

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП -47.00.00.000 ПЗ

група АКП -23-1К

Богдан Коваль

2025 рік

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

Коваль Богдан Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518.52

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оптимальне керування процесом буріння нафтових і

(назва роботи)

газових свердловин

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

(підпис)

(дата)

О. В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-1К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Б. І. Коваль

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(підпис)

(дата)

В. С. Борин

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(підпис)

(дата)

Р. Б. Скрип'юк

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідуючий кафедри

доцент

(підпис)

(дата)

А. І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І. Лагойда.

« » 20 року

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

Ковалю Богдану Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Оптимальне керування процесом буріння нафтових і
газових свердловин.**

керівник роботи Скрип'юк Ростислав Богданович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломої практики,
технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Сучасний стану оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин. 2. Моделювання процесу буріння. 3. Розрахунок оптимальних параметрів режиму буріння методом бар'єрних функцій.

Висновки. Перелік використаної літератури.

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

1. БР.АКП-47.00.00.001 – Структурна схема технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин як об'єкту керування.

2. БР.АКП-47.00.00.002 – Математична модель процесу буріння свердловин.

3. БР.АКП-47.00.00.003 – Критерії оптимізації процесу буріння.

4. БР.АКП-47.00.00.004 – Результати досліджень статистичних характеристик моменту на долоті при бурінні свердловин.

5. БР.АКП-47.00.00.005 – Розрахунок оптимальних параметрів режиму буріння методом бар'єрних функцій.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасний стану оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин	13.05.2025	
2	Моделювання процесу буріння	23.05.2025	
3	Розрахунок оптимальних параметрів режиму буріння методом бар'єрних функцій	28.05.2025	
5	Оформлення бакалаврської роботи	12.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Б. І. Коваль _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Р. Б. Скрип'юк _____
(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота містить: 66 сторінки, 30 рисунків, 2 таблиця, 9 джерел.

Тема: «Оптимальне керування процесом буріння нафтових і газових свердловин» містить».

Об'єкт дослідження: процес буріння нафтових і газових свердловин у контексті сучасних технологій видобутку вуглеводнів.

Предмет дослідження: засоби оптимального керування параметрами бурового процесу для підвищення ефективності.

Мета роботи полягає у визначенні математичної моделі процесу поглиблення нафтових і газових свердловин для задач оптимізації керування.

Результати роботи: у роботі наведено результати статистичного аналізу основних параметрів процесу буріння нафтових і газових свердловин. Визначено статистичні показники процесу буріння, які доводять, що досліджувані параметри підпорядковуються нормальному закону розподілу та мають експоненціальну автокореляційну функцію. Це в свою чергу дозволило визначити спектральну щільність досліджуваних параметрів і амплітудно-фазові характеристики формуючих фільтрів.

Визначено оптимальні режимні параметри процесу буріння методом бар'єрних функцій за допомогою програмного пакету Matlab.

Ключові слова: математична модель, критерій оптимальності, електробур, буріння, момент на долоті, параметри режиму буріння, метод бар'єрних функцій.

ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 66 pages, 30 figures, 2 tables, 9 sources.

Topic: "Optimal control of the drilling process of oil and gas wells" contains".

Object of research: the drilling process of oil and gas wells in the context of modern hydrocarbon production technologies.

Subject of research: means of optimal control of drilling process parameters to increase efficiency.

The purpose of the work is to determine a mathematical model of the process of deepening oil and gas wells for control optimization problems.

Results of the work: the work presents the results of statistical analysis of the main parameters of the drilling process of oil and gas wells. Statistical indicators of the drilling process have been determined, which prove that the studied parameters obey the normal distribution law and have an exponential autocorrelation function. This, in turn, allowed us to determine the spectral density of the studied parameters and the amplitude-phase characteristics of the shaping filters.

The optimal operating parameters of the drilling process were determined by the barrier function method using the Matlab software package.

Keywords: mathematical model, optimality criterion, electric drill, drilling, bit torque, drilling mode parameters, barrier function method.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 СУЧАСНИЙ СТАНУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН	9
1.1. Загальна характеристика процесу буріння.....	9
1.2. Структурна схема технологічного процесу поглиблення нафтових і газових свердловин як об'єкта керування	11
Висновки до розділу.....	14
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ	
2.1. Математичні моделі процесу поглиблення свердловин.....	15
2.2 Критерій оптимізації процесу поглиблення свердловин	21
2.3 Вибір системи автоматизації процесу буріння свердловин.....	24
Висновки до розділу.....	25
3 РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ БУРІННЯ МЕТОДОМ БАР'ЄРНИХ ФУНКЦІЙ	24
3.1 Визначення математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення	27
3.2 Визначення закону розподілу та перевірка його за критерієм Пірсона.....	30
3.3 Визначення автокореляційної функції.	44
3.4 Визначення спектральної щільності досліджуваного процесу	55

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Оптимальне керування процесом буріння нафтових і газових свердловин	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Коваль Б. І.						
Перевір.		Зварич Г.Г.						
Реценз.		Борин В. С.						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А. І.						
						ІФНТУНГ, АКП-23-1К		

3.5 Розрахунок оптимальних параметрів режиму буріння методом бар'єрних функцій	58
Висновки до розділу.....	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ОСОД	– оцінка стану опор долота;
СПО	– спуско-підймальна операція;
АСУ	– автоматизована система управління;
ПРІ	– породо-руйнівний інструмент;
ГНТ	– геолого-технологічний наряд;
АВПТ	– аномально високий пластовий тиск;
АФХ	– амплітудно-фазова характеристика;
СН	– санітарні норми;
ТУ	– технологічна установка;
ДВЗ	– двигун внутрішнього згоряння;
ПЗ	– програмне забезпечення;

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Буріння нафтових і газових свердловин є одним із найважливіших і найвідповідальніших етапів у процесі розвідки та видобутку вуглеводнів. Вартість бурових робіт складає значну частку загальних витрат у нафтогазовій галузі, а від якості їх виконання залежить подальша ефективність експлуатації свердловин. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває задача оптимального керування процесом буріння, яка дозволяє мінімізувати витрати часу і ресурсів, підвищити безпеку робіт та зменшити ризики виникнення аварійних ситуацій. Сучасні бурові установки є складними технічними системами, робота яких залежить від великої кількості змінних параметрів, таких як механічна швидкість буріння, навантаження на долото, частота обертання бурового інструмента, тиск бурового розчину тощо. Оптимізація керування цими параметрами потребує застосування сучасних математичних методів, алгоритмів моделювання, а також автоматизованих систем керування, здатних адаптуватися до змінних умов реального середовища [1÷4].

Метою даного дослідження є аналіз та розробка підходів до оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин із використанням сучасних інформаційних технологій, що дозволяють підвищити ефективність і надійність цього критично важливого процесу. Тому проблема моделювання технологічного процесу буріння свердловин для задач оптимізації керування є на сьогодні актуальною.

Тому сучасний підхід передбачає впровадження автоматизованих систем оптимального керування, що базуються на цифрових технологіях, математичному моделюванні, системах підтримки прийняття рішень і штучному інтелекті.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 СУЧАСНИЙ СТАН ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛЛОВИН

1.1. Загальна характеристика процесу буріння

Сучасні системи оптимального керування бурінням характеризуються: високою адаптивністю до змінних умов роботи; інтегрованим підходом до контролю та діагностики; можливістю дистанційного моніторингу та управління; підвищеною надійністю та безпекою. Процес буріння нафтових і газових свердловин є складним технологічним процесом, що характеризується високою динамічністю, значною кількістю змінних параметрів та взаємозалежних факторів. Ефективне керування бурінням є ключовим чинником підвищення продуктивності, зниження технічних ризиків та забезпечення безпеки операцій [1,2,6].

На сучасному етапі розвиток систем оптимального керування процесом буріння базується на інтеграції наступних напрямків:

– реалізація систем збору та аналізу даних у режимі реального часу (Real-Time Monitoring): використання датчиків, телеметричних систем і автоматизованих платформ дозволяє отримувати безперервний потік інформації про основні параметри буріння: тиск і температуру в свердловині, швидкість обертання бурового інструменту, момент навантаження, характеристики бурового розчину. Це забезпечує основу для оперативного прийняття рішень.

– застосування методів математичного моделювання та оптимізації: розробляються складні математичні моделі, які описують динаміку процесу буріння з урахуванням геологічних, гідродинамічних і механічних параметрів. На їх основі реалізуються алгоритми оптимізації з використанням методів чисельного моделювання, генетичних алгоритмів, нейронних мереж і методів штучного інтелекту.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– впровадження технології цифрових близнюків (Digital Twins): цифрові близнюки забезпечують віртуальне відтворення реальних процесів буріння, що дозволяє моделювати різні режими роботи та прогнозувати наслідки змін параметрів у реальному часі, тим самим підвищуючи ефективність і безпеку керування.

Буріння нафтових і газових свердловин це складний багатокомпонентний процес, що включає механічне руйнування породи, циркуляцію бурового розчину, обробку інформації про параметри свердловини та прийняття оперативних рішень. Ефективність бурових робіт значною мірою залежить від правильного вибору режимів буріння (навантаження на долото, частоти обертання, витрати бурового розчину тощо) та їх коригування в реальному часі відповідно до змін геологічних і технічних умов.

У зв'язку з цим зростає потреба в інтеграції сучасних автоматизованих систем керування, які здатні підвищити точність і оперативність контролю процесу буріння, а також оптимізувати витрати матеріальних і енергетичних ресурсів. Автоматизація бурових процесів передбачає впровадження систем моніторингу, збору, обробки та аналізу даних, а також систем автоматичного або напівавтоматичного регулювання технологічних параметрів.

Оптимізація процесу буріння передбачає досягнення балансу між витратами, швидкістю проходження та технічною надійністю. Сучасні підходи включають[1-6] :

- математичне моделювання процесу буріння, що дозволяє оцінити вплив параметрів на ефективність процесу та передбачити небажані ситуації;
- методи багатокритеріальної оптимізації, які враховують одночасно кілька параметрів: вартість, час, технічний ризик, знос інструменту;
- еволюційні та генетичні алгоритми, які застосовуються для пошуку оптимальних параметрів в умовах невизначеності;
- імітаційне моделювання, що дозволяє створити віртуальні сценарії буріння з метою їх оптимізації ще до початку реальних робіт.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптимізація бурового процесу спрямована на досягнення найкращих техніко-економічних показників буріння за рахунок вдосконалення параметрів і режимів роботи обладнання.

Створення математичних моделей дозволяє описати взаємозв'язки між параметрами процесу буріння: навантаженням на долото, швидкістю обертання, витратою бурового розчину, гідравлічним опором тощо. Це створює основу для прогнозування ефективності роботи свердловини та виявлення оптимальних режимів:

1) Багатокритеріальна оптимізація – враховується кілька цілей одночасно, наприклад, мінімізація часу буріння, зниження зносу інструмента та енергоспоживання.

2) Генетичні та еволюційні алгоритми – методи штучного інтелекту, що імітують еволюційні процеси природи. Вони застосовуються для пошуку оптимальних параметрів буріння у складних умовах, де неможливо отримати точну аналітичну залежність між вхідними і вихідними величинами.

1.2 Структурна схема технологічного процесу поглиблення нафтових і газових свердловин як об'єкта керування

Вибір системи автоматизації процесу буріння свердловин — це критичний етап у проектуванні та реалізації сучасних бурових установок. Метою автоматизації є підвищення ефективності, безпеки та надійності процесу буріння, а також зменшення витрат і часу на проведення робіт.

Процес поглиблення нафтових і газових свердловин є складною технологічною системою, яка включає в себе низку взаємопов'язаних підпроцесів і обладнання, що підлягають централізованому або автоматизованому керуванню. Для його ефективного управління розробляється структурна схема, що відображає основні компоненти системи, їх взаємодію та інформаційні потоки.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для цілей автоматизації та оптимального керування такий процес розглядається як об'єкт керування, який має входні дії (керуючі впливи), вихідні параметри (контрольовані змінні) та збурення (внутрішні та зовнішні фактори).

Технологічний процес спорудження свердловини здійснюється за допомогою бурової установки, яка є складним об'єктом з багатьма каналами передачі, як керуючих впливів, так і збурень. Структурна схема технологічного процесу поглиблення нафтових і газових свердловин як об'єкта керування наведено на рис.1.1 [2].

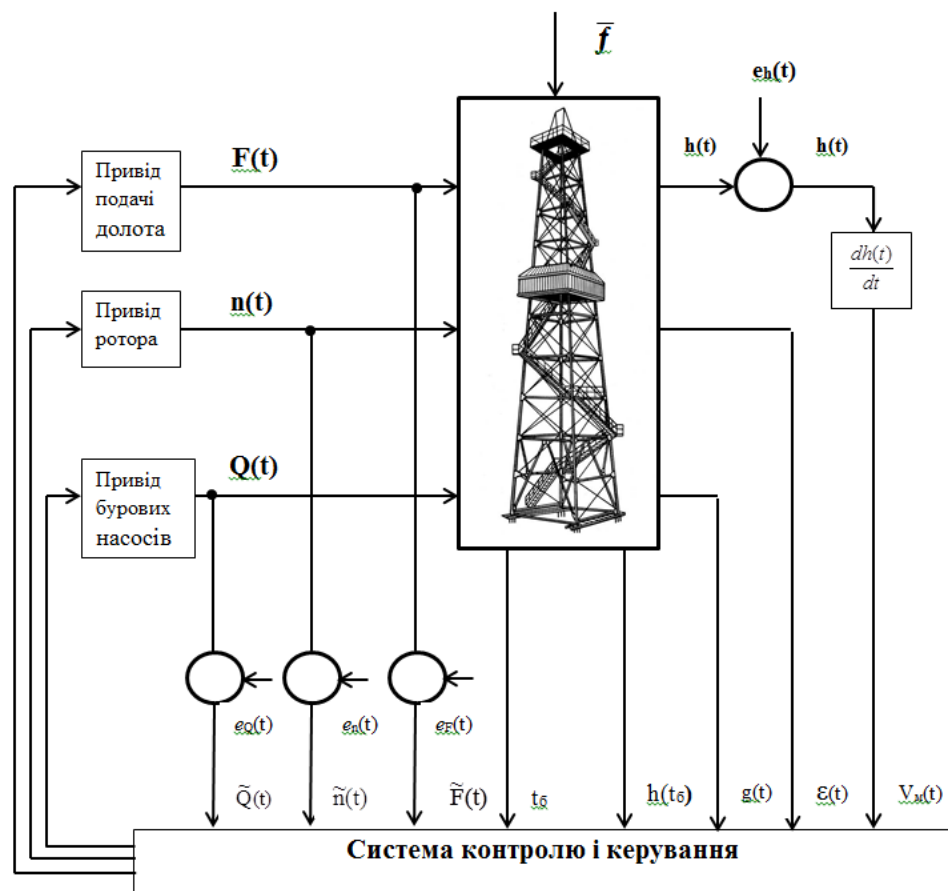


Рисунок 1.1 – Структурна схема технологічного процесу поглиблення нафтових і газових свердловин як об'єкта керування [2]: $F(t)$ – осьова сила на долото; $n(t)$ – швидкість обертання долота; $Q(t)$ – витрата промивної рідини; $h(t)$ – проходка долота; $e_h(t)$, $e_F(t)$, $e_n(t)$, $e_Q(t)$ – адитивні шуми у відповідних вимірювальних каналах; t_b – час буріння; $h(t_b)$ – проходка на долото; $\epsilon(t)$, $g(t)$ – оцінка технічного стану оснащення і опор долота; f – вектор, який характеризує взаємодію об'єкта керування з навколишнім середовищем (вектор збурення)

Результатом дії вхідних впливів є величини, які характеризують стан керованого об'єкта, ефективність його протікання та техніко-економічні показники буріння. Керуючі впливи мають бути такими, щоб перевести систему з деякого початкового стану у визначений кінцевий стан таким чином, щоб була досягнута мета керування.

Осьова сила на долото та швидкість його обертання визначають величину енергії, що вивільнюється при періодичних ударах зубів долота об поверхню вибою, а промивальна рідина для ефективного перебігу процесу руйнування вибою свердловини повинна забезпечити його повне очищення.

Керуючі впливи мають відповідати деяким додатковим вимогам. Зокрема керуючі впливи повинні переводити об'єкт із початкового стану (нульова проходка, нове долото) в кінцевий стан (проходка за рейс, відпрацьоване долото) – умова керованості. Проаналізувавши фізичну суть процесу, бачимо, що осьова сила на долото, швидкість його обертання і витрата промивальної рідини задовільняють умови керованості процесу буріння свердловини.

Для вимірювання режимних параметрів безпосередньо на вибої свердловини використовують природні канали зв'язку (колона бурильних труб, стовп промивальної рідини). Їх оцінка здійснюється за показами наземних приладів. Природні канали зв'язку породжують адитивні шуми, які в загальному випадку є нестационарними.

