

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОБРОВ ЄВГЕН ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.7.022.6

ДИ С Е Р Т А Ц І Я

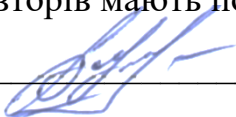
**Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння
свердловин в залізорудному кар'єрі**

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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



Є.Ю. Бобров

Науковий керівник – Моркун Володимир Станіславович, доктор технічних наук, професор

Кривий Ріг - 2026

АНОТАЦІЯ

Бобров Є.Ю. Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Криворізький національний університет МОН України, Кривий Ріг, 2026.

Представлена робота присвячена вирішенню наукової задачі розроблення принципів, структури та системи автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин на базі гібридної нейро-нечіткої моделі із застосуванням, в якості інформаційної бази, робочих параметрів бурової установки та визначених характеристичних ознак взаємодії бурового інструменту з гірською породою, що забезпечує формування та підтримання оптимальної швидкості проходки, мінімальну тривалість перехідних процесів та енергоефективність.

У *першому розділі* на основі проведеного аналізу вітчизняних та зарубіжних досліджень в області перспективних напрямків розвитку техніки і технологій гірничого виробництва виявлено значний потенціал для підвищення ефективності керування процесом буріння свердловин і покращення якості його моделювання та інформаційного забезпечення.

Сучасний розвиток гірничого виробництва опосередкований такими процесами, як цифровізація та впровадження комп'ютерно-інтегрованих кіберфізичних систем у традиційні геотехнології, а також в управління гірничодобувними підприємствами. Найважливішим елементом цього процесу є забезпечення отримання оперативної інформації про характеристики мінеральної сировини на всіх етапах її видобутку і переробки та формування ефективного автоматизованого керування технологічними операціями.

Виконано аналіз існуючих моделей процесу буріння, зокрема - швидкості проходки свердловин. Вдосконалення традиційних моделей та подальше їх корегування, використання гібридного підходу, що включає елементи нечіткої логіки та нейронні мережі для навчання моделей, додавання нових змінних, таких як, наприклад, параметри вібрації та питома енергія, використання нормалізаційних коефіцієнтів тощо, сприяє кращій відповідності між результатами моделювання та реальними значеннями.

Оцінка стану техніки і технології моніторингу процесу буріння свердловин дозволила констатувати, що визначення характеристичних ознак взаємодії бурового інструменту з гірською породою, можуть бути дуже корисним для оцінки її фізико-механічних властивостей і текстурно-структурних особливостей, які у теперішній час оперативно в процесі буріння не вимірюються.

Зроблено висновок, що існуючі системи автоматизованого керування процесом буріння не забезпечують якісне формування і підтримання оптимальної швидкості проходки свердловин, відповідно до поточних фізико-механічних характеристик та текстурно-структурних особливостей гірської породи, що буриться. Це негативно позначається на продуктивності та енергоефективності технологічного процесу буріння.

У другому розділі вирішено завдання розроблення гібридної моделі процесу буріння свердловин. Використана гібридна структура сприяє більш ефективній симуляції процесу шляхом поєднання інформації з різних джерел, таких як фізичні закони, емпіричні моделі, евристики та емпіричні дані.

Для полегшення параметричної ідентифікації моделі та покращення умов формування керуючих впливів використані три робочих режими ефективності буріння, пов'язані з реакцією швидкості проходки на зміну основних змінних процесу. Невизначеність стосовно якісної оперативної ідентифікації фази неефективного режиму буріння є недоліком відомих методів.

Виконано динамічне моделювання у середовищі Simscape Matlab/Simulink® основних функціональних складових бурової установки: блоку приводної

системи в надземній частині, блоку бурового інструменту в свердловинній частині та блоку руйнування гірської породи.

Для визначення складних нелінійних рухів, що виникають у процесі буріння, модель свердловинної частини бурової установки представлена у вигляді розподіленої сукупності зосереджених мас на валу, окремі частини якого можуть мати свої особливі характеристики: жорсткість на кручення, крутильна інерція, жорсткість на вигин, щільність, модуль зсуву, модуль Юнга, зовнішній та внутрішній діаметр.

За результатами виконаних досліджень математична модель процесу буріння свердловин, представлена у вигляді гібридної структури, аналітична частина, якої симулює силові, кінематичні та енергетичні залежності, а для формалізації функції взаємодії бурового долота з гірською породою використовується нейро-нечітка система, при цьому блок приводу бурової установки у наземній частині і блок руйнування гірської породи представлено у вигляді структур із зосередженими параметрами, а блок бурового інструменту в свердловинній частині – структурою з розподіленими параметрами.

Третій розділ присвячено формуванню інформаційної бази автоматизованого керування процесом буріння свердловин та визначенню характеристичних ознак взаємодії бурового інструменту з гірською породою.

Супутній віброакустичний сигнал, що виникає при бурінні свердловин і розповсюджується як у гірському масиві, так і у буровому інструменті, є інтегруючим джерелом інформації щодо характеру і режиму роботи бурової установки. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд, а в частотній області - його спектром. Часова характеристика процесу взаємодії бурового долота з гірською породою є періодичною, але несинусоїдальною, і тому містить гармоніки. Відмінною її ознакою є наявність фазового зв'язку, який створює когерентність між частотними діапазонами. Наявність гармонік та фазового зв'язку є показниками нелінійності енергоємної контактної взаємодії у процесі буріння.

Розроблений метод визначення характеристичних ознак взаємодії долота бурової установки з гірською породою в процесі буріння свердловин на основі вимірювання параметрів супутнього вібраційного сигналу, який відрізняється від відомих тим, що в процесі зміни робочого режиму приводу обертових частин бурової установки формують карту порядку в усьому діапазоні його обертів, визначають частоту високоамплітудної вібрації долота, що відповідає визначеному піковому порядку обертів на сформованій карті, на цій частоті вимірюють параметри та обчислюють середньоквадратичне значення амплітуди та гармонійне спотворення вібраційного сигналу бурового долота, що дозволяє за рахунок зменшення впливу збурюючих факторів підвищити якість оцінки фізико-механічних характеристик гірської породи, що буриться, та ідентифікувати неефективний робочий режим бурової установки.

