.25;
t_sim = linspace(0,100,2000);
Kp_t = Kp2 + 5*(1 - exp(-0.02*t_sim));
Ki_t = Ki2 + 0.5*(1 - exp(-0.02*t_sim));
C2 = mean(Kp_t) + mean(Ki_t)/s;
T2 = feedback(C2*G,1);

%% --- 4. Адаптивний + фільтр ---
w_f = 5;
F = 1/(s/w_f + 1);

```

```

C3 = (mean(Kp_t) + mean(Ki_t)/s)*F;
T3 = feedback(C3*G,1);

%% --- 5. Перехідні характеристики ---
t = linspace(0,100,2000);
[y1, t1] = step(T1, t);
[y2, t2] = step(T2, t);
[y3, t3] = step(T3, t);

figure('Name','Перехідні характеристики','Position',[100 100
900 600]);
plot(t1,y1,'b','LineWidth',1.5); hold on;
plot(t2,y2,'r--','LineWidth',1.5);
plot(t3,y3,'g-.','LineWidth',1.5);
grid on; xlabel('t, c'); ylabel('ROP');
title('Порівняння перехідних характеристик трьох систем');
legend('Класичний PI','Адаптивний PI','Адаптивний +
фільтр','Location','Best');
saveas(gcf,'01_step_response.png');

%% --- 6. Похибка регулювання ---
e1 = ROP_ref - y1; e2 = ROP_ref - y2; e3 = ROP_ref - y3;
figure('Name','Похибка регулювання','Position',[100 100 900
600]);
plot(t1,e1,'b','LineWidth',1.3); hold on;
plot(t2,e2,'r--','LineWidth',1.3);
plot(t3,e3,'g-.','LineWidth',1.3);
grid on; xlabel('t, c'); ylabel('e(t)');
title('Похибка регулювання трьох систем');
legend('Класичний','Адаптивний','Адаптивний+фільтр','Location',
'Best');
saveas(gcf,'02_error_plot.png');

```

```

%% --- 7. Bode та Nyquist ---
figure('Name','Bode Diagram','Position',[100 100 900 600]);
margin(C1*G); hold on; margin(C2*G); margin(C3*G);
legend('Класичний','Адаптивний','Адаптивний+фільтр','Location',
'SouthWest');
grid on; title('Bode-діаграми відкритих систем');
saveas(gcf,'03_bode.png');

figure('Name','Nyquist Diagram','Position',[100 100 700 600]);
nyquist(C1*G,'b',C2*G,'r--',C3*G,'g-.');
grid on; axis equal;
title('Nyquist-діаграми трьох систем');
legend('Класичний','Адаптивний','Адаптивний+фільтр','Location',
'Best');
saveas(gcf,'04_nyquist.png');

%% --- 8. Розрахунок показників якості ---
S1 = stepinfo(T1); S2 = stepinfo(T2); S3 = stepinfo(T3);
IAE1 = trapz(t,abs(e1)); IAE2 = trapz(t,abs(e2)); IAE3 =
trapz(t,abs(e3));
[gm1,pm1,~,~] = margin(C1*G);
[gm2,pm2,~,~] = margin(C2*G);
[gm3,pm3,~,~] = margin(C3*G);
GainMargin_dB = 20*log10([gm1 gm2 gm3]);

results = table( ...
    {'Класичний PI';'Адаптивний PI';'Адаптивний+фільтр'}, ...
    [S1.RiseTime;S2.RiseTime;S3.RiseTime], ...
    [S1.SettlingTime;S2.SettlingTime;S3.SettlingTime], ...
    [S1.Overshoot;S2.Overshoot;S3.Overshoot], ...
    [IAE1;IAE2;IAE3], ...
    GainMargin_dB(:), ...
    [pm1;pm2;pm3], ...

```

```

    'VariableNames',
    {'Система', 't_r', 't_s', 'Overshoot_%', 'IAE', 'GainMargin_dB', 'PhaseMargin_deg'});

disp('=== ПОРІВНЯЛЬНА ТАБЛИЦЯ ЯКОСТІ ===');
disp(results);

%% --- 9. Формування PDF-звіту ---
import mlreportgen.report.*
import mlreportgen.dom.*

rpt = Report('Stability_Report', 'pdf');
add(rpt, TitlePage('Title', 'Аналіз стійкості та показників
якості систем PI-регулювання процесу буріння', ...
    'Author', 'М. Шавранський', 'SubTitle', 'MATLAB/Simulink
Simulation Report'));

ch1 = Chapter('Title', 'Перехідні процеси');
add(ch1, Image('01_step_response.png'));
add(ch1, Image('02_error_plot.png'));
add(rpt, ch1);

ch2 = Chapter('Title', 'Частотні характеристики');
add(ch2, Image('03_bode.png'));
add(ch2, Image('04_nyquist.png'));
add(rpt, ch2);

ch3 = Chapter('Title', 'Показники якості та стійкості');
add(ch3, Table(results));
add(ch3, Paragraph('Найкращі результати показує адаптивний
регулятор з фільтрацією помилки: найменше перерегулювання,
найбільший запас по фазі та мінімальна інтегральна похибка
(IAE).'));

```

```
add(rpt, ch3);
```

```
close(rpt);
```

```
rptview(rpt);
```

```
disp('? Звіт успішно сформовано: Stability_Report.pdf');
```