До показників, які характеризують стан керованого об'єкта, належить проходка на долото і технічний стан оснащення. Так як проходку на долото можна виміряти на пряму, то про технічний стан оснащення можна судити лише опосередковано за моментом на долоті та механічною швидкістю буріння, яка дозволяє оцінити ефективність процесу. Проходка на долото оцінюється за переміщенням верхнього кінця колони бурильних труб [6].

Бурильна колона є каналом, по якому надходить інформація від вибою свердловини на поверхню. Внаслідок дії на колону таких факторів, як осьова сила розтягу під дією власної ваги колони бурильних труб, осьова сила стиску

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нижньої частини колони бурильних труб при створенні навантаження на долото, підймальна сила промивальної рідини, дія на колону температури свердловини, навантаження від дії відцентрових сил при обертанні колони, розтягуюче навантаження при прокачуванні промивальної рідини, сили від дії тертя колони в свердловині, сили згину в нахилених свердловинах та динамічні сили, що зумовлені інерційністю колони, дійсне переміщення долота на вибої свердловини вимірюють з певною похибкою, яку можна трактувати як адитивний шум.

Висновки до розділу

Проаналізовано процес буріння свердловин, який є багатofакторним і нелінійним, який залежить від численних змінних та обмежень, серед яких основними є вага на долото, частота обертання бурової колони, витрата промивальної рідини, гідравлічний тиск та ін.

У рамках задачі оптимального керування важливим є знаходження таких режимних параметрів, що забезпечують максимізацію швидкості механічного буріння або мінімізацію витрат часу і ресурсів. Одним із ефективних підходів для розв'язання подібних задач з обмеженнями є метод бар'єрних функцій, що відноситься до класу внутрішньоточкових методів оптимізації.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ

2.1 Математичні моделі процесу поглиблення свердловин

Вітчизняними і зарубіжними дослідниками розроблені математичні моделі технологічного процесу поглиблення свердловин, які відображають зв'язки керуючих впливів: осьової сили на долото F і швидкості його обертання n з техніко-економічними показниками процесу [5,6] .

Серед них можна виділити наступні основні типи моделей: динамічні; векторно-матричні; статичні моделі, які відображають взаємозв'язки механічної швидкості буріння із параметрами режиму; емпіричні рівняння взаємодії долота з породою при різноманітних режимах буріння, які виявлені на основі промислових і стендових експериментів. Проте, повного математичного опису процесу буріння свердловин не існує, оскільки неможливо врахувати всі діючі на процес збурюючі фактори.

Моделювання процесу буріння має цілий ряд труднощів, пов'язаних з тим, що цей процес є стохастичним, нелінійним, нестационарним, невідтворюваним і таким, що розвивається в часі [5,6]. На практиці буріння найширше застосування знайшли емпіричні моделі, ідентифікація яких здійснюється за результатами апріорних даних, що отримані при бурінні попередніх свердловин. Такий підхід до проблеми керування процесом буріння дає задовільні результати на стадії проектування свердловин, але не забезпечує його оптимальності для конкретної бурової і в конкретних умовах. Це зумовлено тим, що процес буріння протікає в умовах значної апріорної невизначеності, яка зумовлена наявністю високого рівня шумів в каналах передачі інформації “вибій – гирло свердловини” та зміною фізико-механічних властивостей гірських порід (умов буріння) .

Динамічні моделі розроблялись з врахуванням динаміки зношення озброєння і опор долота за час його роботи t_p на вибої свердловини. Дійсно, в процесі буріння руйнується не тільки порода, але й зношується озброєння

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

долота. При $F = \text{const}$ і $n = \text{const}$, відбувається зменшення механічної швидкості проходки V_t в часі, тобто $V_t = \varphi(F, n, t_p)$.

Статичні моделі в більшості робіт одержали на основі промислових і стендових досліджень процесу буріння шарошковими долотами у вигляді закономірностей зміни початкової механічної швидкості проходки V_0 , яка є функцією багатьох змінних $V_0 = \varphi(F, n, Q, q_1, q_2, \dots, q_n, I_n, A, l)$, де F – осьова сила на долото, n – швидкість його обертання, Q – витрата промивної рідини, q_1, q_2, \dots, q_n – фізико-механічні властивості бурового розчину, розбурюваних порід і долота, I_n, A – частота і амплітуда коливань колони, l – глибина свердловини.

В загальному математичні моделі можна розділити на два основні класи: технологічні і кібернетичні.

Основним завданням створення технологічних моделей є дослідження ефективності роботи долота на вибої свердловини з метою створення такого технологічного обладнання, яке забезпечувало б якісніше й дешевше спорудження нафтових і газових свердловин.

Для вирішення цілого ряду задач оптимізації процесу поглиблення математичну модель процесу поглиблення свердловин необхідно отримати у просторі станів. Для цього необхідно мати інформацію про проходку на долото та про стан його озброєння і опор.

Стан озброєння долота будемо оцінювати опосередковано через зміну швидкості буріння в часі [2]:

$$v_t = v_0 \varphi(t),$$

де v_0 – початкова швидкість буріння; $\varphi(t)$ – функція зносу.

На процес поглиблення свердловини впливають численні фактори, які носять випадковий характер і які неможливо контролювати. Тому для отримання змістовних результатів, які об'єктивно відтворювали би основні закономірності, що притаманні процесу поглиблення свердловини, зробимо низку припущень:

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Буріння свердловин здійснюється електробуром, так що керуючі впливи – осьове навантаження на долото і частота його обертання – взаємно незалежні величини.

2. В кожному рейсі проходки витрата промивальної рідини постійна і є такою, що забезпечує повну очищення вибою від вибуреної породи.

3. Вся глибина свердловини розбита на інтервали буріння, всередині яких фізико-механічні властивості порід постійні.

4. Буріння ведеться шарошковими долотами з призматичними зубами.

В основі математичної моделі лежить функціональна залежність відносного зносу зубів долота [6]:

$$\mu = \frac{h_o - h_t}{h_o},$$

де h_o – початкова висота зуба; h_t – її біжуче значення, яке є функцією часу t , від режимних параметрів процесу поглиблення свердловини.

Якщо має місце залежність:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(1 + a_v t), \quad (2.1)$$

то модель процесу заглиблення свердловини має такий вигляд:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\hat{v}_0}{\varepsilon(t)}, \quad (2.2)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \hat{K}_\varepsilon, \quad (2.3)$$

де $\hat{v}_0 = v_0 / \varepsilon_0$, $\hat{K}_\varepsilon = \varepsilon_0 a_v$.

З достатньою для практики точністю можна прийняти, що $\varepsilon_0 \approx 1$.

Величина \hat{K}_ε має назву швидкості зміни оцінки зносу озброєння долота.

В загальному вигляді залежність $\varepsilon(t)$, має складний характер і її доцільно апроксимувати поліномом другого порядку:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{2} K_\varepsilon^{(0)} t^2 + K_\varepsilon^{(1)} t + 1. \quad (2.4)$$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вільний член полінома дорівнює одиниці з тієї причини, що $\varepsilon_0 = f_\varepsilon(\bar{u}, 0) = 1$. Коли $K_\varepsilon^{(0)} = 0$, то ми приходимо до системи рівнянь (2.2), (2.3). Таким чином, модель процесу заглиблення свердловини набуде такого вигляду [5]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{v_0}{\varepsilon(t)}, \quad (2.5)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = K_\varepsilon^{(0)}t + K_\varepsilon^{(1)}. \quad (2.6)$$

Початкові умови для математичних моделей (2.2), (2.3) і (2.5), (2.6) будуть такими:

$$h(0) = 0 \quad \text{і} \quad \varepsilon(0) = \hat{\varepsilon}_0 = 1. \quad (2.7)$$

Модель (2.2), (2.3) назвемо двопараметричною, а (2.5), (2.6) – трипараметричною. В першій моделі невідомими є параметри \hat{v}_0 і \hat{K}_ε , а в другій – v_0 , $K_\varepsilon^{(0)}$ і $K_\varepsilon^{(1)}$.

Система рівнянь (1.5), (1.6) утворює неавтономну модель процесу поглиблення свердловини. Її можна привести до автономного вигляду, якщо рівняння (2.6) продиференціювати за змінною t . Тоді:

$$\frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2} = K_\varepsilon^{(0)},$$

де $\varepsilon(0) = 1$, $\varepsilon'(0) = K_\varepsilon^{(1)}$.

Якщо ввести нові змінні стану $\varepsilon(t) = \xi_1(t)$ і $d\xi_1(t)/dt = \xi_2(t)$, то отримаємо таку автономну математичну модель процесу заглиблення свердловини:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{v_0}{\xi_1(t)}, \quad (2.8)$$

$$\frac{d\xi_1(t)}{dt} = \xi_2(t), \quad (2.9)$$

$$\frac{d\xi_2(t)}{dt} = K_\varepsilon^{(0)}, \quad (2.10)$$

з початковими умовами

$$h(0) = 0, \quad \xi_1(0) = 1, \quad \xi_2(0) = K_\varepsilon^{(1)}. \quad (2.11)$$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система диференціальних рівнянь (2.2), (2.3) і (2.5), (2.6) описує процес заглиблення долота, коли рейс проходки закінчується внаслідок зносу його озброєння. Але термін служби більшості вітчизняних доліт обмежений міцністю їх опор. В такому випадку для завершення математичного опису процесу заглиблення долота до рівнянь (2.2), (2.3) або (2.5), (2.6) необхідно долучити рівняння, яке описувало б стан опор долота в процесі його роботи на вибої свердловини [6].

Стан опор долота найбільш повно характеризує потужність, яка підводиться до долота. Цю потужність можна розбити на дві складові. Перша з них витрачається на тертя в опорах, об стінку свердловини і вибій, на обертання долота в промивальній рідині, повторне перемелювання частинок вибуреної породи. Друга складова витрачається безпосередньо на руйнування вибою свердловини, тобто:

$$W = W_0 + w_n F ,$$

де W_0 – перша складова потужності, яка визначається при холостому ході долота ($F=0$);

w_n – питома потужність, що віднесена до одиниці осьового навантаження на долото.

Відносну величину:

$$g = \frac{W - W_0}{W_{g,0}} ,$$

де $W_{g,0} = w_{n,0} F$ – потужність руйнування породи новим долотом, за аналогією з $\varepsilon(t)$ назвемо оцінкою стану опор долота (ОСОД).

Оскільки між моментом M і потужністю W існує простий взаємозв'язок:

$$M = K_m \frac{W}{N_\partial} , \quad (2.12)$$

де K_m – коефіцієнт пропорційності; N_∂ – частоту обертання долота,

то, поділивши чисельник і знаменник на величину N_∂ / K_m , отримуємо:

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$g = \frac{M - M_0}{M_{g,0}}, \quad (2.13)$$

де M , M_0 , $M_{g,0}$ – моменти, які відповідають відповідним потужностям W , W_0 , $W_{g,0}$.

Якщо у формулі (2.12) величини M , W і N_δ мають розмірності кН, кВт і хв^{-1} , то $K_M = 9,56$.

В силу того, що опора долота в процесі буріння зношується, величина моменту на долоті $M_g = M - M_0$ не залишається постійною, а змінюється в часі, що виражається формулою

$$M_g(t) = m_{g,0} F e^{K_g t}, \quad (2.14)$$

де K_g – стала величина, значення якої визначається фізико-механічними властивостями породи і величинами F і N_δ ;

$m_{g,0} = M_{g,0} / F$ – питомий момент для нового долота.

Оскільки $M_{g,0} = m_{g,0} F$, то, підставляючи значення M_g із (2.53) і $M_{g,0}$ в рівняння (2.14), отримуємо:

$$g(t) = e^{K_g t}. \quad (2.15)$$

Рівняння (2.15) запишемо в диференціальній формі: $\frac{dg(t)}{dt} = K_g e^{K_g t}$.

Оскільки $e^{K_g t} = g(t)$, то

$$\frac{dg(t)}{dt} = K_g g(t). \quad (2.16)$$

Як показав досвід буріння, з достатньою для практики точністю процес зносу долота можна описати рівнянням, яке отримане із (2.15), коли функцію $e^{K_g t}$ замінити її лінійним наближенням $e^{K_g t} \approx K_g t + 1$. Тоді $g(t) = 1 + K_g t$, або в диференціальній формі

$$\frac{dg(t)}{dt} = K_g (F, N_\delta). \quad (2.17)$$

Із рівняння (2.17) випливає, що K_g визначає швидкість зміни ОСОД.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежність (2.13) дає можливість визначити початкові умови для диференціального рівняння (2.17). В початковий момент часу, коли $M_g(0) = M_{g,0}$,

$$g(0)=1. \quad (2.18)$$

В роботі [12] для опису процесу зносу опор долота прийнята математична модель (1.17), в якій початкова умова є такою:

$$g(0)=0. \quad (2.19)$$

Це означає, що в (2.19) $g(t)$ – відносний знос опор долота.

Система рівнянь (2.2), (2.3) або (2.5), (2.6) разом з рівнянням (2.19) описують процес поглиблення свердловини для випадку, коли робота долота на вибої свердловини визначається терміном служби його опор.

2.2 Критерії оптимізації процесу поглиблення свердловин

Під оптимізацією процесу буріння слід розуміти сукупність математичних методів, які забезпечують вибір оптимального рішення з множини допустимих варіантів проведення свердловини за умови дотримання заданих технічних, технологічних та економічних обмежень, що накладаються на процес буріння. Впровадження конкретних алгоритмів оптимізації безпосередньо на промисловому об'єкті, зокрема на буровій установці, визначається як оптимальне керування процесом буріння [7].

Способи оперативної оптимізації керування процесом буріння детерміновані, у них використовуються математичні моделі, структура і коефіцієнти яких, в кращому випадку, визначені на початок чергового рейсу. Але нестационарність і стохастичність процесу буріння приводить не тільки до зміни параметрів математичної моделі, але й з ростом глибини свердловини свою структуру повинні змінювати й критерії оптимальності.

Критерії оптимальності процесу спорудження свердловин поділяють на глобальні і локальні, або критерії оперативного керування процесом буріння.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На стадії проектування вибирають глобальні критерії оптимальності, які є оцінкою ефективності всіх робіт, що мають місце при бурінні свердловини від спорудження бурової вежі до випробування і здачі свердловини в експлуатацію. Глобальні критерії оптимальності мають обмежене застосування, оскільки вони не враховують зміну умов буріння.

Локальні критерії оптимальності поділені на дві групи - критерії відпрацювання доліт і критерії вибору режимних параметрів буріння.

Умови відпрацювання доліт за критеріями дають найбільший ефект, якщо певним чином вибрані керуючі впливи F і N_0 на основі критеріїв вибору режимних параметрів. Аналіз показує, що керування процесом буріння недоцільно вести за одним критерієм. Необхідно зі збільшенням глибини свердловини по чергово використовувати критерії відбору режимних параметрів в такій послідовності [7]:

$$\max : v_p \rightarrow \min : q \rightarrow \max : h(t_\sigma). \quad (2.20)$$

Критерій $\min:q$ найповніше відтворює техніко-економічні показники буріння. Одинакові результати відпрацювання доліт за критеріями $\min:q$ і $\max:v_p$ можуть бути лише у випадку низької вартості долота чи малого значення рейсової швидкості буріння або при дії цих факторів одночасно;

Для відбору критеріїв оптимальності у відповідності зі формулою (2.20) сформовано T - правило у вигляді співвідношення

$$T = \frac{H}{v_{cn}} + \frac{d}{c_\sigma} + t_\sigma, \quad (2.21)$$

де H -глибина свердловини на момент чергового рейсу; $v_{cn} = v_c v_n (v_c + v_n)^{-1}$; v_c, v_n - відповідно, середні швидкості підйому і спуску колони бурильних труб.

Допустимо, що порівнюються два альтернативних критерії J^* і J . Нехай з точки зору вартості метра проходки виконується співвідношення $q(h^*(t_\sigma), t_\sigma^*) < q(h(t_\sigma), t_\sigma)$, де $q(h^*(t_\sigma), t_\sigma^*)$, $q(h(t_\sigma), t_\sigma)$ - вартість метра проходки при бурінні, відповідно, за критеріями J^* і J . Якщо виконується умова:

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T > \frac{\lambda_h - \lambda_t}{1 - \lambda_h} t_{\sigma}^* \quad (2.22)$$

де $\lambda_h = h(t_{\sigma})/h^*(t_{\sigma}^*)$; $\lambda_t = t_{\sigma}/t_{\sigma}^*$, то буріння за критерієм J^* ефективніше ніж за альтернативним критерієм J .

Перехід від одного критерію до іншого здійснюється за схемою (2.21) тоді, коли глибина свердловини досягне значення:

$$H_{кр} = v_{cn} \left(\frac{\lambda_h - \lambda_t}{1 - \lambda_h} t_{\sigma}^* - \frac{d}{c_{\sigma}} - t_{\sigma} \right) \quad (2.23)$$

Встановлено, що величина t_{cn} , яка входить в критерії $min:q$, $max:v_p$ і визначається за результатами попереднього рейсу, носить випадковий характер. Тому виникає необхідність в прогнозуванні значення t_{cn} для наступного рейсу.

Вибір типу долота здійснюється шляхом мінімізації вартості метра проходки свердловини. При цьому припускається, що вибраний інтервал буріння L можна пробурити декількома типами доліт.