В якості ще однієї інформативної характеристичної ознаки процесу буріння свердловин використана механічна питома енергія, тобто робота, виконувана для видобутку одиниці об'єму гірської породи.

У четвертому розділі викладено результати формування та апробації комп'ютерно-інтегрованої технології буріння свердловин.

Запропонована комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі, основними складовими, якої є синтез і навчання адаптивної нейро-нечіткої системи (ANFIS) для визначення та формування банку даних мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища під час буріння розвідувальних свердловин; синтез алгоритму і параметрів модельно-прогнозуючого керування буровою установкою; регулювання основних змінних та динамічна корекція параметрів систем бурової установки відповідно до застосованого алгоритму каскадного модельно-прогнозуючого керування в процесі буріння технологічних свердловин.

Для реалізації процедури розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди використовується адаптивна нейро-нечітка система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), оптимізована із застосуванням генетичного

алгоритму (GA). Для створення початкової популяції хромосом у генетичному алгоритмі використано метод нечіткої кластеризації Fuzzy C-means (FCM).

У наборі експериментальних даних, що використані для тренування та навчання запропонованої системи розпізнавання виділено 7 мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища. Відповідно до отриманих результатів зроблено висновок, що середня точність розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди із застосуванням алгоритму ANFIS становить 85,1%, а модифікованого ANFIS+GA, відповідно – 92,4%. Застосування попередньої кластеризації даних в алгоритмі ANFIS+GA за допомогою методу Fuzzy C-means покращує точність на 0,2-0,3% та зменшує час на отримання результатів на 7-8%.

За результатами комп'ютерного моделювання зроблено висновок щодо доцільності використання структури дворівневого керування буровою установкою, відповідно до якої на нижньому рівні застосовуються пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) контролери, а на верхньому – модельно-прогнозуючий контролер (МРС) для динамічного корегування заданих значень регульованих змінних контурів нижнього рівня.

Результати моделювання та експериментальних досліджень використані для налаштування системи автоматизованого керування (САК) дослідно-промисловою буровою установкою. Отримані результати свідчать про те, що застосування МРС контролера безпосередньо у контурі керування замість базової структури на основі ПІД контролерів зменшило час перехідних процесів в САК у середньому на 17 %, а використання каскадної схеми керування з МРК контролером на надзорному рівні - ще на 12-15% при величині перерегулювання, яке не перевищувала 1,2 значення ROP, визначеного оптимальним щодо отриманій оцінці мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Своєчасна оцінка фізико-механічних властивостей гірської породи та оперативне налаштування за допомогою МРК керування робочих режимів бурової установки дозволило зменшити її питоме енергоспоживання на 8-11%.

Розроблені в дисертації принципи, структура та системи автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин на базі гібридної нейро-нечіткої моделі апробовані у виробничих умовах та використовуються у навчальному процесі здобувачів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, здобувачів технічних спеціальностей Львівського національного університету імені Івана Франка, а також здобувачів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Криворізького національного університету.

Ключові слова: автоматизація, керування, система, буріння, свердловина, руда, каротаж, характеристики, моделювання, вібрація, вимірювання, енергія, ефективність, розпізнавання, оптимізація.

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

[1] Morkun, N., Bobrov, Y., & Hryshchenko, Y. (2025). *Improving the efficiency of iron ore mining and processing*. LAMBERT Academic Publishing.

[2] Моркун, В., Моркун, Н., Грищенко, С., Бобров, Є., & Грищенко, Я. (2025). *Підвищення ефективності процесів гірничого виробництва на основі комп'ютерно-інтегрованих технологій*. ФОП Вольф І.Є. Київ.

Статті в наукових періодичних виданнях, які входять до переліку міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science:

[3] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, Y. Y., & Haponenko, A. A. (2024). Modeling of drilling tool vibration in the process of drilling blast wells. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 12–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/012>.

[4] Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. (2024). Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 1–8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.

[5] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, E. Y., & Haponenko, I. A. (2025). Determination of the harmonic distortion value of vibroacoustic signals in the process of drilling operations. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 88–95. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/088>.

[6] Моркун, В.С., Моркун, Н.В., Бобров, Є.Ю., Грищенко, Я.О. (2026). Модельно-прогнозуюче керування процесом буріння свердловин. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 13-21.

Статті в наукових періодичних фахових виданнях категорії Б:

[7] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2023). Моделювання процесів гірничого виробництва із застосуванням характеристик акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії. *Вісник Криворізького національного університету*, 1(21), 78–86.

<https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-78-86>.

[8] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2023). Застосування нелінійних ультразвукових методів для визначення характеристик залізорудної сировини. *Гірничий вісник*, 1(57), 144–151.

[9] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Поркуян, О. В., Грищенко, С. М., Бобров, Є. Ю., & Грищенко, Я. О. (2024). Визначення параметрів вібрації бурової установки із використанням методу відстеження порядку обертових машин. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 5 (285), 50–58. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-50-58>.

[10] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Шашкіна, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). Методи аналізу вібрації та акустичної емісії бурової установки в процесі буріння свердловин. *Гірничий вісник*, 1(58), 144–153. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2024-1-112-144-153>.

[11] Моркун, В., Моркун, Н., Бобров, Є., & Грищенко, Я. (2025). Моделювання багатоконтурної системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин на основі ПД контролерів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 5 (291), 45–52.

<https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-45-52>.

[12] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Бобров, Є. Ю., & Грищенко, Я. О. (2025). Моделювання механізму взаємодії бурового долота з гірською породою. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 8 (294), 45–51. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-45-51>.

Список публікацій здобувача, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[13] Bobrov, Y. (2022). Energy-saving computer-integrated drilling technology. *5th International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources»*, p. 176-178. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing,

[14] Бобров, Є. Ю. (2023). Вібраційний аналіз процесу буріння свердловин. *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*, с. 240. Кривий Ріг, Криворізький національний університет.