Нехай z_j - вартість j -го долота, h_j - його потенціальний ресурс, а k_j - кількість доліт, якими можна пробурити заданий інтервал L . Тоді задача оптимального вибору типу долота має такий зміст [6,7]:

$$\min : R = \sum_{j=1}^{Nd} k_j z_j + \sum_{j=1}^{Nd} \sum_{v=0}^{k_j} c_{bj} \varphi_v(H - x_{j+1}), \quad (2.24)$$

$$\sum_{j=1}^{Nd} k_j h_j \geq L, \quad (2.25)$$

де $\varphi_v(H - x_{j+1})$ – функція, що визначає тривалість СПО.

У формулі (2.24) невідомими параметрами є: $X(H, Q, \omega)$ і $\dot{s}(t, H, Q, \omega) = \dot{s}(t)$ при $H, Q, \omega = const$, оскільки ці параметри, крім зміни у часі, залежать від режимно-технологічних параметрів буріння: H, Q, ω , де H – навантаження на ПРІ, Q - витрати промивальної рідини, ω – частота обертання бурильної колони, і від руйнівних параметрів гірських порід. У результаті отримуємо функцію оптимальної швидкості буріння впродовж рейсу.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{opt}(t) = \dot{s}(t) = \sqrt[3]{\frac{A}{P} + \sqrt{\frac{(-1)}{27P^3} \left(\frac{B}{h(t)} - \frac{B}{h_p} - \frac{2A}{V_0} + PV_0^2 \right)^3}} + \frac{A^2}{P^2} + \sqrt[3]{\frac{A}{P} - \sqrt{\frac{(-1)}{27P^3} \left(\frac{B}{h(t)} - \frac{B}{h_p} - \frac{2A}{V_0} + PV_0^2 \right)^3}} + \frac{A^2}{P^2}, \quad (2.26)$$

де $s(t) = h(t)$, $s(t_p) = h_p = X(H, Q, \omega)$ - поточна та кінцева рейсові проходки, відповідно; $V_0 = D_1$ - швидкість буріння, яка відповідає максимальному ресурсу ПРІ.

В формулі (2.26) інформація про параметри $V_0 = D_1$, h_p відома в результаті статистичної обробки експериментальних даних, але з метою регулювання параметром h_p необхідно визначити закон проходки на ПРІ, який враховує режими буріння і руйнівні властивості гірських порід. Значення $V_{opt}(t)$ є координатою стану АСУ бурінням.

Переведенням повільного стану АСУ бурінням в заданий $V \rightarrow V_{opt}$, завершується задача оптимального управління процесом поглиблення свердловин за комплексним критерієм – мінімальна вартість 1м буріння протягом рейса.

2.3 Вибір системи автоматизації процесу буріння свердловин

Системи автоматизації буріння мають забезпечити: безперервний моніторинг параметрів процесу в реальному часі; оптимізацію режимів буріння; запобігання аваріям і позаштатним ситуаціям; зменшення участі людини в рутинних операціях; покращення ефективності роботи бурової установки.

Вибір конкретної системи автоматизації залежить від низки технічних, функціональних та економічних критеріїв [7].

До основних критеріїв відносять: сумісність з існуючим буровим обладнанням; гнучкість конфігурації та можливість масштабування; підтримка промислових протоколів зв'язку (Modbus, OPC UA, Profibus); можливість

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтеграції з телеметричними системами MWD (Measurement While Drilling) і LWD (Logging While Drilling); наявність інструментів візуалізації та архівування даних; підтримка модулів оптимального керування та аналізу з використанням алгоритмів штучного інтелекту; рівень технічної підтримки та сервісного обслуговування [5,6].

Проаналізуємо приклади сучасних систем автоматизації процесу буріння:

1) NOV RigSense™ / NOV NOVOS™ (National Oilwell Varco, США): призначена для автоматизації наземного та морського буріння. Має модулі для реального часу, передбачення зносу долота, динамічного аналізу тиску та моменту, а також можливість автономного буріння та інтеграція з обладнанням NOV

2) Schlumberger DrillPilot™ / DrillOps™: платформа автоматизованого керування бурінням з алгоритмами оптимізації; має інструменти для прогнозування аварійних ситуацій та підтримки прийняття рішень. Включає штучний інтелект і машинне навчання для адаптації до геологічних змін

3) Halliburton iCruise® / ADT® (Automation Drilling Technology): модульна система, яка дозволяє керувати траєкторією свердловини. Працює в реальному часі з телеметричними даними.

4) Siemens PCS 7 + SIMATIC S7 (з SCADA WinCC): відкрита платформа для створення систем управління бурінням. Забезпечує повну автоматизацію бурових процесів (через PLC та SCADA). Зручна для адаптації під конкретну бурову установку. Може використовуватися на об'єктах в Україні.

Висновки до розділу

У даному розділі проаналізовано основні вимоги до сучасних систем автоматизації процесу буріння нафтових і газових свердловин та критерії оптимізації процесу поглиблення свердловин.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проаналізовано приклади сучасних систем автоматизації процесу буріння. Встановлено, що серед наявних на ринку систем найбільш доцільним для застосування в умовах бурових підприємств України є використання модульної системи на базі програмованих логічних контролерів Siemens SIMATIC S7 у поєднанні з SCADA-системою WinCC.

Обрана система дозволяє не лише автоматизувати контроль і управління ключовими параметрами процесу, а й у перспективі — реалізувати алгоритми оптимального керування та інтеграцію з інтелектуальними аналітичними модулями, що значно підвищує ефективність бурових робіт.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ БУРІННЯ МЕТОДОМ БАР'ЄРНИХ ФУНКЦІЙ

Процес буріння свердловин є багатофакторним і нелінійним, залежить від численних змінних та обмежень, серед яких основними є вага на долото, частота обертання бурової колони, витрата промивальної рідини, гідравлічний тиск та ін. У рамках задачі оптимального керування важливим є знаходження таких режимних параметрів, що забезпечують максимізацію швидкості механічного буріння або мінімізацію витрат часу і ресурсів [2,6,7].

Для проведення статистичного дослідження в якості вихідних даних було отримано вибірку даних для 5 параметрів. Крім того ми знайшли відношення $\frac{v}{v_0}$, яке представимо нижче у вигляді таблиці.

Таблиця 3.1 – Вибірка даних $\frac{v}{v_0}$

0,541	0,815	0,946	0,962	0,952	0,827	1,048
1	0,821	0,958	0,955	0,971	0,834	1,048
0,808	0,866	0,968	0,965	0,974	0,840	1,045
0,869	0,888	0,939	0,949	0,99	0,847	1,048
0,818	0,911	0,949	0,946	1,013	0,853	1,051
0,821	0,917	0,952	0,946	1,009	1,032	1,051
0,812	0,920	0,920	0,946	0,824	1,035	1,054

3.1 Визначення математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення

Оцінку математичного сподівання випадкової функції $x(t)$ називають середньоарифметичне значення нескінченної кількості реалізацій, тобто таку не випадкову функцію $M(x)$, навколо якої групуються всі реалізації даного випадкового процесу і яка повністю визначається одномірним законом розподілу. Середньоквадратичне відхилення показує, наскільки в середньому

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відхиляються індивідуальні значення ознаки від їх середнього значення. Середньоквадратичне відхилення виражається в тих же одиницях, що і значення досліджуваної ознаки [3,4,7].

Дисперсія – один із найбільш розповсюджених узагальнюючих показників розміру варіації в сукупності. Дисперсією випадкової функції $x(t)$ називають не випадкову і невід’ємну функцію $D(t)$, що представляє собою середнє значення квадрату різниці між випадковою функцією і її середнім значенням, або ж середнє значення квадрату відхилення випадкової функції від її середнього значення. Вона характеризує інтенсивність відхилень відносно середнього значення і також визначається одномірним законом розподілу. Дисперсію використовують не лише для оцінки варіації, а й для вимірювання зв’язків між досліджуваними факторами, а розклад дисперсії на складові дозволяє оцінити вплив різних факторів, які обумовлюють варіацію ознаки.

Середньоквадратичне відхилення, як і дисперсія, виступає в якості широко використовуваного узагальнюючого показника вибірки. Його обчислюють здобувши квадратний корінь із дисперсії.

Для знаходження відповідних показників ми використовували програмну систему MathCad та відповідні оператори [9].

Характеристика вибірки даних для параметру струм I, A

ORIGIN:=1

Вектор спостереження

$I := (117.5 \ 118.5 \ 120 \ 120 \ 121.5 \ 121.5 \ 123 \ 123 \ 123 \ 126 \ 129 \ 129.5 \ 129 \ 123 \ 124.5 \ 124.5$
 $126 \ 127.5 \ 126 \ 124.5 \ 126 \ 126 \ 124.5 \ 124.5 \ 124.5 \ 125.5$
 $126 \ 125 \ 126 \ 126 \ 126 \ 126 \ 126 \ 126 \ 123 \ 120 \ 120.5 \ 123 \ 123 \ 123.5 \ 126 \ 126 \ 126 \ 126.5$
 $126 \ 127.5 \ 129 \ 126)^T$

$n := \text{rows}(I)$

Математичне сподівання: $\text{mean}(I) = 124.704 \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_i = 124.704$

$m := \text{mean}(I)$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середнє геометричне: $gmean(I) = 124.674 \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n I_i} = 124.674$

Середнє гармонічне: $hmean(I) = 124.644 \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_i}\right)^{-1} = 124.644$

Дисперсія

зміщена оцінка: $var(I) = 7.387 \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (I_i - m)^2 = 7.387$

незміщена оцінка: $Var(I) = 7.541 \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (I_i - m)^2 = 7.541$

Середньоквадратичне відхилення

зміщена оцінка: $stdev(I) = 2.718 \sqrt{var(I)} = 2.718$

незміщена оцінка: $Stdev(I) = 2.746 \sqrt{Var(I)} = 2.746$

Медіана: $median(I) = 126$

Мода: $mode(I) = 126$

Ексцес: $kurt(I) = 0.249$

Ассиметрія: $skew(I) = -0.616$

Характеристика вибірки даних F, кН

ORIGIN:=1

Вектор спостереження

F:= (12.0 30.0 78 78 84 96 108 114 114 144 150 162 162 162 54
42 108 120 120 132 132 132 144 132 138 132 138 138 156 156.5
141 132 144 141 138 144 138 138 156 156 144 162 144 156 162 156 156)^T

n:=rows (F)

Математичне сподівання: $mean(F) = 129.092 \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n F_i = 129.092$

m:=mean(F)

Середнє геометричне: $gmean(F) = 119.599 \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n F_i} = 119.599$

Середнє гармонічне: $hmean(F) = 98.306 \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{I_i}\right)^{-1} = 98.306$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дисперсія

$$\text{зміщена оцінка: } \text{var}(F) = 1.317 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (F_i - m)^2 = 1.317 \cdot 10^3$$

$$\text{незміщена оцінка: } \text{Var}(F) = 1.344 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (F_i - m)^2 = 1.344 \cdot 10^3$$

Середньоквадратичне відхилення

$$\text{зміщена оцінка: } \text{stdev}(F) = 36.285 \cdot \sqrt{\text{var}(F)} = 36.285$$

$$\text{незміщена оцінка: } \text{Stdev}(F) = 36.661 \cdot \sqrt{\text{Var}(F)} = 36.661$$

Медіана: $\text{median}(F) = 138$

Мода: $\text{mode}(F) = 156$

Екссес: $\text{kurt}(F) = 2.299$

Ассиметрія: $\text{skew}(F) = -1.521$

Характеристика вибірки даних V, м/год

ORIGIN:=1

Вектор спостереження

V:= (1.7 3.13 2.53 2.72 2.56 2.57 2.54 2.55 2.57 2.71 2.78 2.85 2.87 2.88 2.96 3 3.03
2.94 2.97 2.98 2.88 3.01 2.99 3.02 2.97 2.96 2.96 2.96 2.98 3.04 3.05 3.1 3.17 3.16
2.58 2.59 2.61 2.63 2.65 2.67 3.23 3.24 3.28 3.28 3.27 3.28 3.29 3.29 3.3)^T

n:=rows (V)

$$\text{Математичне сподівання: } \text{mean}(V) = 2.904 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n V_i = 2.904$$

$$m := \text{mean}(V)$$

$$\text{Середнє геометричне: } \text{gmean}(V) = 2.886 \cdot \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n V_i} = 2.886$$

$$\text{Середнє гармонічне: } \text{hmean}(V) = 2.886 \cdot \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{V_i} \right)^{-1} = 2.886$$

Дисперсія

$$\text{зміщена оцінка: } \text{var}(V) = 0.089 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (V_i - m)^2 = 0.089$$

$$\text{незміщена оцінка: } \text{Var}(V) = 0.091 \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (V_i - m)^2 = 0.091$$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середньоквадратичне відхилення

$$\text{зміщена оцінка: } \text{stdev}(V)=0.298 \quad \sqrt{\text{var}(V)} = 0.298$$

$$\text{незміщена оцінка: } \text{Stdev}(V)=0.301 \quad \sqrt{\text{Var}(V)} = 0.301$$

Медіана: $\text{median}(V)=2.96$

Мода: $\text{mode}(V)=2.96$

Ексцес: $\text{kurt}(V)=3.748$

Ассиметрія: $\text{skew}(V)= -1.296$

Характеристика вибірки даних U, B

ORIGIN:=1

Вектор спостереження

U:= (1705 1692 1736 1735 1736 1734 1730 1705 1730 1736 1736 1735 1734 1735
1736 1733 1734 1736 1733 1734 1705 1705 1730 1738 1736 1736 1734 1730 1735
1736 1732 1780 1790 1792 1791 1785 1790 1792 1760 725 1726 1732 1780 1790
1792 1791 1785 1790 1792 1760 1728 1760 1790 1785 1792 1760 1792 1760 1790
1780 1786 1788 1783 1789 1790)^T

n:=rows (U)

$$\text{Математичне сподівання: } \text{mean}(U) = 1.751 \cdot 10^3 \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n U_i = 1.751 \cdot 10^3$$

$$m:=\text{mean}(U)$$

$$\text{Середнє геометричне: } \text{gmean}(U) = 1.751 \cdot 10^3 \quad \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n U_i} = 1.751 \cdot 10^3$$

$$\text{Середнє гармонічне: } \text{hmean}(U) = 1.751 \cdot 10^3 \quad \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i} \right)^{-1} = 1.751 \cdot 10^3$$

Дисперсія

$$\text{зміщена оцінка: } \text{var}(U) = 869.775 \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (U_i - m)^2 = 869.775$$

$$\text{незміщена оцінка: } \text{Var}(U) = 887.895 \quad \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (U_i - m)^2 = 887.895$$

Середньоквадратичне відхилення

$$\text{зміщена оцінка: } \text{stdev}(U)=29.492 \quad \sqrt{\text{var}(U)} = 29.492$$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

незміщена оцінка: $\text{Stdev}(U)=29.789 \sqrt{\text{Var}(U)} = 29.789$

Медіана: $\text{median}(U)= 1.736 \cdot 10^3$

Мода: $\text{mode}(U)= 1.736 \cdot 10^3$

Ексцес: $\text{kurt}(U)=-1.234$

Ассиметрія: $\text{skew}(U)= 0.126$

Характеристика вибірки даних V/V_0

ORIGIN:=1

Вектор спостереження

$K:= (0.541 \ 1 \ 0.808 \ 0.869 \ 0.818 \ 0.821 \ 0.812 \ 0.815 \ 0.821 \ 0.866 \ 0.888 \ 0.911 \ 0.917$
 $0.920 \ 0.946 \ 0.958 \ 0.968 \ 0.939 \ 0.949 \ 0.952 \ 0.920 \ 0.962 \ 0.955 \ 0.965 \ 0.949 \ 0.946 \ 0.946$
 $0.946 \ 0.946 \ 0.952 \ 0.971 \ 0.974 \ 0.99 \ 1.013 \ 1.009 \ 0.824 \ 0.827 \ 0.834 \ 0.840 \ 0.847 \ 0.853$
 $1.032 \ 1.035 \ 1.048 \ 1.048 \ 1.045 \ 1.048 \ 1.051 \ 1.051 \ 1.054)^T$

$n:=\text{rows}(K)$

Математичне сподівання: $\text{mean}(K) = 0.928 \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i = 0.928$

$m:=\text{mean}(K)$

Середнє геометричне: $\text{gmean}(K) = 0.922 \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n K_i} = 0.922$

Середнє гармонічне: $\text{hmean}(K) = 0.916 \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i}\right)^{-1} = 0.916$

Дисперсія

зміщена оцінка: $\text{var}(K) = 9.1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - m)^2 = 9.1 \cdot 10^{-3}$

незміщена оцінка: $\text{Var}(K) = 9.29 \cdot 10^{-3} \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - m)^2 = 9.29 \cdot 10^{-3}$

Середньоквадратичне відхилення

зміщена оцінка: $\text{stdev}(K)=0.095 \sqrt{\text{var}(K)} = 0.095$

незміщена оцінка: $\text{Stdev}(K)=0.096 \sqrt{\text{Var}(K)} = 0.096$

Медіана: $\text{median}(K)=0.946$

Мода: $\text{mode}(K)= 0.946$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ексцес: $kurt(K)=3.832$

Ассиметрія: $skew(K)= -1.311$

Отож, окрім оцінки математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення ми отримали такі показники як мода медіана, ексцес і асиметрія. Мода – це варіанта, яка найчастіше повторюється в ряді розподілу. Медіана - це варіанта, що ділить ряд на дві рівні за чисельністю частини. Завдяки асиметрії і ексцесу ми можемо судити про вигляд самого закону розподілу, а саме напрям і міру скошеності (правостороння чи лівостороння асиметрія), гостровершинний чи плоско вершинний розподіл. Оцінка математичного сподівання випадкового процесу $x(t)$ в загальному вигляді представляє собою деяку середню криву, навколо якої розподіляються всі можливі окремі реалізації даного процесу. Дисперсія $D(x)$ і середньоквадратичне відхилення $\sigma(x)$ характеризують розсіювання окремих можливих реалізацій навколо цієї середньої кривої.