[15] Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Моркун, В. С. (2023). Комп'ютерно-інтегровані технології контролю та керування буровими роботами у залізорудному кар'єрі. *XIII Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молоді вчені 2023 - від теорії до практики»*, с. 138–140. Дніпро, Журфонд.

[16] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Шашкіна, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). Частотно-часовий аналіз віброакустичного сигналу бурової установки в процесі буріння свердловин, с. 254. *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*, Кривий Ріг, Криворізький національний університет.

[17] Моркун, В. С., & Бобров, Є. Ю. (2025). Модельно-прогнозуюче керування буровою установкою. *XVIII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація» - 2025*, с. 444–445. Одеса, Одеський національний технологічний університет.

Список публікацій здобувача, які додатково відображають наукові результати дисертації:

- [18] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Тронь, В. В., Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Гапоненко, І. А. (2023). *Підвищення ефективності процесів гірничого виробництва на основі ультразвукових технологій*. Видавництво Сінельніков Д.А., Кривий Ріг.
- [19] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Shashkina, A. A., & Bobrov, E. Y. (2024). General principles of formalization of technological process control of mining production in a dynamic distributed system. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 4, 210–221. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-4-20>.
- [20] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Касаткіна І. В. (2022). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві із феромагнітних порід* (Патент України № 151805). Державна служба інтелектуальної власності України.
- [21] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Веснін, А. В. (2022). *Спосіб визначення характеристик феромагнітних гірських порід в процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 151807). Державна служба інтелектуальної власності України.
- [22] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Грищенко С. М. (2022). *Спосіб автоматичного контролю характеристик феромагнітних гірських порід в процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 151844). Державна служба інтелектуальної власності України.
- [23] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., & Бобров, Є. Ю. (2022). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві* (Патент України № 151846). Державна служба інтелектуальної власності України.
- [24] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Сулима Т. С. (2022). *Спосіб керування процесом буріння*

свердловин в гірському масиві з феромагнітних порід (Патент України № 151847). Державна служба інтелектуальної власності України.

[25] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). *Спосіб визначення характеристик феромагнітних гірських порід у процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 156662). Державна служба інтелектуальної власності України.

[26] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Грищенко, С. М., Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Гапоненко І. А. (2024). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві з феромагнітних порід* (Патент України № 156663). Державна служба інтелектуальної власності України.

[27] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., & Бобров, Є. Ю. (2025). *Спосіб визначення характеристик гірських порід в процесі буріння свердловин в гірському масиві* (Патент України № 158801). Державна служба інтелектуальної власності України.

[28] Моркун, В. С., Моркун, Н. В., & Бобров, Є. Ю. (2025). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві* (Патент України № 158802). Державна служба інтелектуальної власності України.

ABSTRACT

Bobrov E.Y. Automated energy-saving control of the drilling process in an iron ore quarry. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 151 Automation and Computer-Integrated Technologies. - Kryvyi Rih National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2026.

This work is devoted to solving the scientific problem of developing the principles, structure and system of automated model-predictive control of the well drilling process based on a hybrid neuro-fuzzy model using, as an information base, the operating parameters of the drilling rig and certain characteristic features of the interaction of the drilling tool with the rock, which ensures the formation and maintenance of optimal drilling speed, minimum duration of transition processes and energy efficiency.

In *the first chapter*, based on an analysis of domestic and foreign research in the field of promising directions for the development of mining technology and techniques, significant potential has been identified for improving the efficiency of well drilling process control and improving the quality of its modelling and information support.

The modern development of mining is mediated by processes such as digitalisation and the introduction of computer-integrated cyber-physical systems into traditional geotechnologies, as well as into the management of mining enterprises. The most important element of this process is ensuring the receipt of operational information about the characteristics of mineral raw materials at all stages of its extraction and processing and the formation of effective automated control of technological operations.

An analysis of existing drilling process models, in particular well drilling rates, has been carried out. The improvement of traditional models and their further adjustment, the use of a hybrid approach that includes elements of fuzzy logic and neural networks for model training, the addition of new variables, such as for

example, vibration parameters and specific energy, the use of normalisation coefficients, etc., contributes to a better correspondence between the simulation results and the actual values.

Assessment of the state of the art and technology for monitoring the drilling process has shown that determining the characteristic features of the interaction of the drilling tool with the rock can be very useful for assessing its physical and mechanical properties and textural and structural features, which are currently not measured in real time during the drilling process.

It was concluded that existing automated drilling control systems do not ensure the high-quality formation and maintenance of the optimal drilling speed in accordance with the current physical and mechanical characteristics and textural and structural features of the rock being drilled. This negatively affects the productivity and energy efficiency of the drilling process.

The second chapter addresses the task of developing a hybrid model of the well drilling process. The hybrid structure used facilitates more effective simulation of the process by combining information from various sources, such as physical laws, empirical models, heuristics, and empirical data.

To facilitate parametric identification of the model and improve the conditions for forming control influences, three operating modes of drilling efficiency are used, related to the response of the drilling rate to changes in the main variables of the process. Uncertainty regarding the qualitative operational identification of the inefficient drilling mode phase is a disadvantage of known methods.

Dynamic modelling was performed in the Simscape Matlab/Simulink[®] environment of the main functional components of the drilling rig: the drive system unit in the above-ground part, the drilling tool unit in the well part, and the rock destruction unit.

To determine the complex nonlinear movements that occur during drilling, the model of the well part of the drilling rig is presented as a distributed set of concentrated masses on the shaft, individual parts of which may have their own

specific characteristics: torsional stiffness, torsional inertia, bending stiffness, density, shear modulus, Young's modulus, outer and inner diameter.

Based on the results of the research, the mathematical model of the well drilling process is presented as a hybrid structure, the analytical part of which simulates force, kinematic and energy dependencies, and a neuro-fuzzy system is used to formalise the interaction function of the drill bit with the rock, where the drive unit of the drilling rig in the ground part and the rock destruction unit are represented as structures with concentrated parameters, and the drilling tool unit in the well part is represented as a structure with distributed parameters.

The third section is devoted to the formation of an information base for automated control of the well drilling process and the determination of characteristic features of the interaction of the drilling tool with the rock.