3.2 Визначення закону розподілу та перевірка його за критерієм Пірсона

Для того, щоб визначити закон розподілу, за допомогою програми MathCad ми опрацювали кожен вибірку даних і побудували інтегральні функції розподілу [6,7].

Використовуватимемо 3 основні закони розподілу : нормальний, логарифмічний та рівномірний.

Нехай наші дані відповідають таким законам розподілу:

- нормальний розподіл (функція ймовірності $pnorm$);
- логарифмічний розподіл ($plogis$);
- рівномірний розподіл ($punif$)

Спочатку опрацюємо першу вибірку даних, яка відповідає силі струму I, А

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
ORIGIN:=1      i:=1..n      pi:= $\frac{1}{n}$ ·i      x:=0..129.5
```

n - кількість чисел у вибірці

```
X:=rnorm(n,117.5,129.5)  X:=rlogis(n,117.5,129.5)  X:=rpunif(n,117.5,129.5)
```

```
X:=sort(I)  m:=mean(I)  σ:=stdev(I)  m=124.704  σ=2.718
```

```
pn:=pnorm(X,m,σ)  pl:=plogis(X,m,σ)  pu:=punif(X,117.5,129.5)
```

Коефіцієнти кореляції corr(pp):=corr(pp,p)

```
cor(pn)=0.966
```

```
cor(pl)=0.959
```

```
cor(pu)=0.94
```

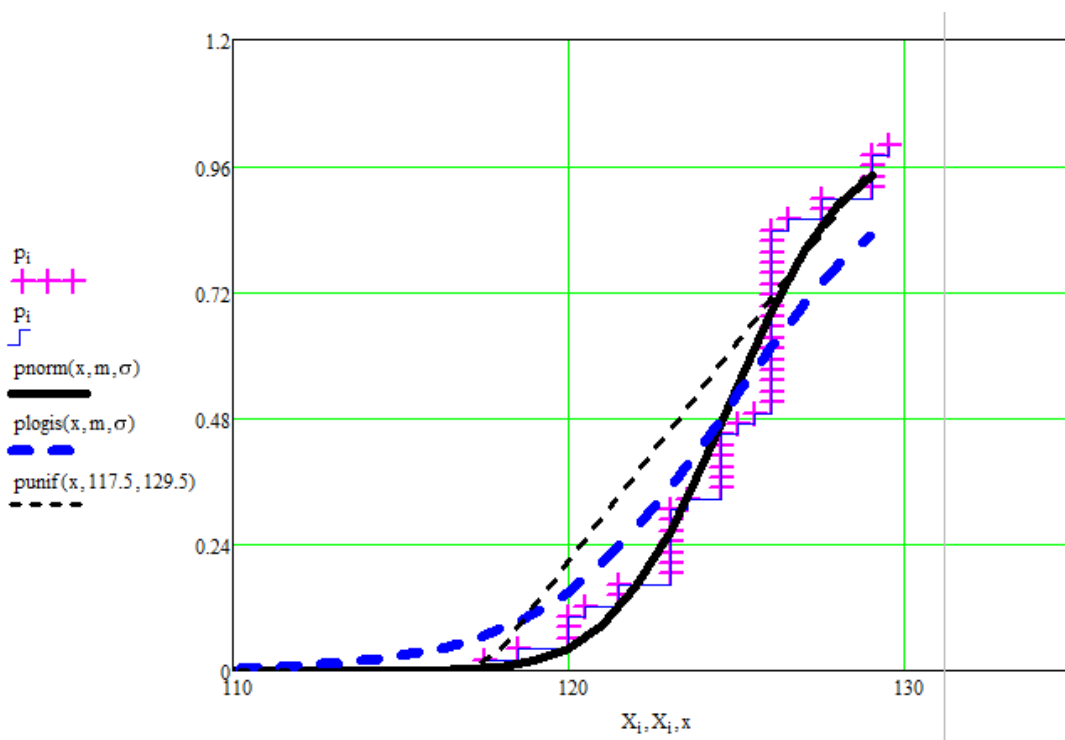


Рисунок 3.1 – Інтегральна функція розподілу сили струму [7]

Далі побудуємо теоретичні закони розподілу (нормальний, логарифмічний, рівномірний) та розподіл отриманий за експериментальними даними і порівняємо їх. Для цього спершу знайдемо імовірності появи кожного елементу у вибірці та по групуємо їх.