The accompanying vibroacoustic signal, which arises during well drilling and propagates both in the rock mass and in the drilling tool, is an integrating source of information about the nature and operating mode of the drilling rig. This signal is clearly represented in the time domain by the behaviour of its amplitudes, and in the frequency domain by its spectrum. The time characteristic of the interaction process between the drill bit and the rock is periodic but non-sinusoidal, and therefore contains harmonics. Its distinctive feature is the presence of a phase relationship that creates coherence between frequency ranges. The presence of harmonics and phase relationship are indicators of the non-linearity of energy-intensive contact interaction during the drilling process.

The developed method for determining the characteristic features of the interaction between the drill bit of a drilling rig and rock during well drilling is based on measuring the parameters of the accompanying vibration signal, which differs from the known ones in that during the process of changing the operating mode of the drive of the rotating parts of the drilling rig, a map of the order is formed across the entire range of its revolutions, the frequency of high-amplitude vibration of the bit corresponding to the specified peak order of revolutions on the formed map is determined, at this frequency, the parameters are measured and the root mean square

value of the amplitude and harmonic distortion of the vibration signal of the drill bit are calculated, which allows, by reducing the influence of disturbing factors, to improve the quality of the assessment of the physical and mechanical characteristics of the rock being drilled, and identify the inefficient operating mode of the drilling rig.

Another informative characteristic of the well drilling process is mechanical specific energy, i.e. the work performed to extract a unit volume of rock.

The fourth chapter presents the results of the development and testing of computer-integrated well drilling technology.

The proposed computer-integrated technology for drilling operations in an iron ore quarry the main components of which are the synthesis and training of an adaptive neuro-fuzzy system (ANFIS) to determine and form a database of mineralogical varieties of iron ore in the studied deposit during the drilling of exploratory wells; the synthesis of the algorithm and parameters of model-predictive control of the drilling rig; regulation of the main variables and dynamic correction of the parameters of the drilling rig systems in accordance with the applied algorithm of cascade model-predictive control in the process of drilling technological wells.

To implement the procedure for recognising mineralogical varieties of iron ore, an adaptive neuro-fuzzy system ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) is used, optimised with the application of a genetic algorithm (GA). The Fuzzy C-means (FCM) fuzzy clustering method is used to create the initial chromosome population in the genetic algorithm.

In the set of experimental data used for training and learning the proposed recognition system, 7 mineralogical varieties of iron ore of the studied deposit were identified. Based on the results obtained, it was concluded that the average recognition accuracy of mineralogical varieties of iron ore using the ANFIS algorithm is 85.1%, and using the modified ANFIS+GA algorithm, 92.4%. The use of preliminary data clustering in the ANFIS+GA algorithm using the Fuzzy C-means method improves accuracy by 0.2-0.3% and reduces the time to obtain results by 7-8%.

Based on the results of computer modelling, it was concluded that it is advisable to use a two-level control structure for the drilling rig, according to which proportional-integral-derivative (PID) controllers are used at the lower level, and at the upper level, a model predictive controller (MPC) is used for dynamic adjustment of the set values of the controlled variables of the lower-level circuits.

The results of modelling and experimental research were used to configure the automated control system (ACS) of a pilot industrial drilling rig. The results obtained indicate that the use of an MPC controller directly in the control loop instead of a basic structure based on PID controllers reduced the transition time in the ACS by an average of 17%, and the use of a cascade control scheme with an MRK controller at the supervisory level reduced it by another 12-15% with an overshoot value that did not exceed 1.2 times the ROP value determined to be optimal based on the obtained assessment of the mineralogical and technological varieties of iron ore. Timely assessment of the physical and mechanical properties of rock and operational adjustment of the drilling rig's operating modes using the MRK control system made it possible to reduce its specific energy consumption by 8-11%.

The principles, structure and systems of automated model-predictive control of the well drilling process based on a hybrid neuro-fuzzy model developed in the dissertation have been approved in production conditions and are used in the educational process of students majoring in "Automation and Computer-Integrated Technologies" at the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, as well as by students of technical specialties at the Ivan Franko National University of Lviv, and are used in the educational process of students majoring in "Automation and Computer-Integrated Technologies" at the Kryvyi Rih National University.

Keywords: automation, control, system, drilling, borehole, ore, logging, characteristics, modelling, vibration, measurement, energy, efficiency, recognition, optimisation.

List of publications presenting the main scientific results of the dissertation

Monographs:

[1] Morkun, N., Bobrov, Y., & Hryshchenko Y. (2025). *Improving the efficiency of iron ore mining and processing*. LAMBERT Academic Publishing.

[2] Morkun, V., Morkun, N., Hryshchenko, S., Bobrov, Y., & Hryshchenko, Y. (2025). *Improving the efficiency of mining processes based on computer-integrated technologies*. FOP Wolf I.E. Kyiv.

Articles in scientific periodicals included in the list of international scientometric databases Scopus and Web of Science:

[3] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, Y. Y., & Haponenko, A. A. (2024). Modeling of drilling tool vibration in the process of drilling blast wells. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 12–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/012>.

[4] Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. (2024). Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 1–8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.

[5] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, E. Y., & Haponenko, I. A. (2025). Determination of the harmonic distortion value of vibroacoustic signals in the process of drilling operations. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 2, 88–95. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/088>.

[6] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Bobrov, E. Yu., & Hryshchenko, Ya. O. (2026). Model-based predictive control of the well drilling process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 13-21.

Articles in scientific periodicals of category B:

[7] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Haponenko, A. A., & Bobrov, E. Yu. (2023). Modelling of mining processes using the characteristics of acoustic emission of energy-intensive contact interaction. *Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 1(21), 78-86. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-78-86>

[8] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Haponenko, A. A., & Bobrov, E. Yu. (2023). Application of nonlinear ultrasonic methods for determining the characteristics of iron ore raw materials. *Mining Bulletin*, 1(57), 144-151.

- [9] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Porkuyan, O. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, Ye. Yu., & Hryshchenko, Ya. O. (2024). Determination of the vibration parameters of a drilling rig using the method of tracking the order of rotating machines. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 5(285), 50-58. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-50-58>.
- [10] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Shashkina, A. A., & Bobrov, E. Yu. (2024). Methods for analysing vibration and acoustic emission of a drilling rig during well drilling. *Mining Herald*, 1(58), 144–153. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2024-1-112-144-153>
- [11] Morkun, V., Morkun, N., Bobrov, E., & Hryshchenko, Ya. (2025). Modelling of a multi-loop automated control system for the well drilling process based on PID controllers. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 5(291), 45–52. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-45-52>
- [12] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Bobrov, E. Yu., & Hryshchenko, Ya. O. (2025). Modelling the mechanism of interaction between a drill bit and rock. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 8 (294), c. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-45-51>.

Publications confirming the approval of the dissertation materials

- [13] Bobrov, Y. (2022). Energy-saving computer-integrated drilling technology. *5th International Scientific and Technical Internet Conference "Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources"*, p.176–178. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing.
- [14] Bobrov, Y. Y. (2023). Vibration analysis of the well drilling process. *International Scientific and Technical Conference "Development of Industry and Society"*, p. 240. Kryvyi Rih, Kryvyi Rih National University.
- [15] Bobrov, E. Yu., Haponenko, A. A., & Morkun, V. S. (2023). Computer-integrated technologies for monitoring and controlling drilling operations in an iron ore quarry. *XIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Higher Education Students and Young Scientists "Young Scientists 2023 - From Theory to Practice"*, p. 138–140. Dnipro, Zhurfond.

[16] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Shashkina, A. A., & Bobrov, E. Yu. (2024). Frequency-time analysis of the vibroacoustic signal of a drilling rig during the drilling of wells. *International Scientific and Technical Conference я "Development of Industry and Society"*, p. 254. Kryvyi Rih, Kryvyi Rih National University.

[17] Morkun, V. S., & Bobrov, E. Yu. (2025). Model-predictive control of a drilling rig. *XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Automation" – 2025*, p. 444–445. Odessa, Odessa National Technological University.

List of publications that additionally reflect the scientific results of the dissertation

[18] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Tron, V. V., Bobrov, E. Yu., Haponenko, A. A., & Haponenko, I. A. (2023). *Improving the efficiency of mining processes based on ultrasonic technologies*. Published by Sienelnikov D.A., Kryvyi Rih.

[19] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Shashkina, A. A., & Bobrov, E. Y. (2024). General principles of formalisation of technological process control of mining production in a dynamic distributed system. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 4, 210–221. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-4-20>

[20] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Haponenko, A. A., Haponenko, I. A., Bobrov, E. Yu., & Kasatkina, I. V. (2022). *Method for controlling the process of drilling wells in a mountain massif of ferromagnetic rocks* (Ukrainian patent No. 151805). State Intellectual Property Service of Ukraine.

[21] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Haponenko, A. A., Haponenko, I. A., Bobrov, E. Yu., & Vesnin, A. V. (2022). *Method for determining the characteristics of ferromagnetic rocks during the drilling of wells in a mountain massif* (Ukrainian patent No. 151807). State Intellectual Property Service of Ukraine.

[22] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Haponenko, A. A., Haponenko, I. A., Bobrov, E. Yu., & Hryshchenko, S. M. (2022). *Method for automatic control of ferromagnetic rock characteristics during drilling of wells in mountainous terrain* (Ukrainian patent No. 151844). State Intellectual Property Service of Ukraine.

- [23] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Haponenko, A. A., Haponenko, I. A., & Bobrov, E. Yu. (2022). *Method for controlling the process of drilling wells in a mountain massif* (Ukrainian patent No. 151846). State Intellectual Property Service of Ukraine.
- [24] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Haponenko, A. A., Haponenko, I. A., Bobrov, E. Yu., & Sulima T. S. (2022). *Method for controlling the process of drilling wells in a mountain massif of ferromagnetic rocks* (Ukrainian patent No. 151847). State Intellectual Property Service of Ukraine.
- [25] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Haponenko, A. A., & Bobrov, E. Yu. (2024). *Method for determining the characteristics of ferromagnetic rocks during the drilling of wells in a mountain massif* (Ukrainian patent No. 156662). State Intellectual Property Service of Ukraine.
- [26] Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, Ye. Yu., Haponenko, A. A., & Haponenko, I. A. (2024). *Method for controlling the process of drilling wells in a mountain massif of ferromagnetic rocks* (Patent of Ukraine No. 156663). State Intellectual Property Service of Ukraine.
- [27] Morkun, V. S., Morkun, N. V., & Bobrov, E. Yu. (2025). *Method for determining the characteristics of rock formations during the drilling of wells in rock formations* (Ukrainian patent No. 158801). State Intellectual Property Service of Ukraine.
- [28] Morkun, V. S., Morkun, N. V., & Bobrov, E. Yu. (2025). *Method for controlling the process of drilling wells in a mountain massif* (Ukrainian patent No. 158802). State Intellectual Property Service of Ukraine.

ЗМІСТ

Вступ.....	24
Розділ 1. Аналіз проблеми та шляхи підвищення ефективності гірничого виробництва.....	33
1.1. Комп'ютерно-інтегровані цифрові технології - інструмент переходу гірничої галузі на платформу Mining 4.0.....	33
1.2. Аналіз існуючих моделей процесу буріння свердловин.....	41
1.2.1. Прогнозування швидкості проходки свердловин на основі фізичних моделей.....	41
1.2.2. Моделі швидкості проходки свердловин на основі експериментальних даних.....	43
1.2.3. Мульти модельний підхід.....	45
1.3. Техніка і технології моніторингу процесу буріння свердловин.....	48
1.4. Методи автоматизованого керування та оптимізації процесу буріння свердловин.....	56
1.5. Висновки до розділу 1	63
Розділ 2. Моделювання процесу буріння свердловин.....	67
2.1. Принципи побудови та структура гібридної моделі процесу буріння свердловин.....	67
2.2. Визначення основних змінних та робочих режимів процесу буріння свердловин.....	75
2.3. Моделювання головних функціональних складових бурової установк...82	
2.3.1. Моделювання приводної системи бурової установки.....	85
2.3.2. Моделювання руху свердловинної частини бурової установки.....	90
2.3.3. Моделювання впливу динаміки бурового долота на рух функціональних складових бурової установки.....	97
2.4. Висновки до розділу 2	107
Розділ 3. Формування інформаційної бази автоматизованого керування процесом буріння свердловин.....	109
3.1. Вібращії бурового інструменту – джерело характеристикних ознак	