```
i:=1..15  n:=49
```

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$el_i := \quad kel_i := \quad pel_i := \frac{kel_i}{n}$$

117.5	1	0.02
118.5	1	0.02
120	3	0.061
120.5	1	0.02
121.5	2	0.041
123	7	0.143
123.5	1	0.02
124.5	6	0.122
125	1	0.02
125.5	17	0.02
126	1	0.347
126.5	2	0.02
127.5	4	0.041
129	1	0.082
129.5		0.02

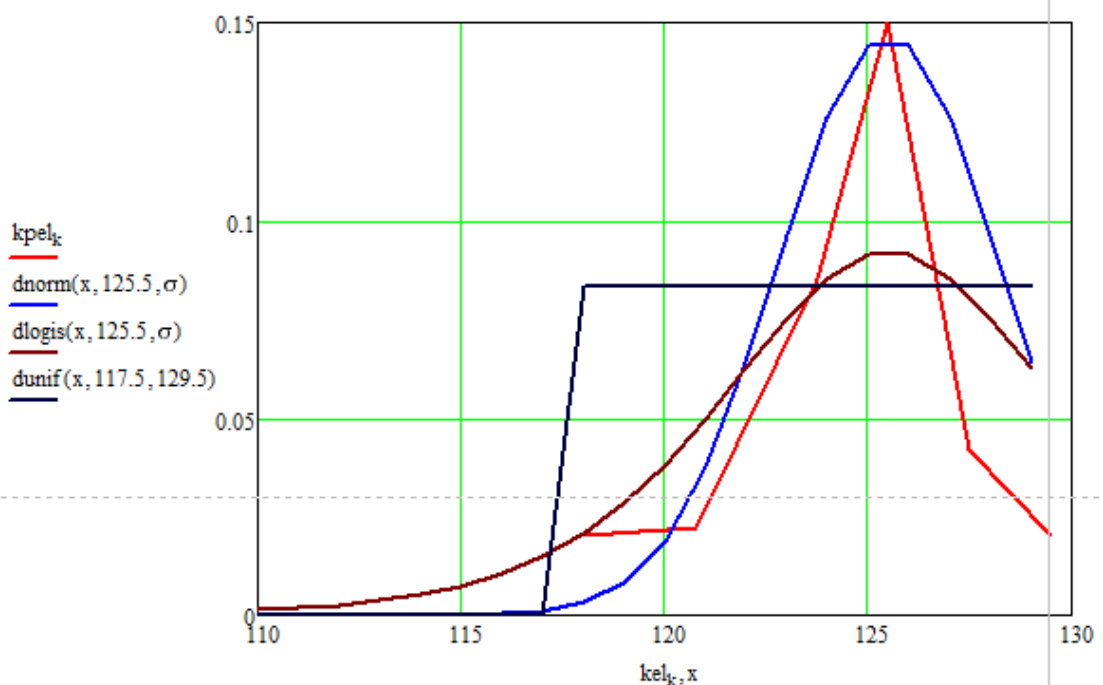


Рисунок 3.2 - Графіки нормального, логарифмічного, рівномірного розподілів та розподілу побудованого за експериментальними даними

Так от, як видно з графіку, нам найкраще підходить нормальний закон розподілу. Перевіримо наше припущення за допомогою критерію Пірсона.

Критерій Пірсона χ^2 знаходиться за формулою:

$$\chi^2 := \frac{(|mi - mti|)^2}{mti}, \quad (3.1)$$

де: mi – абсолютні частоти випадкових значень;

mti – теоретичні частоти.

Перевірка за критерієм Пірсона

$$\chi^2 := n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(dh_i - dp_i)^2}{dp_i} - \text{критерій Пірсона}$$

$$r := n - 3$$

$$\chi^2(dn) = 226.059 \quad \chi^2(dl) = 160.413 \quad \chi^2(du) = 177.268$$

$$p\chi^2(dp) := pchisq(\chi^2(dp), r)$$

$$p\chi^2(dn) = 1 \quad p\chi^2(dl) = 0.889 \quad p\chi^2(du) = 0.901$$

Згідно критерію Пірсона, даний розподіл близький до нормального.

Аналогічні операції здійснимо для даних вибірки F, кН.

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad i := 1..n \quad p_i := \frac{1}{n} \cdot i \quad x := 0..162$$

n - кількість чисел у вибірці

$$X := \text{rnorm}(n, 12, 162) \quad X := \text{rlogis}(n, 12, 162) \quad X := \text{rpunif}(n, 12, 162)$$

$$X := \text{sort}(F) \quad m := \text{mean}(F) \quad \sigma := \text{stdev}(F) \quad m = 129.092 \quad \sigma = 36.285$$

$$pn := \text{pnorm}(X, m, \sigma) \quad pl := \text{plogis}(X, m, \sigma) \quad pu := \text{punif}(X, 12, 162)$$

$$\text{Коефіцієнти кореляції} \quad \text{corr}(pp) := \text{corr}(pp, p)$$

$$\text{cor}(pn) = 0.946$$

$$\text{cor}(pl) = 0.924$$

$$\text{cor}(pu) = 0.865$$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

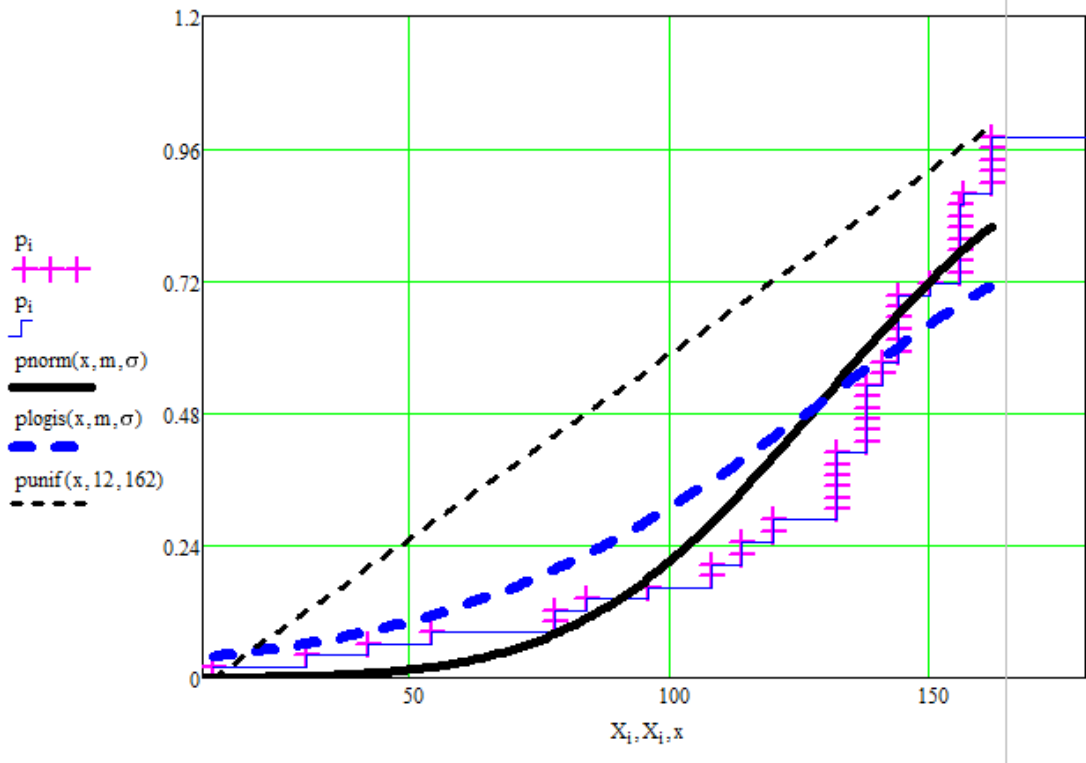


Рисунок 3.3 - Інтегральна функція розподілу осьової сили на долото [6]

$i:=1..15$ $n:=49$

$e_{i}:=$ $kel_{i}:=$ $pel_{i}:= \frac{kel_{i}}{n}$

12	1	0.02
30	1	0.02
42	1	0.02
54	1	0.02
78	2	0.041
84	1	0.02
96	1	0.02
108	2	0.041
114	2	0.041
120	2	0.041
132	6	0.122
138	6	0.122
141	2	0.041
144	6	0.122
150	1	0.02
156	7	0.143
156.5	1	0.02
162	5	0.102
193	1	0.02

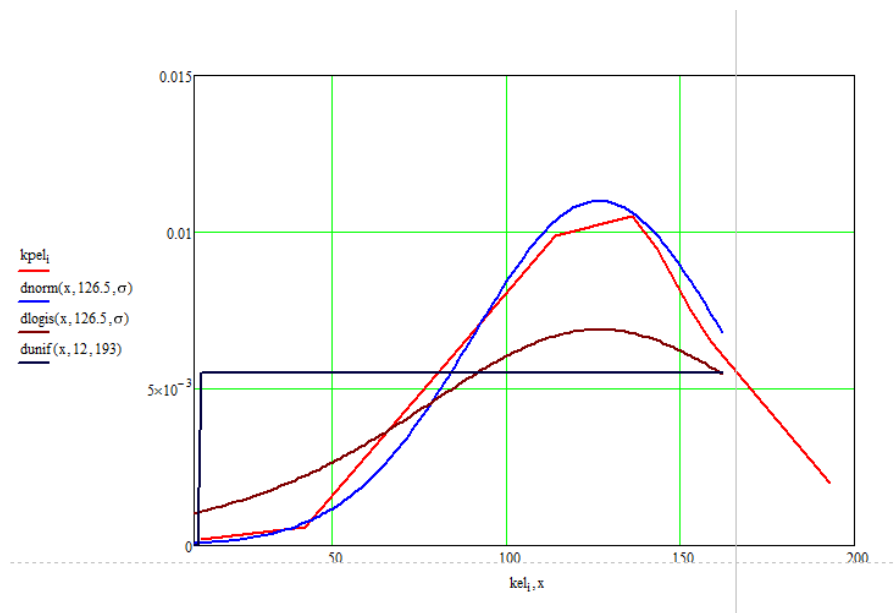


Рисунок 3.4 – Графіки розподілів осьової сили на долото

З графіку видно, що нам найкраще підходить нормальний розподіл.

Перевірка за критерієм Пірсона

$$\chi^2 := n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(dh_i - dp_i)^2}{dp_i} \quad \text{- критерій Пірсона}$$

$$r := n - 3$$

$$\chi^2(dn) = 109.361 \quad \chi^2(dl) = 90.398 \quad \chi^2(du) = 100.385$$

$$p\chi^2(dp) := pchisq(\chi^2(dp), r)$$

$$p\chi^2(dn) = 1 \quad p\chi^2(dl) = 0.999 \quad p\chi^2(du) = 0.999$$

Згідно критерію Пірсона, даний розподіл близький до нормального.

Опрацюємо наступну вибірку V_m

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad i := 1..n \quad p_i := \frac{1}{n} \cdot i \quad x := 0..3.3$$

n - кількість чисел у вибірці

$$X := rnorm(n, 1.7, 3.3) \quad X := rlogis(n, 1.7, 3.3) \quad X := rpunif(n, 1.7, 3.3)$$

$$X := \text{sort}(V) \quad m := \text{mean}(V) \quad \sigma := \text{stdev}(V) \quad m = 2.904 \quad \sigma = 0.298$$

$$pn := pnorm(X, m, \sigma) \quad pl := plogis(X, m, \sigma) \quad pu := punif(X, 1.7, 3.3)$$

$$\text{Коефіцієнти кореляції} \quad \text{corr}(pp) := \text{corr}(pp, p)$$

$$\text{cor}(pn) = 0.984, \quad \text{cor}(pl) = 0.979, \quad \text{cor}(pu) = 0.919.$$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

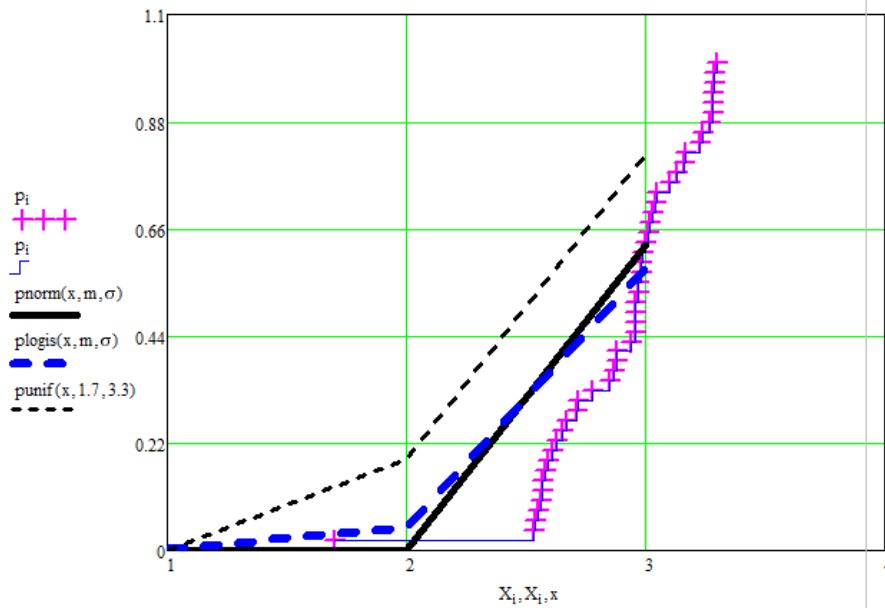


Рисунок 3.5 – Інтегральна функція розподілу механічної швидкості [6]

Запишемо згруповані елементи вибірки:

$k:=1..10$

$kel_k:=$

1.7
2.345
2.565
2.645
2.88
2.92
2.995
3.06
3.18
3.26
3.295

$krel_k:=$

0.02
0.35
0.61
0.75
0.89
0.193
0.101
0.1
0.08
0.08
0.041
0.02

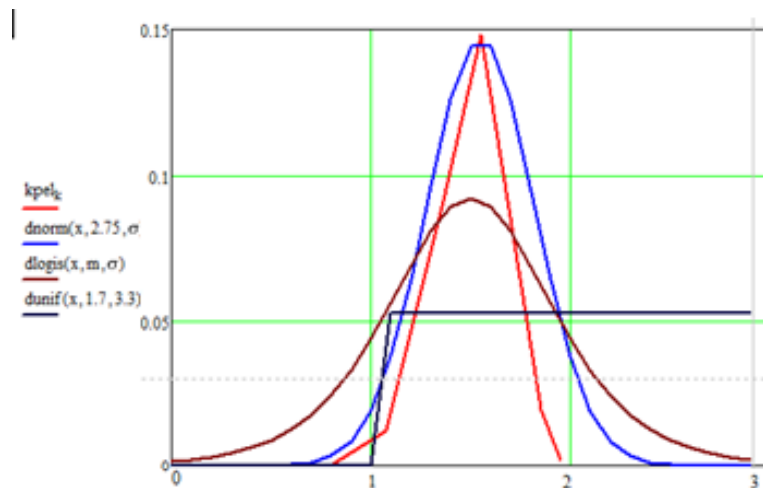


Рисунок 3.6 – Графіки розподілів механічної швидкості [6]

Легко побачити, що найкраще підходить нормальний закон розподілу.

Перевірка за критерієм Пірсона

$$\chi^2 := n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(dh_i - dp_i)^2}{dp_i} \quad \text{- критерій Пірсона}$$

$$r := n - 3$$

$$\chi^2(\text{dn}) = 1.7 \cdot 10^4 \quad \chi^2(\text{dl}) = 1.63 \cdot 10^3 \quad \chi^2(\text{du}) = 1.437 \cdot 10^3$$

$$p\chi^2(\text{dp}) := \text{pchisq}(\chi^2(\text{dp}), r)$$

$$p\chi^2(\text{dn}) = 1 \quad p\chi^2(\text{dl}) = 0.969 \quad p\chi^2(\text{du}) = 0.949$$

Згідно критерію Пірсона, даний розподіл близький до нормального.

Розглянемо вибірку U, V. Для неї отримаємо наступні результати:

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad i := 1..n \quad p_i := \frac{1}{n} \cdot i \quad x := 0..1692$$

n - кількість чисел у вибірці

$$X := \text{rnorm}(n, 1692, 1792) \quad X := \text{rlogis}(n, 1692, 1792) \quad X := \text{rpunif}(n, 1692, 1792)$$

$$X := \text{sort}(U) \quad m := \text{mean}(U) \quad \sigma := \text{stdev}(U) \quad m = 1.751 \cdot 10^3 \quad \sigma = 29.492$$

$$pn := \text{pnorm}(X, m, \sigma) \quad pl := \text{plogis}(X, m, \sigma) \quad pu := \text{punif}(X, 1692, 1792)$$

Коефіцієнти кореляції $\text{corr}(pp) := \text{corr}(pp, p)$

$$\text{cor}(pn) = 0.937, \text{cor}(pl) = 0.942, \text{cor}(pu) = 0.945.$$

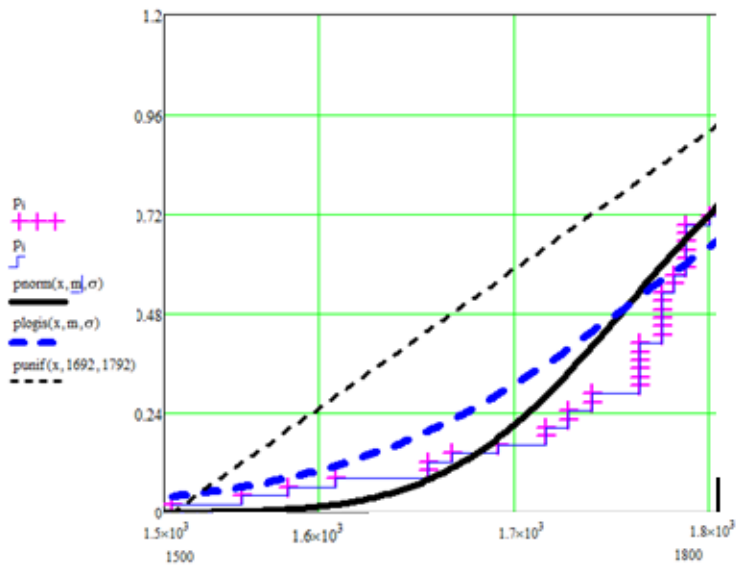


Рисунок 3.7 – Інтегральна функція розподілу для напруги

$i:=1..15$ $n:=49$

$$el_i := \quad kel_i := \quad pel_i := \frac{kel_i}{n}$$

1692	1	0.02
1705	4	0.082
1728	1	0.02
1730	4	0.082
1732	1	0.02
1733	1	0.02
1734	1	0.02
1735	4	0.082
1736	4	0.082
1738	8	0.163
1760	1	0.02
1780	3	0.061
1783	2	0.041
1785	1	0.02
1786	2	0.041
1788	1	0.02
1789	1	0.02
1790	1	0.02
1791	1	0.02
1792	5	0.102
	1	0.02
	3	0.061

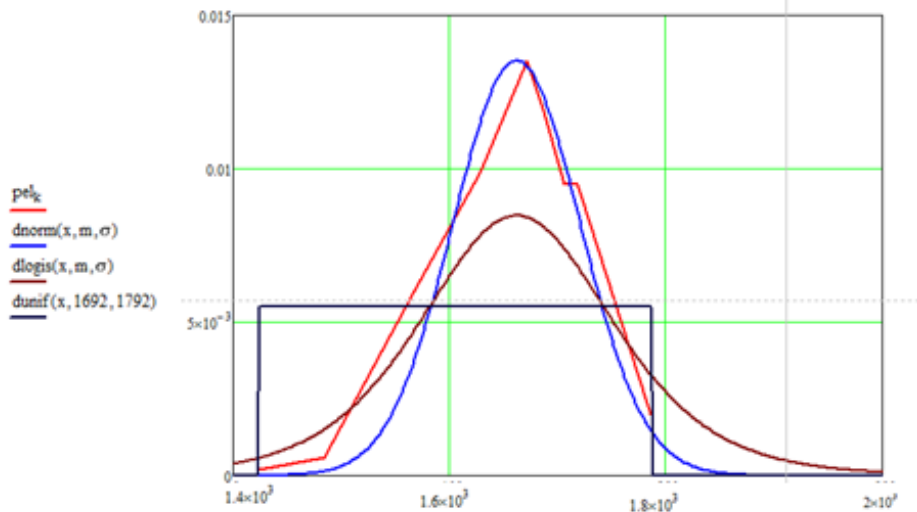


Рисунок 3.8 – Графіки розподілів для напруги

Перевіримо за критерієм Пірсона, який з розподілів найкращий.

Перевірка за критерієм Пірсона

$$\chi^2 := n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(dh_i - dp_i)^2}{dp_i} \quad \text{- критерій Пірсона}$$

$$r := n - 3$$

$$\chi^2(dn) = 40.267 \quad \chi^2(dl) = 14.38 \quad \chi^2(du) = 21.761$$

$$p\chi^2(dp) := \text{pchisq}(\chi^2(dp), r)$$

$$p\chi^2(dn) = 1 \quad p\chi^2(dl) = 0.75 \quad p\chi^2(du) = 0.00091$$

Згідно критерію Пірсона, даний розподіл близький до нормального.

Розглянемо вибірку для $\frac{V}{V_0}$:

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad i := 1..n \quad p_i := \frac{1}{n} \cdot i \quad x := 0..1.054$$

n - кількість чисел у вибірці

$$X := \text{rnorm}(n, 0.541, 1.054) \quad X := \text{rlogis}(n, 0.541, 1.054) \quad X := \text{rpunif}(n, 0.541, 1.054)$$

$$X := \text{sort}(K) \quad m := \text{mean}(K) \quad \sigma := \text{stdev}(K) \quad m = 1.751 \cdot 10^3 \quad \sigma = 29.492$$

$$pn := \text{pnorm}(X, m, \sigma) \quad pl := \text{plogis}(X, m, \sigma) \quad pu := \text{punif}(X, 0.541, 1.054)$$

Коефіцієнти кореляції $\text{corr}(pp) := \text{corr}(pp, p)$

$$\text{cor}(pn) = 0.984, \text{cor}(pl) = 0.979, \text{cor}(pu) = 0.918.$$

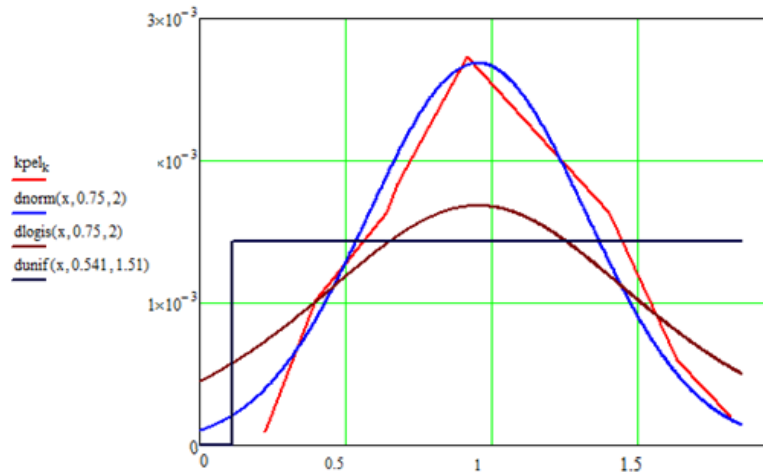


Рисунок 3.10 - Графіки розподілів для $\frac{v}{v_0}$

Перевірка за критерієм Пірсона

$$\chi^2 := n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(dh_i - dp_i)^2}{dp_i} \quad \text{- критерій Пірсона}$$

$$r := n - 3$$

$$\chi^2(dn) = 5.648 \cdot 10^4 \quad \chi^2(dl) = 5.369 \cdot 10^3 \quad \chi^2(du) = 4.791 \cdot 10^3$$

$$p\chi^2(dp) := pchisq(\chi^2(dp), r)$$

$$p\chi^2(dn) = 1 \quad p\chi^2(dl) = 0.775 \quad p\chi^2(du) = 0.691$$

Згідно критерію Пірсона, даний розподіл близький до нормального.

3.3 Визначення автокореляційної функції

Для випадкової функції одномірний розподіл імовірності і отримані на основі нього характеристики, такі як оцінка математичного сподівання та дисперсія, ще не є достатніми для оцінки характеру протікання випадкового процесу в часі. Необхідно ще встановити зв'язок між значеннями випадкового процесу в різні моменти часу. Це можна зробити за допомогою двохмірної функції розподілу. Інтенсивність зміни випадкового сигналу в часі можна охарактеризувати за допомогою однієї з функцій – автокореляційної функції або функції спектральної густини. Математичне сподівання похідних значень

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

центрованої випадкової функції, взятих при двох моментах часу t_1 та t_2 називають автокореляційною функцією. Вона визначається за формулою [4, 5]:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x'(t-\tau)dt \quad (3.2)$$

де τ – кореляційний зсув.

Щоб отримати автокореляційну функцію скористаємось програмним пакетом MatLab [9].

Наведемо текст програми для побудови кореляційної функції в середовищі MatLab для струму.

```
I=[117.5 118.5 120 121.5 121.5 123 123 123 126 129 129 129.5 129 123 124.5 124.5
126 127.5 126 124.5 126 126 124.5 124.5 124.5 125.5 126 125 126 126 126 126 126
126 123 120 120.5 123 123 123.5 126 126 126 126.5 126 127.5 129 126]
```

I =

Columns 1 through 16

```
117.5000 118.5000 120.0000 121.5000 121.5000 123.0000 123.0000 123.0000
126.0000 129.0000 129.0000 129.5000 129.0000 123.0000 124.5000 124.5000
```

Columns 17 through 32

```
126.0000 127.5000 126.0000 124.5000 126.0000 126.0000 124.5000 124.5000
124.5000 125.5000 126.0000 125.0000 126.0000 126.0000 126.0000 126.0000
```

Columns 33 through 48

```
126.0000 126.0000 123.0000 120.0000 120.5000 123.0000 123.0000 123.5000
126.0000 126.0000 126.0000 126.5000 126.0000 127.5000 129.0000 126.0000
```

```
>> t=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48]
```

t =

Columns 1 through 27

```
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17
18 19 20 21 22 23 24 25 26
```

Columns 28 through 49

27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43
44 45 46 47 48

```
>> Rxx=xcorr(I,t,49)
```

Rxx =

1.0e+005 *

Columns 1 through 16

0 0.0564 0.1121 0.1673 0.2221 0.2757 0.3287 0.3805 0.4311
0.4819 0.5329 0.5826 0.6312 0.6783 0.7213 0.7637

Columns 17 through 32

0.8049 0.8455 0.8856 0.9238 0.9599 0.9955 1.0299 1.0622 1.0934
1.1233 1.1524 1.1805 1.2068 1.2324 1.2568 1.2798

Columns 33 through 48

1.3017 1.3222 1.3415 1.3581 1.3720 1.3850 1.3980 1.4097 1.4204
1.4311 1.4406 1.4488 1.4559 1.4616 1.4667 1.4713

Columns 49 through 64

1.4731 1.4132 1.3545 1.2969 1.2406 1.1855 1.1315 1.0789 1.0274
0.9772 0.9282 0.8805 0.8341 0.7891 0.7453 0.7027

Columns 65 through 80

0.6614 0.6213 0.5825 0.5449 0.5086 0.4736 0.4398 0.4073 0.3760
0.3460 0.3172 0.2897 0.2634 0.2384 0.2146 0.1921

Columns 81 through 96

0.1709 0.1509 0.1322 0.1147 0.0985 0.0835 0.0696 0.0570 0.0457
0.0355 0.0267 0.0191 0.0127 0.0076 0.0038 0.0013

Columns 97 through 99

0 0.0000 0