процесу його взаємодії з гірською породою.....	109
3.2. Визначення параметрів вібрації бурового долота із застосуванням методу відстеження порядку.....	117
3.3. Буріння свердловин, як процес енергоємної контактної взаємодії.....	124
3.4. Кількісна оцінка нелінійності взаємодії бурового долота з гірською породою в процесі буріння свердловин.....	135
3.5. Висновки до розділу 3.....	143
Розділ 4. Формування та апробація комп'ютерно-інтегрованої технології буріння свердловин.....	145
4.1. Загальна структура комп'ютерно-інтегрованої технології буріння свердловин у залізорудному кар'єрі.....	145
4.2. Адаптивний нейро-нечіткий класифікатор характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди, оптимізований із застосуванням генетичного алгоритму.....	148
4.2.1 Структура інтелектуальної системи розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди.....	150
4.2.3. Визначення мінералогічних різновидів залізної руди із застосуванням вимірюваних параметрів бурової установки.....	159
4.3. Система автоматизованого керування процесом буріння свердловин.....	169
4.3.1. Базова структура регулювання взаємопов'язаних змінних процесу буріння свердловин.....	169
4.3.2. Система автоматизованого керування з МРС контролером для безпосереднього керування процесом буріння свердловин.....	178
4.3.3. Система каскадного керування процесом буріння свердловин з МРК контролером на надзорному рівні.....	185
4.4. Висновки до розділу 4	192
Висновки	196
Список використаних джерел	201
Додаток А	226

Додаток Б	228
Додаток В	230
Додаток Г	232
Додаток Д	233
Додаток Е	234
Додаток Ж	236

ВСТУП

Обґрунтування напряму досліджень. В Україні розвідано понад 80 родовищ залізорудної сировини. Балансові запаси залізної руди в країні становлять понад 30 млрд. т, що забезпечить роботу гірничометалургійних підприємств ще приблизно на 95-100 років. Основні запаси - 70 % і видобуток - більше, ніж 80 %, припадають на Криворізький залізорудний басейн. З десяти найбільших гірничо-видобувних та гірничо-переробних підприємств залізорудної промисловості України - сім розташовані у Криворізькому регіоні. Ці підприємства забезпечують понад 90 % потреб металургійних підприємств України у залізорудній сировині.

Найважливішою ланкою на початковому етапі видобутку залізорудної сировини є буровибухові роботи, які потребують буріння розвідувальних та експлуатаційних свердловин. Понад 25–35 % витрат на видобуток руди припадає на буріння. Оскільки від ефективності цього етапу залежать якісні та кількісні параметри всього виробничого циклу підготовки сировини для металургійного переділу, актуальною є задача оптимізації керування процесом буріння свердловин в умовах змінних характеристик геологічної структури рудного покладу та стану бурового обладнання.

Існуючі системи автоматизованого керування процесом буріння, внаслідок застарілих методів ідентифікації та моделювання нелінійних динамічних об'єктів керування, засобів інформаційного забезпечення, що використовуються при їх розробці та експлуатації, не забезпечують якісного формування та підтримки оптимальної швидкості проходки свердловин.

Вирішення цієї задачі потребує відповідного математичного апарату, який би дозволив здійснити формалізацію залежності між параметрами процесу буріння та характеристиками залізорудної гірської породи. В свою чергу це потребує удосконалення математичних та імітаційних моделей процесів, що протікають у буровій установці та методів оперативного вимірювання і аналізу їх параметрів. Перспективним напрямком є використання гібридних нейро-

нечітких моделей, що навчаються, та їх застосування при формуванні автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом.

Однак ефективність такого підходу залежить від якості інформаційної бази, що при цьому використовується. Найбільш поширені непрямі вимірювання основних змінних процесу буріння мають притаманну похибку до 30%, залежно, головним чином, від конструкції бурової установки та розташування сенсорів. Враховуючи складність мінералогічних та текстурно-структурних особливостей покладів залізної руди серйозною проблемою є отримання оперативної достовірної інформації про їх характеристики, що відображають стан досліджуваного середовища для практичного використання.

Таким чином, наукова задача дисертаційної роботи полягає у розробці принципів, структури та системи автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин на базі гібридної нейро-нечіткої моделі із застосуванням, в якості інформаційної бази, робочих параметрів бурової установки та визначених характеристичних ознак взаємодії бурового інструменту з гірською породою, що забезпечує формування та підтримання оптимальної швидкості проходки, мінімальну тривалість перехідних процесів та енергоефективність.

Зв'язок роботи з науковими програмами та планами. Робота виконана у Криворізькому національному університеті та є складовою держбюджетних НДР № 30-117-24 «Ресурсозберігаючий неруйнівний оперативний контроль та енергоефективне розподілене керування рудопотоками гірничозбагачувального комбінату» (номер держреєстрації 0124U000610) та НДР № 30-119-24 «Визначення закономірностей електромагнітного ультразвукового та вихрострумового перетворень у залізорудній сировині для розпізнавання її мінералогічних різновидів» (номер держреєстрації 0124U000714). Робота спрямована на реалізацію напряму наукових досліджень «Інноваційні технології збереження та збалансованого використання природних (мінерально-сировинних, земельних, ґрунтових, водних та біотичних) ресурсів» відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 476 від 30.04.2024 «Про

затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні».

Мета та завдання дослідження. Метою виконаних досліджень є підвищення ефективності та якості автоматизованого керування процесом буріння свердловин на основі комп'ютерно-інтегрованої технології, що забезпечує формування та підтримання оптимальної швидкості проходки в умовах змінних фізико-механічних властивостей та текстурно-структурних особливостей заліззовмісних руд родовища, що розробляється.

Сформульована мета дисертаційної роботи зумовила необхідність вирішення таких завдань:

- виконати аналіз наукових джерел для визначення шляхів підвищення ефективності керування процесом буріння свердловин і покращення якості його моделювання та інформаційного забезпечення;
- розробити гібридну модель процесу буріння свердловин, аналітична частина якої симулює динаміку основних функціональних складових бурової установки, а нейро-нечітка структура використовується для визначення важкоформалізованої функції взаємодії «бурове долото - гірська порода»;
- розробити метод виділення інформативної складової взаємодії бурового долота з гірською породою в процесі буріння свердловин із супутнього вібраційного сигналу та обґрунтувати метод оперативної ідентифікації неефективності робочого режиму бурової установки на основі її спектрального аналізу;
- визначити характеристичні ознаки взаємодії бурового інструменту з гірської породою з використанням вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки, а також часових і спектральних характеристик вібрації долота та розробити метод розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин, заснований на аналізі характеристичних параметрів у векторному просторі ознак із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої структури;

- розробити автоматизовану дворівневу систему керування буровою установкою, нижній рівень якої утворюють замкнуті контури пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання основних змінних, а на верхньому рівні використовується модельно-прогнозуюче керування для динамічного корегування їх заданих значень;

- розробити комп'ютерно-інтегровану технологію бурових робіт в залізорудному кар'єрі, що включає буріння розвідувальних та технологічних (вибухових) свердловин та забезпечує формування і підтримання оптимальної швидкості проходки шляхом модельно-прогнозуючого формування регулюючих дій та оперативного визначення основних мінералогічних різновидів залізної руди у родовищі.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого керування бурінням свердловин при видобутку залізорудної сировини в умовах змінних характеристик геологічної структури рудного покладу та стану бурового обладнання.

Предметом дослідження є принципи, закономірності, методи та моделі, енергоефективного модельно-прогнозуючого керування бурінням свердловин, як нелінійним динамічним об'єктом за умов неповного і нечіткого інформаційного забезпечення.

Методи дослідження:

- аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду, систематизація існуючих підходів та методів щодо автоматизованого керування процесом буріння свердловин за критеріями якості та енергоефективності для обґрунтування актуальності, мети та завдань дослідження;

- елементи математичного апарату нейронних мереж та нечіткої логіки для підвищення ефективності моделювання важкоформалізованої функції взаємодії бурового долота з гірською породою та розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди в умовах неповної та нечіткої інформації про об'єкт;

- методи аналітичного та чисельного моделювання для синтезу та аналізу математичної моделі бурової установки та системи керування процесом буріння;
- методи оптимального керування для обґрунтування умов динамічної корекції регулюючих структур;
- комп'ютерні інформаційні та програмні технології для реалізації методу розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди та алгоритму модельно-прогнозуючого керування у вигляді програмного забезпечення.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено математичну модель процесу буріння свердловин, яка включає блок приводу бурової установки у наземній частині, блок бурового інструменту у свердловинній частині та блок руйнування гірської породи, шляхом подання її у вигляді гібридної структури, аналітична частина, якої включає динамічні субмоделі робочих режимів і симулює силові, кінематичні та енергетичні залежності, а для формалізації функції взаємодії бурового долота з гірською породою використовується нейро-нечітка система, при цьому блок приводу бурової установки і блок руйнування гірської породи представлено у вигляді структур із зосередженими параметрами, а блок бурового інструменту у свердловинній частині – структурою з розподіленими параметрами, що дозволило підвищити точність та надійність прогнозування результатів буріння в умовах змінних характеристик руди та стану технологічного обладнання, а також якість управління технологічним процесом та його енергоефективність.

2. Вперше розроблений метод визначення характеристичних ознак взаємодії долота бурової установки з гірською породою в процесі буріння свердловин на основі вимірювання параметрів супутнього вібраційного сигналу, який відрізняється від відомих тим, що в процесі зміни робочого режиму приводу обертових частин бурової установки формують карту порядку в усьому діапазоні його обертів, визначають частоту високоамплітудної вібрації долота, що відповідає визначеному піковому порядку обертів на сформованій карті, на цій частоті вимірюють параметри та обчислюють середньоквадратичне значення

амплітуди та гармонійне спотворення вібраційного сигналу бурового долота, що дозволяє за рахунок зменшення впливу збурюючих факторів підвищити якість оцінки фізико-механічних характеристик гірських порід та визначити робочі режими процесу буріння.

3. Удосконалено ітераційний метод оперативного розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин, заснований на аналізі характеристичних параметрів у векторному просторі ознак, в якості яких використані результати вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки, а саме швидкості проходки, навантаження на долото та швидкості його обертання, продуктивності системи очищення свердловин від шламу, споживаної питомої механічної енергії, середньоквадратичного значення амплітуди та гармонійного спотворення сигналу вібрації долота, а для реалізації процедури розпізнавання застосовується адаптивна нейро-нечітка система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), оптимізована із застосуванням генетичного алгоритму (GA) з попередньою кластеризацією ознак методом нечітких середніх (Fuzzy C-means), що дозволяє шляхом мінімізації суми зважених відстаней між аналізованими та зразковими результатами вимірювань характеристичних параметрів віднести предмет розпізнавання до основних мінералогічних різновидів залізної руди експлуатованого родовища з похибкою 7-9%.

4. Удосконалено автоматизовану систему керування буровою установкою шляхом використання в її структурі двох рівнів, з яких нижній представлено замкнутими контурами пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання навантаження на долото, швидкості його обертання та продуктивності системи очищення свердловини, а на верхньому рівні використовується модельно-прогнозуюче керування для динамічного корегування заданих значень зазначених регульованих змінних, величина яких визначається оперативними оцінками мінералого-технологічних різновидів руди, що дозволяє зменшити час перехідних процесів в системі у середньому на 12-15% та понизити питоме енергоспоживання на 8-11%.