```
>> plot(Rxx)
```

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ				Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

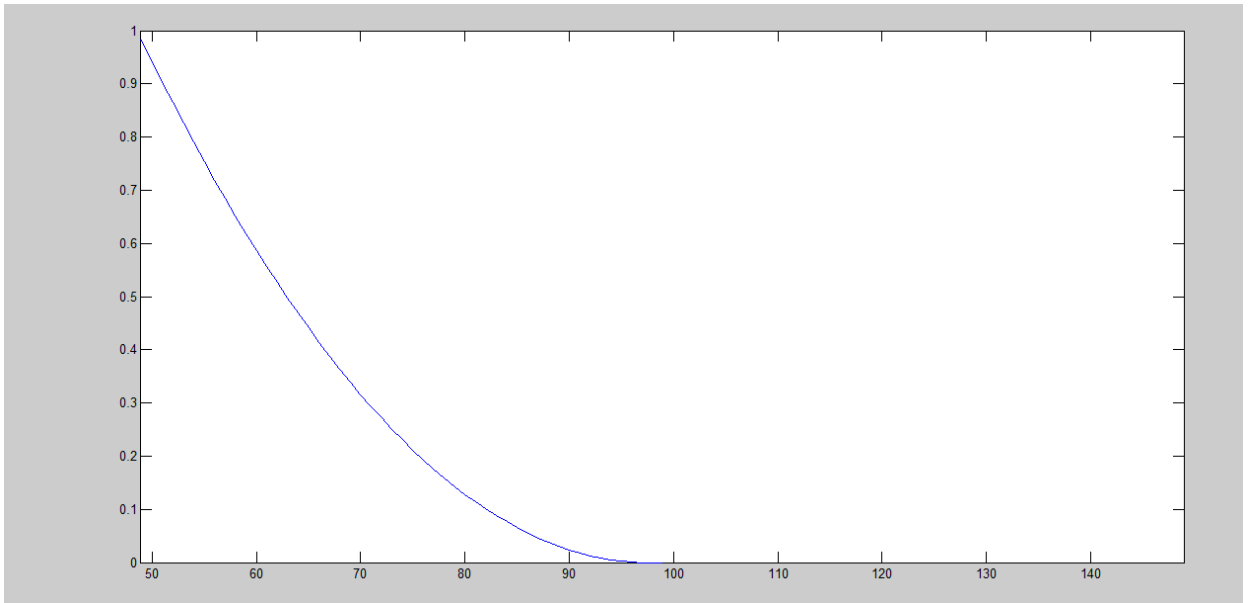
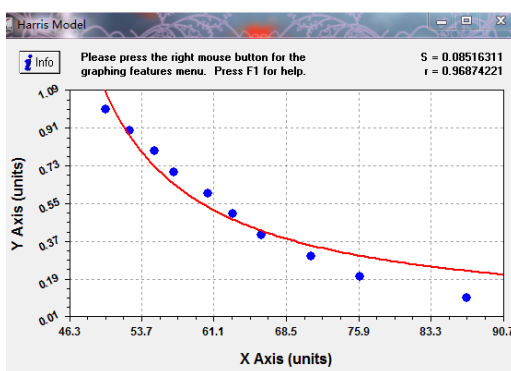


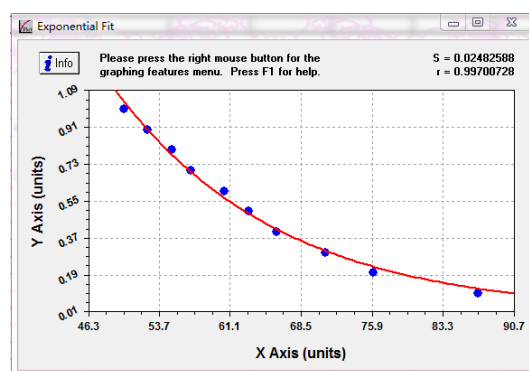
Рисунок 3.11 – Графік автокореляційної функції для струму [5]

Графік отриманої автокореляційної функції підтверджує, що досліджуваний процес $x(t)$ є стаціонарним і ергодичним, оскільки функція прямує до 0.

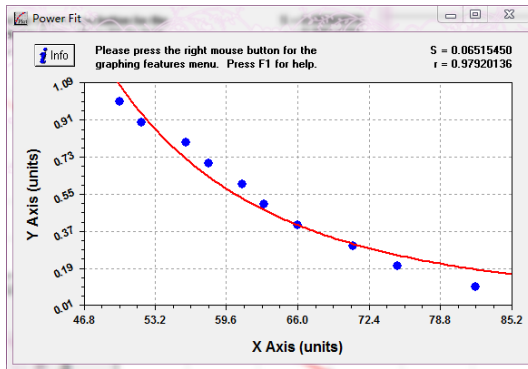
Для одержання рівняння автокореляційної функції скористаємось програмою CurveExpert. Під час апроксимації ми отримали декілька кривих і обрали з них найкращу.



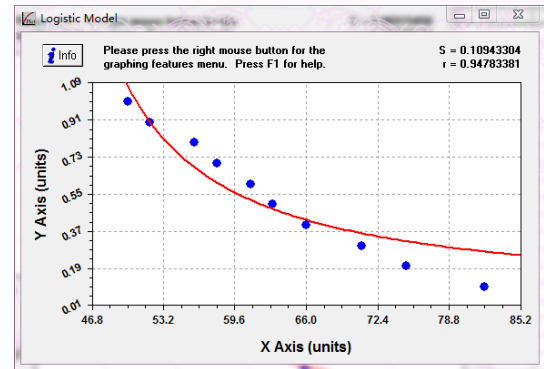
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.12 – Апроксимація автокореляційної функції сили струму [13]

Найкращий результат ми отримали при апроксимації кривої за експонентою, оскільки коефіцієнт кореляції $r=0,997$, а похибка рівна $0,02$.

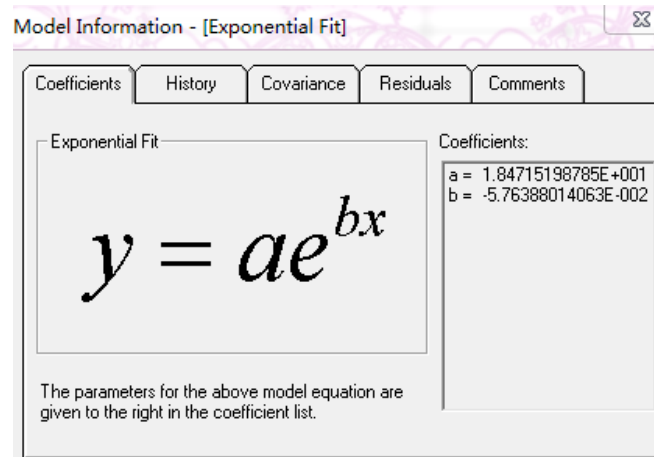


Рисунок 3.13 – Рівняння автокореляційної функції (Exponential Fit) [7]

Отже, рівняння автокореляційної функції для струму наступне:

$$R(\tau) = 1,84e^{-5,76\tau} \quad (3.3)$$

Побудуємо автокореляційну функцію для наступного параметру, а саме осьової сили на долото. В командному рядку запишемо наступні команди:

```
>> F=[12 30 78 78 84 96 108 114 114 144 150 162 162 162 54 42 108 120 120 132
132 132 144 132 138 132 138 138 156 156 156.5 141 132 144 141 138 144 138 138
156 193 156 144 162 144 156 162 156 156];
```

```
>> t=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48];
```

```
>> Rxx=xcorr(F,t,'coef');
```

```
>> plot(Rxx)
```

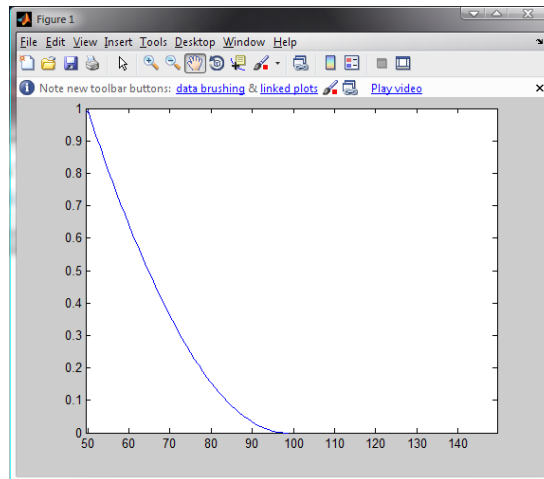
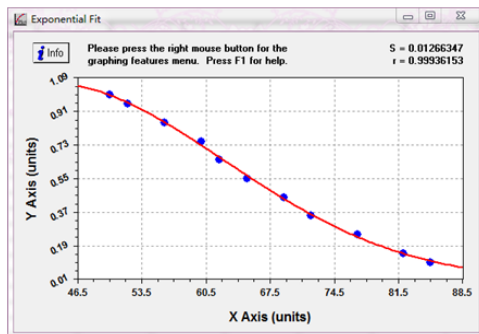
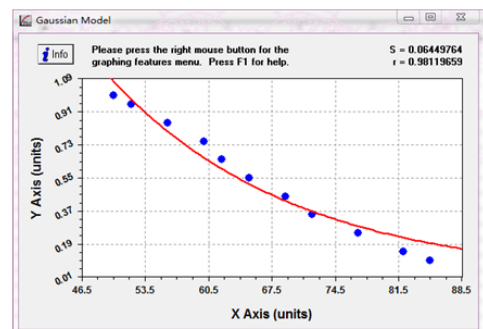


Рисунок 3.14 - Графік автокореляційної функції для F [7]

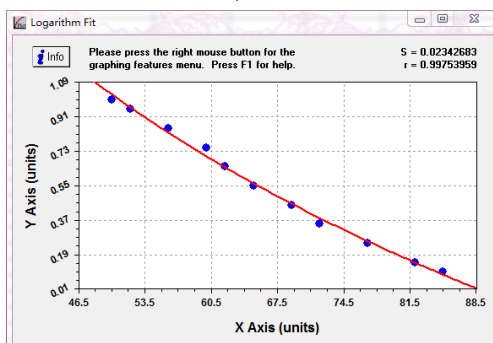
Одержавши графік автокореляційної функції, апроксимуємо її в програмі CurveExpert для одержання рівняння функції. Нижче покажемо результати апроксимації [7].



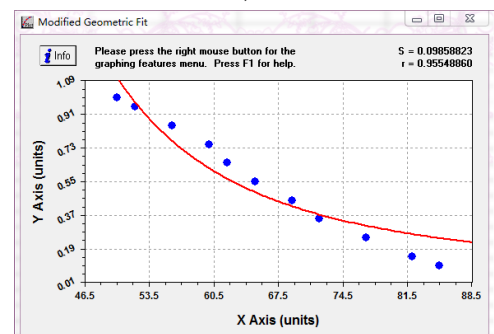
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.15 - Апроксимація автокореляційної функції для F

Найкращий коефіцієнт апроксимації $r=0,999$ і одночасно найменшу похибку ми отримали при апроксимації експонентою [7].

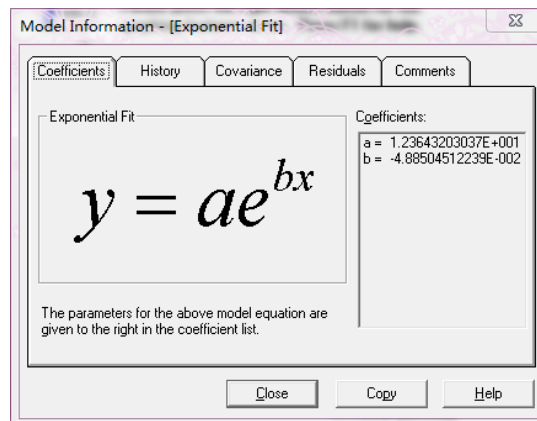


Рисунок 3.16 - Рівняння автокореляційної функції для F

Отже, рівняння автокореляційної функції для параметру сила навантаження на долото наступне:

$$R(\tau) = 1,24e^{-5,885\tau} \quad (3.4)$$

Далі знайдемо графік і рівняння автокореляційної функції для механічної швидкості.

```
>> V=[1.7 3.13 2.53 2.72 2.56 2.57 2.54 2.55 2.57 2.71 2.78 2.85 2.87 2.88 2.96 3
3.03 2.94 2.97 2.98 2.88 3.01 2.99 3.02 2.97 2.96 2.96 2.96 2.98 3.04 3.05 3.1 3.17
3.16 2.58 2.59 2.61 2.63 2.65 2.67 3.23 3.24 3.28 3.28 3.27 3.28 3.29 3.29 3.30];
>> t=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48];
>> Rxx=xcorr(V,t,'coef');
>> plot(Rxx)
```

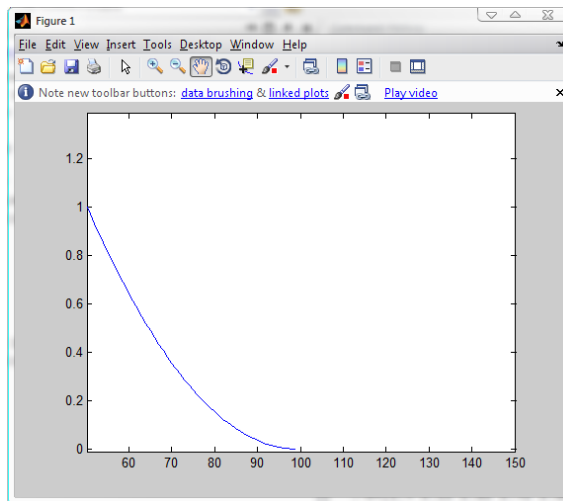
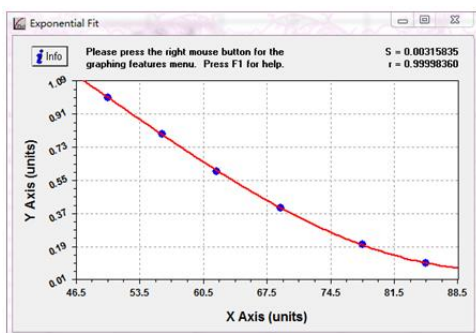
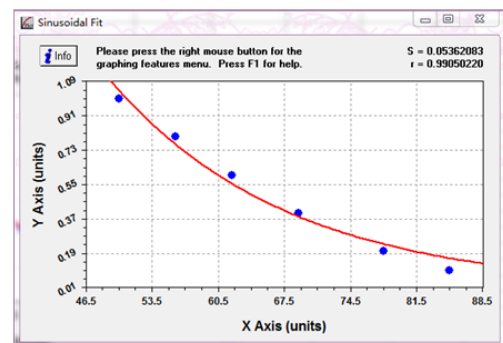


Рисунок 3.17 - Графік автокореляційної функції для V_M

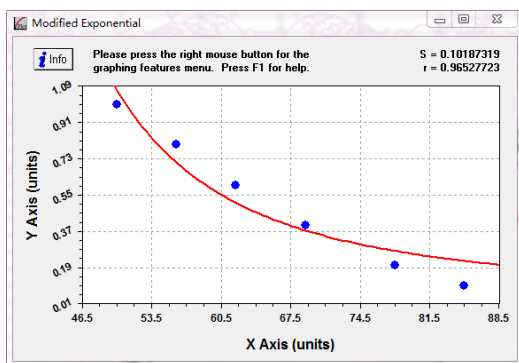
Здійснимо апроксимацію.



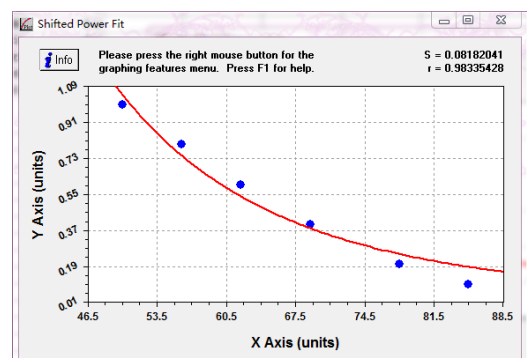
a)



б)



в)



г)

Рисунок 3.18 - Апроксимація автокореляційної функції V_M

Найкращі показники при експоненціальній апроксимації: $r=0,999$ і похибці $0,003$.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

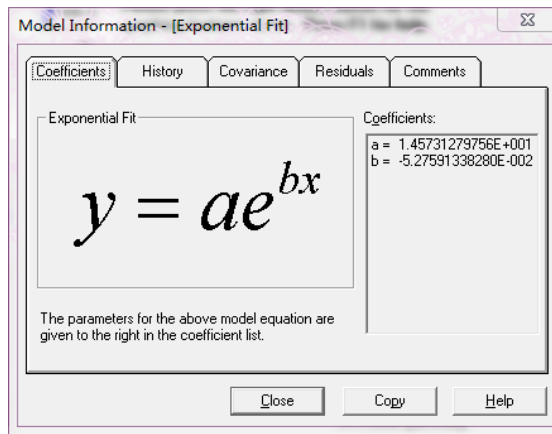


Рисунок 3.19 - Рівняння автокореляційної функції для V_M

Отже, рівняння автокореляційної функції наступне:

$$R(\tau) = 1,46e^{-5,28\tau} . \quad (3.5)$$

Для параметра напруги матимемо наступне.

U=[1705 1692 1736 1735 1736 1734 1730 1705 1730 1736 1736 1735 1734 1735
1736 1733 1734 1705 1705 1730 1738 1736 1736 1734 1730 1735 1736 1732 1780
1790 1792 1791 1785 1790 1792 1760 1728 1760 1790 1785 1792 1760 1790 1780
1786 1788 1783 1789 1790];

>> Rxx=xcorr(U,t,49);

>> plot(Rxx)

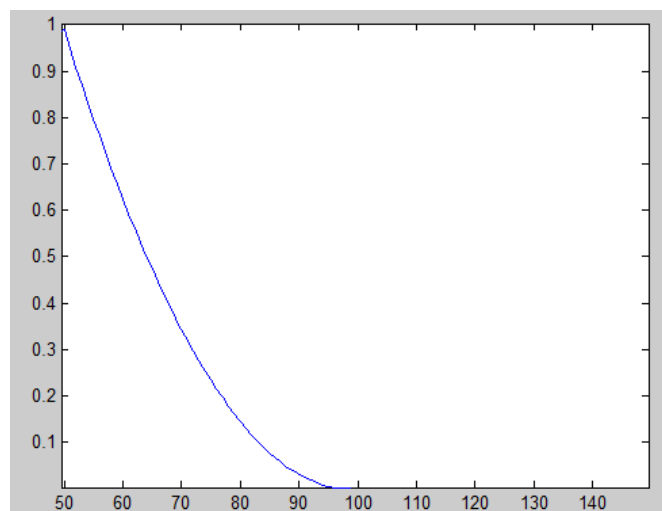
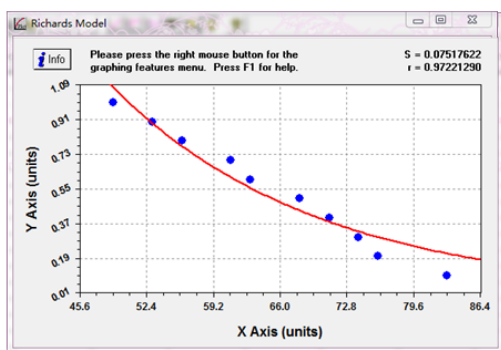


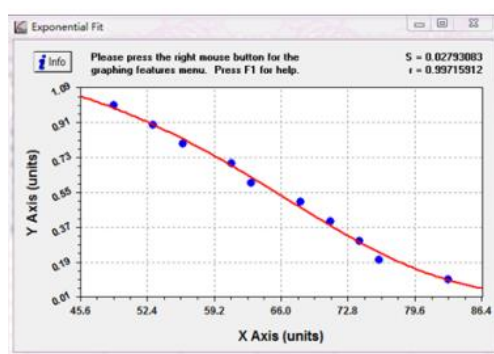
Рисунок 3.20 - Графік автокореляційної функції для напруги [7]

Проведемо апроксимацію отриманої кривої.

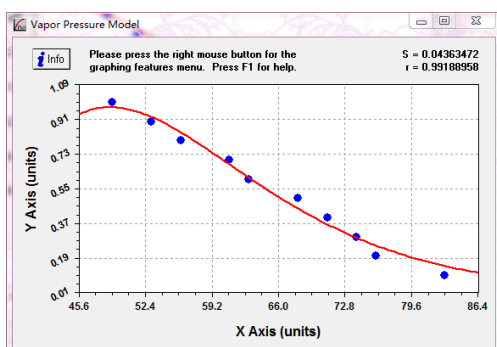
					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52



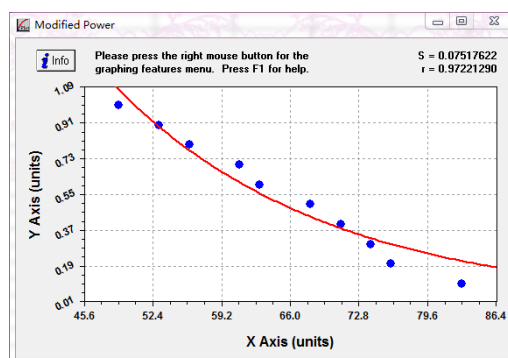
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.21 - Апроксимація автокореляційної функції для напруги

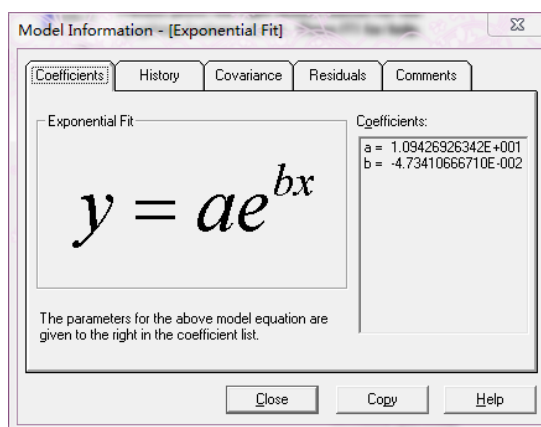


Рисунок 3.22 – Рівняння автокореляційної функції для напруги

Запишемо рівняння експоненти, яке отримали в результаті апроксимації [6]

$$R(\tau) = 1,09e^{-4,73\tau} \quad (3.6)$$

Опрацюємо дані вибірки $\frac{V}{V_0}$.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

K=[0.541 1 0.808 0.869 0.818 0.821 0.812 0.815 0.821 0.866 0.888 0.911 0.917 0.920
 0.946 0.958 0.968 0.939 0.949 0.952 0.92 0.962 0.955 0.965 0.949 0.946 0.946 0.946
 0.952 0.971 0.974 0.99 1.013 1.009 0.824 0.827 0.834 0.840 0.847 0.853 1.032];

>> Rxx=xcorr(K,t,49);

>> plot(Rxx)

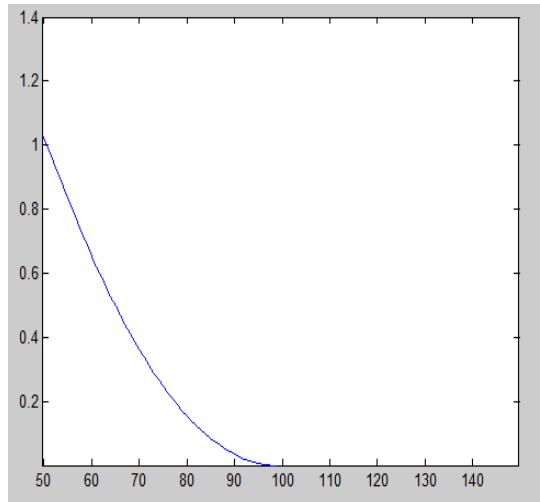
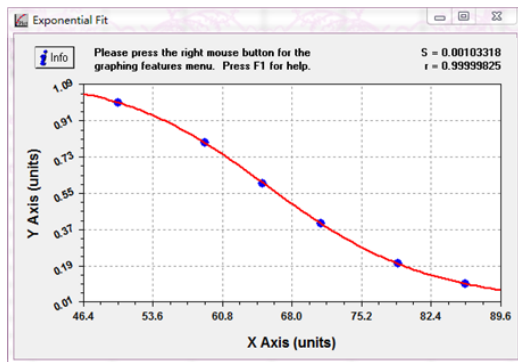
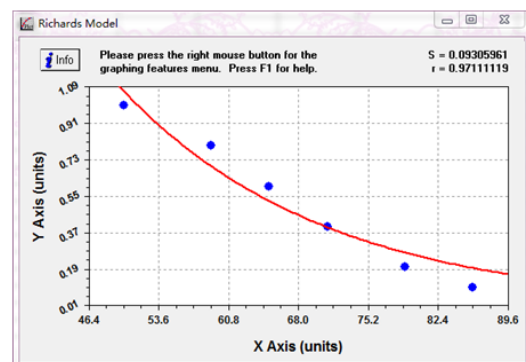


Рисунок 2.23 - Графік автокореляційної функції $\frac{V}{V_0}$

Здійснимо апроксимацію автокореляційної функції, щоб знайти рівняння функції.



a)



б)

Рисунок 3.24 — Апроксимація автокореляційної функції для $\frac{V}{V_0}$

Як бачимо найкраще найбільший коефіцієнт автокореляції $r=0,999$ та найменша похибка при апроксимації експонентою.

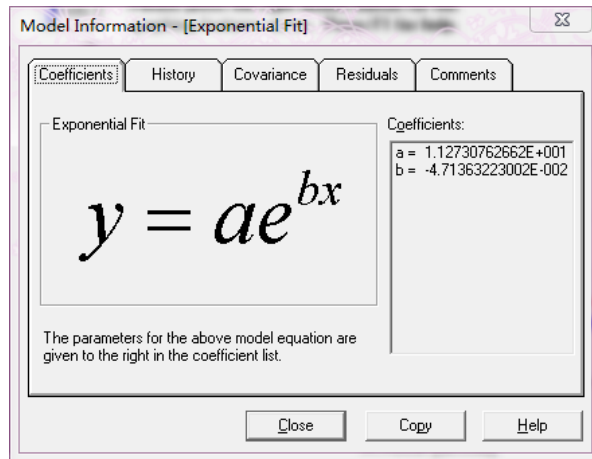


Рисунок 3.25 - Рівняння автокореляційної функції для $\frac{V}{V_0}$

Отже, рівняння автокореляційної функції для моменту на долоті наступне

$$R(\tau) = 1,12e^{-4,71\tau}. \quad (3.7)$$

3.4 Визначення спектральної щільності досліджуваного процесу

Спектральна щільність є додатною функцією у всьому діапазоні частот від 0 до ∞ . Вона не містить відомостей про фази окремих гармонійних складових. Найчастіше в практичних розрахунках зустрічаються сигнали з експоненціальною кореляційною функцією [6,7]:

$$R(\tau) = De^{-\alpha\tau}. \quad (3.8)$$

Застосовуючи до кореляційної функції перетворення знаходимо спектральну густину:

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} De^{-\alpha\tau} \cos \omega\tau d\tau = \frac{2D\alpha}{\alpha^2 + \omega^2}. \quad (3.9)$$

Оскільки, одержані нами кореляційні функції експоненціальні, то запишемо їх спектральну щільність за формулою (3.9) і побудуємо їх графік за допомогою програмного пакету MatCad [9].

Для струму I автокореляційна функція така: $R(\tau) = 1,84e^{-5,76\tau}$, де

$D=1,84$, $\alpha=5,76$.

Отже, запишемо формулу для спектральної щільності струму:

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S(\omega) = \frac{21,2}{33,18 + \omega^2}, \quad S(\omega) := \frac{21.312}{33.18 + \omega^2}, \quad \omega := 0,0.002..500$$

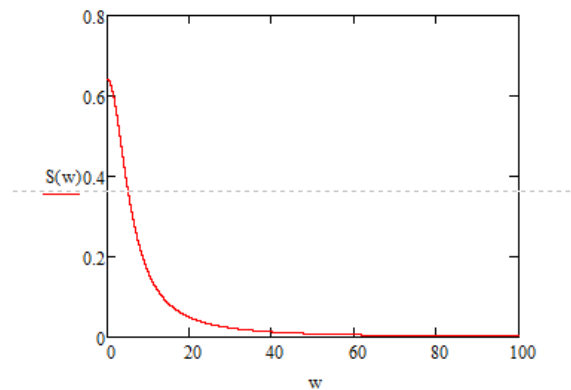


Рисунок 3.26 - Графік спектральної густини для струму

Згідно рівняння автокореляційної функції осьвої сили на долото (2.4) $D=1,24$, $\alpha=5,885$, то спектральна щільність буде наступна:

$$S(\omega) = \frac{14,6}{34,6 + \omega^2}, \quad S(\omega) := \frac{14.6}{34.6 + \omega^2}, \quad \omega := 0,0.002..500$$

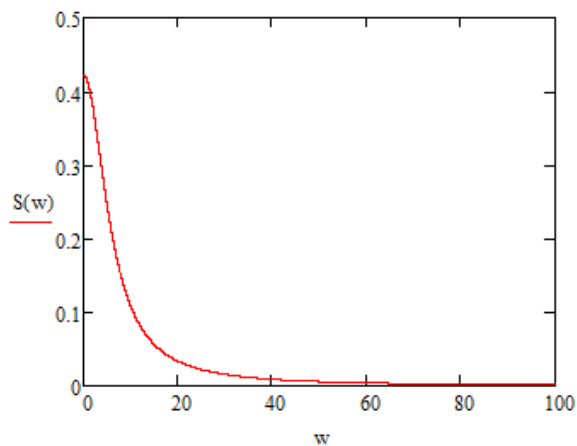


Рисунок 3.27 – Графік спектральної щільності для F

Згідно рівняння автокореляційної функції механічної швидкості (3.5) $D=1,46$, $\alpha=5,28$, то спектральна щільність буде наступна:

$$S(\omega) = \frac{15,42}{27,88 + \omega^2}, \quad S(\omega) := \frac{15.42}{37.88 + \omega^2}, \quad \omega := 0,0.002..500$$

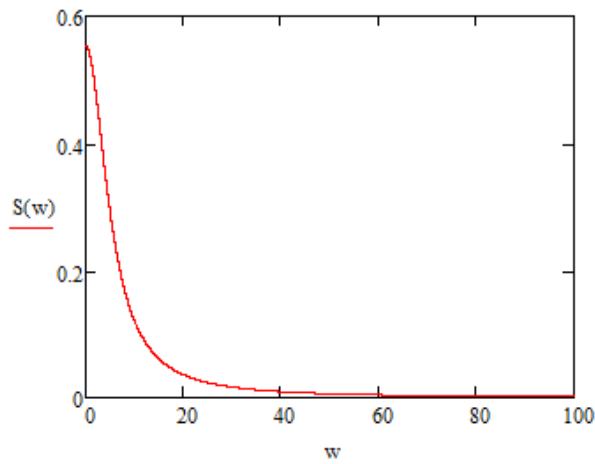


Рисунок 3.28 - Графік спектральної щільності для механічної швидкості

Згідно рівняння автокореляційної функції напруги (3.6) $D=1,09$, $\alpha=4,73$, то спектральна щільність буде наступна [6]:

$$S(\omega) = \frac{10,31}{22,37 + \omega^2} \cdot S(w) := \frac{10,31}{22,37 + w^2}; \quad w := 0,0.002..500$$

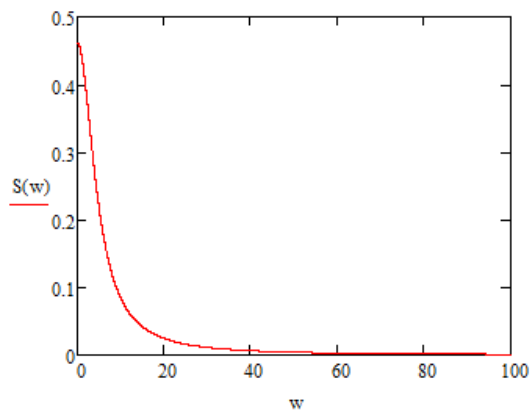


Рисунок 3.29 - Графік спектральної щільності для напруги

Згідно рівняння автокореляційної функції $\frac{v}{v_0}$ (2.7) $D=1,12$, $\alpha=4,71$, то спектральна щільність буде наступна:

$$S(\omega) = \frac{10,55}{22,18 + \omega^2} \cdot S(w) := \frac{10,31}{22,37 + w^2}, \quad w := 0,0.002..500$$

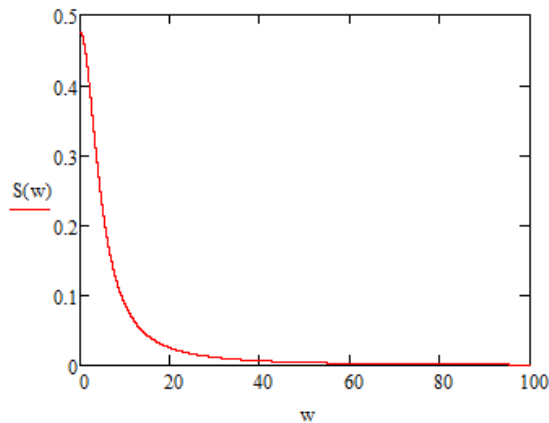


Рисунок 2.30 - Графік спектральної щільності $\frac{V}{V_0}$

3.5 Розрахунок оптимальних параметрів режиму буріння методом бар'єрних функцій

З використанням математичних моделей поглиблення свердловини, розглянуто задачу вибору оптимальних режимних параметрів при бурінні свердловин електробуром: осьової сили на долото F і швидкості обертання долота n .

Як критерій оптимальності режиму буріння прийняли собівартість метра проходки:

$$B = [B_i(t_o + t_c) + B_g]h^{-1}, \quad (3.17)$$

де B_i - вартість години роботи бурової установки, t_o, t_c - відповідно час механічного буріння та спуско-підймальних та допоміжних робіт, B_g - вартість долота, h - проходка долота.

Отож, метою оптимального керування є

$$B(x) \xrightarrow{x \in S} \min, \quad (3.18)$$

де $S = \{(F_i, n_i)_{i=1, \dots, N}; F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max}; n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}; \sum_{i=1}^N h_i = H; h_i > 0\}$, F_i, n_i - осьова сила на долото і швидкість його обертання в i -му рейсі долота, H - проектна глибина, h_i

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- проходка на долото в i -му рейсі, N - кількість рівнів, на які може бути розділена H .

Критерій оптимальності виразили в залежності від режимних параметрів, скориставшись диференціальним рівнянням поглибленням свердловини:

$$\frac{dh}{dt} = aF^x n^y Y(F, n, t), h|_{t \rightarrow 0} = 0, \quad (3.19)$$

де a, x, y - емпіричні коефіцієнти, $Y(F, n, t)$ - функція зносу озброєння долота.

Обґрунтовано обмеження для часу механічного буріння $t_{\bar{o}}$, яким є умови довговічності долота

$$t_{\bar{o}} \leq A(F^\alpha n^\beta)^{-1}, \quad (3.20)$$

де A, α, β - емпіричні коефіцієнти.

Отже, пошук оптимальних режимних параметрів $F_{opt} n_{opt}$ та часу перебування долота на вибої свердловини зведено до розв'язку задач нелінійного програмування з обмеженнями у вигляді нерівностей:

$$\begin{aligned} B(F, n) &\rightarrow \min, \\ F - F_{\max} &\leq 0; n - n_{\max} \leq 0. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Метод бар'єрних функцій працює за принципом аналогічним до методів штрафних функцій: пошук мінімуму здійснюється шляхом розв'язку послідовності задач безумовної мінімізації. Число $r > 0$ є параметром бар'єру.

Розглянемо два варіанти, коли буріння ведеться шарошковими долотами різної ціни [7].

Варіант 1

Вихідні дані:

$a := 9.2 \cdot 10^{-5}$ $x := 1.2$ $y := 0.8$ - параметри рівняння механічної швидкості

$k_0 := 2.7 \cdot 10^{-9}$ $q := 2.1$ $s := 1.5$ - параметри функції зносу озброєння

$A := 7 \cdot 10^8$ $\alpha := 2.3$ $\beta := 1$ - параметри умови довговічності опори долота

$Bt := 1321$ - вартість години експлуатації бурової установки, грн/год

$Bg := 20000$ - вартість долота, грн

$tc := 12$ - час на спуско-підймальні та допоміжні роботи

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$F_{\max} := 250$ - допустима осьова сила на долото, кН

$n_{\max} := 120$ - допустима швидкість обертання долота, об/хв

$t_0 := 5$ - нульове наближення оптимального часу

$r := 10^{-2}$ - параметр бар'єру

$F := 0.7$ $n := 0.5$ - нульові наближення відмасштабованих керуючих впливів

Визначення оптимального часу перебування долота на вибої свердловини

$$k(F, n) := k_0 \cdot (F_{\max} \cdot F)^q \cdot (n_{\max} \cdot n)^s$$

$$T_0(F, n) := \frac{A}{(n_{\max} \cdot n)^\beta \cdot (F_{\max} \cdot F)^\alpha}$$

$$\psi(F, n, t) := [k(F, n) \cdot [Bt \cdot (t + tc) + Bg] + Bt] \cdot \exp(-k(F, n) \cdot t) - Bt$$

$$T(F, n, t_0) := \text{root}(\psi(F, n, t_0), t_0)$$

$$\text{topt}(F, n, t_0) := \text{if}(T(F, n, t_0) \leq T_0(F, n), T(F, n, t_0), T_0(F, n))$$

Критерій оптимальності процесу буріння свердловин

$$h(F, n, t_0) := \frac{a \cdot (F_{\max} \cdot F)^x \cdot (n_{\max} \cdot n)^y}{k(F, n)} \cdot (1 - \exp(-k(F, n) \cdot \text{topt}(F, n, t_0)))$$

$$B(F, n, t_0) := \frac{Bt \cdot (\text{topt}(F, n, t_0) + tc) + Bg}{h(F, n, t_0)}$$

Бар'єрна функція

$$BB(F, n, t_0, r) := B(F, n, t_0) - r \cdot \ln[(1 - F) \cdot (1 - n)]$$

Пошук оптимальних керуючих впливів

$$BB1(F, n) := BB(F, n, t_0, r)$$

Given

$$\frac{d}{dF} BB1(F, n) = 0 \quad \frac{d}{dn} BB1(F, n) = 0$$

$$\begin{pmatrix} F_{opt} \\ n_{opt} \end{pmatrix} := \text{Minerr}(F, n)$$

Оптимальні керуючі впливи і показники роботи доліт

$$F_{opt} \cdot F_{\max} = 213.64 \text{ - осьова сила на долото, кН}$$

$$n_{opt} \cdot n_{\max} = 125.25 \text{ - швидкість обертання долота, об/хв.}$$

$$\text{topt}(F_{opt}, n_{opt}, t_0) = 5 \text{ - час перебування долота на вибої, год}$$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$h(F_{opt}, n_{opt}, t_0) = 7.156$ - проходка на долото, м

$B(F_{opt}, n_{opt}, t_0) = 5.933 \times 10^3$ - вартість метра проходки, грн/м

Графічна ілюстрація

$F := 0.2, 0.25..0.95$ $n := 0.2, 0.25..0.95$ $i_1 := 0..16$ $i_2 := 0..0.16$

$b_{i_1, i_2} := B(0.2 + 0.05 \cdot i_1, 0.2 + 0.05 \cdot i_2, t_0)$

$F := F_{opt} - 0.3, F_{opt} - b$

$n := n_{opt} - 0.3, n_{opt} - 0.3 + 0.002..n_{opt} + 0.1$

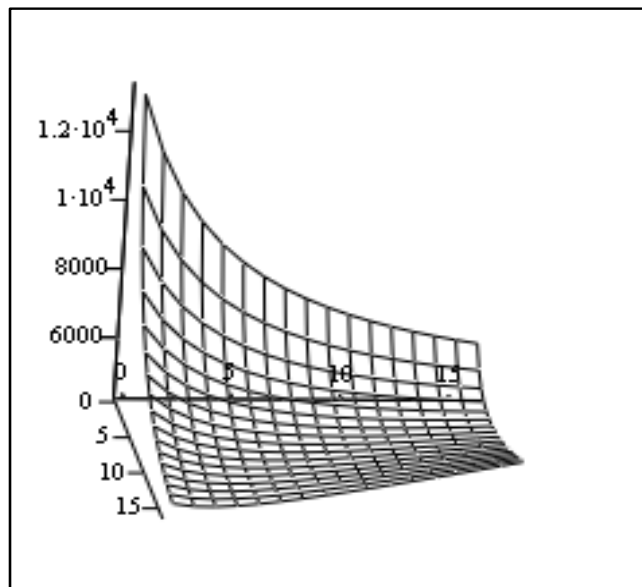


Рисунок 3.32 – Графік поверхні критерію оптимальності

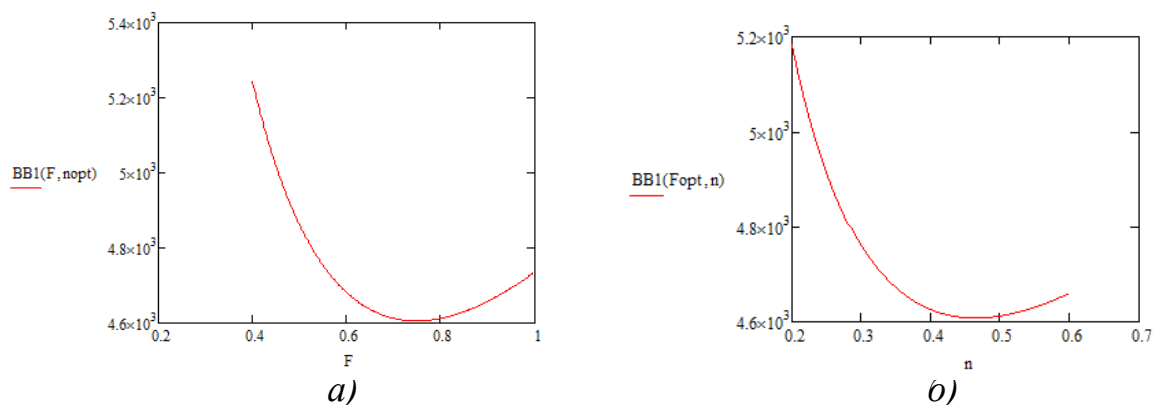


Рисунок 3.34 – Графіки перерізу бар'єрної функції

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Варіант 2

Вихідні дані:

$a := 9.2 \cdot 10^{-5}$ $x := 1.2$ $y := 0.8$ - параметри рівняння механічної швидкості

$k0 := 2.7 \cdot 10^{-9}$ $q := 2.1$ $s := 1.5$ - параметри функції зносу озброєння

$A := 7 \cdot 10^8$ $\alpha := 2.3$ $\beta := 1$ - параметри умови довговічності опори долота

$Bt := 1321$ - вартість години експлуатації бурової установки, грн/год

$Bg := 45000 \cdot 6$ - вартість долота, грн

$tc := 12$ - час на спуско-підймальні та допоміжні роботи

$F_{\max} := 250$ - допустима осьова сила на долото, кН

$n_{\max} := 120$ - допустима швидкість обертання долота, об/хв

$t0 := 5$ - нульове наближення оптимального часу

$r := 10^{-2}$ - параметр бар'єру

$F := 0.7$ $n := 0.5$ - нульові наближення відмасштабованих керуючих впливів

Визначення оптимального часу перебування долота на вибої свердловини

$$k(F, n) := k0 \cdot (F_{\max} \cdot F)^q \cdot (n_{\max} \cdot n)^s$$

$$T0(F, n) := \frac{A}{(n_{\max} \cdot n)^\beta \cdot (F_{\max} \cdot F)^\alpha}$$

$$\psi(F, n, t) := [k(F, n) \cdot [Bt \cdot (t + tc) + Bg] + Bt] \cdot \exp(-k(F, n) \cdot t) - Bt$$

$$T(F, n, t0) := \text{root}(\psi(F, n, t), t0)$$

$$\text{topt}(F, n, t0) := \text{if}(T(F, n, t0) \leq T0(F, n), T(F, n, t0), T0(F, n))$$

Критерій оптимальності процесу буріння свердловин

$$h(F, n, t0) := \frac{a \cdot (F_{\max} \cdot F)^x \cdot (n_{\max} \cdot n)^y}{k(F, n)} \cdot (1 - \exp(-k(F, n) \cdot \text{topt}(F, n, t0)))$$

$$B(F, n, t0) := \frac{Bt \cdot (\text{topt}(F, n, t0) + tc) + Bg}{h(F, n, t0)}$$

Бар'єрна функція

$$BB(F, n, t0, r) := B(F, n, t0) - r \cdot \ln[(1 - F) \cdot (1 - n)]$$

Пошук оптимальних керуючих впливів

$$BB1(F, n) := BB(F, n, t0, r)$$

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Given

$$\frac{d}{dF} BB1(F, n) = 0 \quad \frac{d}{dn} BB1(F, n) = 0$$

$$\begin{pmatrix} F_{opt} \\ n_{opt} \end{pmatrix} := \text{Minerr}(F, n)$$

Оптимальні керуючі впливи і показники роботи доліт

$$F_{opt} \cdot F_{max} = 214.285 \text{ - осьова сила на долото, кН}$$

$$n_{opt} \cdot n_{max} = 125.477 \text{ - швидкість обертання долота, об/хв.}$$

$$t_{opt}(F_{opt}, n_{opt}, t_0) = 5 \text{ - час перебування долота на вибої, год}$$

$$h(F_{opt}, n_{opt}, t_0) = 7.156 \text{ - проходка на долото, м}$$

$$B(F_{opt}, n_{opt}, t_0) = 4.087 \times 10^4 \text{ - вартість метра проходки, грн/м}$$

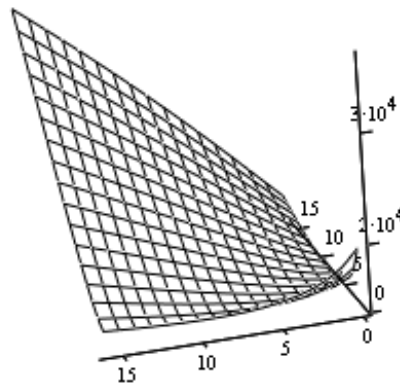
Графічна ілюстрація

$$F := 0.2, 0.25..0.95 \quad n := 0.2, 0.25..0.95 \quad i1 := 0..16 \quad i2 := 0..16$$

$$b_{i1, i2} := B(0.2 + 0.05 \cdot i1, 0.2 + 0.05 \cdot i2, t_0)$$

$$F := F_{opt} - 0.3, F_{opt} - b$$

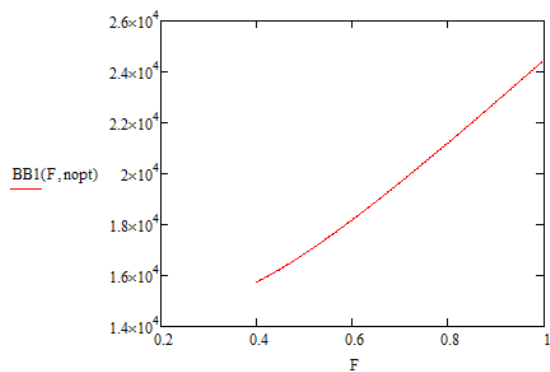
$$n := n_{opt} - 0.3, n_{opt} - 0.3 + 0.002 \cdot n_{opt} + 0.1$$



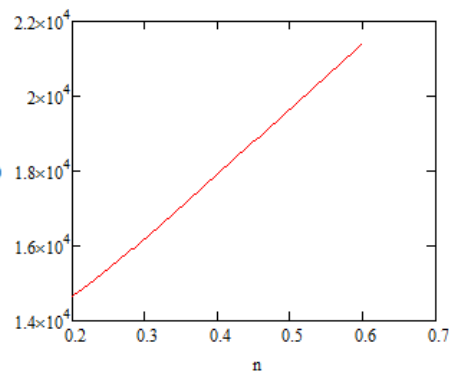
б

Рисунок 3.35 – Графік поверхні критерію оптимальності

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63



а)



б)

Рисунок 3.37 – Графіки перерізу бар'ерної функції

Висновки до розділу

У результаті обробки даних визначено, що для якісних показів вимірювальних приладів треба застосовувати формуючі фільтри з наступними функціями передачі [7]:

- для струму - $W_{\phi}(p) = \frac{4,6}{5,76 - p}$;

- для сили навантаження на долото - $W_{\phi}(p) = \frac{3,82}{5,885 - p}$

- для механічної швидкості - $W_{\phi}(p) = \frac{3,92}{5,28 - p}$

- для напруги - $W_{\phi}(p) = \frac{3,2}{4,73 - p}$

- для $\frac{v}{v_0}$ - $W_{\phi}(p) = \frac{3,25}{4,71 - p}$

Встановлено, що для розв'язання задачі оптимального адаптивного управління технологічним комплексом буріння необхідним є створення методу адаптивного оцінювання поточних витрат в умовах апіорної і поточної невизначеності процесу буріння щодо структури і параметрів об'єкта шляхом використання сучасних і адаптивних методів, які необхідно адаптувати до умов функціонування даного технологічного комплексу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі проаналізовано сучасний стан оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин, а також розглянуто технологічний процес буріння нафтових і газових свердловин як об'єкт керування

Досліджено існуючі математичні моделі процесу поглиблення свердловин, критерії оптимізації процесу поглиблення свердловин та системи автоматизації процесу буріння.

Результати дослідження статистичних характеристик показників процесу поглиблення нафтових і газових свердловин дозволило встановити, що досліджувані параметри підпорядковуються нормальному закону розподілу. У результаті обробки даних визначено передавальні функції формуючих фільтрів, які необхідно застосовувати для якісних показів вимірювальних приладів. Розраховані оптимальні параметри режиму буріння за методом бар'єрних функцій дозволяють зменшити витрати на буріння.

У результаті обробки даних визначено, що для якісних показів вимірювальних приладів треба застосовувати формуючі фільтри з наступними функціями передачі. Встановлено, що для розв'язання задачі оптимального адаптивного управління технологічним комплексом буріння необхідним є створення методу адаптивного оцінювання поточних витрат в умовах апріорної і поточної невизначеності процесу буріння щодо структури і параметрів об'єкта шляхом використання сучасних і адаптивних методів, які необхідно адаптувати до умов функціонування даного технологічного комплексу.

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбійчук М. І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: [навч. посібн.] / М. І. Горбійчук, Г.Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 493 с.
2. Шавранський М.В. Оптимізація та оптимальне керування процесами нафтової та газової промисловості: [навч. посібн.] / М.В. Шавранський, Я.Р. Когуч, Р.М. Лещій, М.І. Когутяк. – Івано-Франківськ: Факел, 2006. - 258 с.
3. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. [Текст]: лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 64 с.
4. Семенцов Г.Н. Теорія автоматичного керування. Нелінійні та дискретні системи: [навч. посібн.] / Г.Н. Семенцов, І.І. Чигур. ІФНТУНГ, 2016. – 95 с.
5. Горбійчук М. І. Числові методи і моделювання на ЕОМ: [підручник] / Горбійчук М.І., Пістун Є.П. – Івано-Франківськ: «Факел», 2010. – 403 с.
6. Горбійчук М.І. Моделювання та ідентифікація процесу заглиблення свердловин / М.І. Горбійчук, В.Б. Кропивницька // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – №1(7). – С. 9-13.
7. Шавранський М.В. Оптимізація та оптимальне керування процесами нафтової та газової промисловості: [навч. посібн.] / М.В. Шавранський, Я.Р. Когуч, Р.М. Лещій, М.І. Когутяк. – Івано-Франківськ: Факел, 2006. - 258 с.
8. Семенцов Г. Н. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Регулятори: [навч. посібн.] / Г.Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 201 с.
9. Програмування у середовищі Matlab. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-mapreduce-hadoop.html>

					БР.АКП – 47.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		