Наукове значення роботи полягає у розвитку принципів енергоефективного модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин у залізорудному кар'єрі в умовах неповної та нечіткої інформації про стан об'єкта на базі гібридної його моделі з урахуванням виявлених закономірностей процесу взаємодії бурового інструменту з гірською породою.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі виконаних теоретичних досліджень реалізована комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт та автоматизована система керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі. При цьому запропоновані науково-технічні рішення надають можливість покращити якість керування буровою установкою та зменшити її енергоспоживання.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів підтверджується тим, що в роботі використовуються апробовані фундаментальні положення теорії модельно-прогнозуючого керування, математичної теорії нечіткої логіки, нейронних мереж та фізики коливань, а також задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень, позитивними результатами апробації розроблених способів та засобів, наприклад, використання запропонованих підходів в умовах впливу перешкод та збурень дозволяє зменшити тривалість перехідних процесів у замкнутій системі керування у середньому на 12-15%.

Дослідження, викладені в дисертації, дозволяють практично реалізувати на програмно-технічному рівні алгоритми: побудови гібридних моделей для керування нелінійними динамічними об'єктами в умовах неповної та нечіткої інформації; завадозахищеного виділення характеристичних ознак енергоємної контактної взаємодії із супутнього вібраційного сигналу; оперативного розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища в процесі буріння свердловин; ієрархічного модельно-прогнозуючого керування на основі гібридних моделей.

Запропоновані технічні й алгоритмічні рішення апробовані при виконанні бурових робіт із застосуванням дослідно-промислової установки ТОВ

«ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО» (м. Полтава) та у виробничому процесі ТОВ «МЕТБЛАСТ» (м. Кривий Ріг).

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Криворізького національного університету, Львівського національного університету ім. Івана Франка та Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.

Особистий внесок здобувача. Усі сформульовані у дисертації ідеї, задачі, наукові положення та висновки є результатом особистих досліджень автора. Здобувачем самостійно здійснено; [1],[6]- аналіз стану автоматизації; [9],[12]- удосконалено математичну модель процесу буріння свердловин, яка включає блок приводу бурової установки, блок бурового інструменту у свердловинній частині та блок руйнування гірської породи, шляхом подання її у вигляді гібридної структури; [2],[14],[23]- розроблено метод визначення характеристик взаємодії долота бурової установки з гірською породою в процесі буріння свердловин та метод ідентифікації режиму неефективного буріння на основі вимірювання параметрів супутнього вібраційного сигналу бурового інструменту; [3],[8],[27]- удосконалено ітераційний метод розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин, заснований на аналізі характеристичних параметрів у векторному просторі ознак, в якості яких використані результати вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки та параметрів сигналу вібрації долота; [8], [11]- удосконалено систему автоматизованого керування буровою установкою шляхом подання її у вигляді дворівневої структури із використанням модельно-прогнозуючого контролера на надзорному рівні; [7],[15],[17]- розроблена комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі, що забезпечує формування і підтримання оптимальної швидкості проходки розвідувальних і технологічних свердловин та формування банку даних мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища та їх ознак.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на засіданнях наукового семінару кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету (Кривий Ріг, 2023-2026 рр.), на міжнародній науково-технічній конференції «Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources» (Petroșani, Romania, 2022), на міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток гірничо-металургійної промисловості» (м. Кривий Ріг, 2023, 2024, 2026 рр.), на XIII Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молоді вчені 2023 - від теорії до практики» (м. Дніпро, 2023 р.), на XVIII міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація - 2025» (м. Одеса, 2025).

Публікації. Основні положення та результати дисертації знайшли відображення в 2 монографіях, 4 статтях у періодичних наукових журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus, 6 статтях у наукових фахових виданнях та 5 матеріалах конференцій. Додатково наукові результати дисертації відображено у монографії, статті у науковому періодичному журналі, що індексується у наукометричній базі Web of Science та 9 патентах України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 216 найменувань на 24 сторінках, 7 додатків на 11 сторінках. Загальний обсяг дисертації викладено на 223 сторінках друкованого тексту, з яких 159 - основний текст, містить 72 рисунки та 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1. Комп'ютерно-інтегровані цифрові технології - інструмент переходу гірничої галузі на платформу Mining 4.0

Гірничодобувна промисловість розвивається у напрямі технологічної оптимізації та інформаційної цифровізації. Розробка та просування інноваційних комп'ютерно-інтегрованих технологій необхідні для того, щоб гірниче виробництво було рентабельним, щоб інформація могла повертатися у процес для постійного його покращення. Інструменти моніторингу, вимірювальні технології та обчислювальні інструменти тепер можуть сформувати банк корисної інформації, яка раніше була лише предметом припущень.

Нині гірничодобувна галузь переживає одночасно два етапи технологічної трансформації – перехід на платформу Mining 4.0 із формуванням платформи майбутнього – Mining 5.0 (табл. 1.1) [1-3]. Обидві ці платформи пов'язані з переходом від IV до V промислової революції. Завдяки цьому наскрізні технології, такі як штучний інтелект, Інтернет речей та коботи (колаборативні роботи), змінили глобальну тенденцію технологічного розвитку галузі (рис. 1.1) [1].

Визначальний компонент Mining 4.0 пов'язаний з комп'ютерно-інтегрованими (CIS) та людино-кіберфізичними системами (HCPS) [4], які в даний час активно розвиваються в галузі від HPS (людино-фізичних систем) до HPS 2.0 [5]. Друге покоління подібних систем, на базі яких формуватиметься Mining 5.0, має перетворити нинішніх операторів частково роботизованих пристроїв на операторів інтелектуальних машин, тим самим звільнивши себе не тільки від ручної, а й інтелектуальної праці, перейшовши до суто інженерної креативної праці.

Табл. 1.1. Основні технологічні інновації Mining 5.0 у порівнянні з Mining 3.0,4.0 [3]

Етапи технологічної трансформації	Загальна характеристика етапу	Основні технологічні інновації	Конкретні інновації у гірничодобувній промисловості
Mining 3.0 1970–1990-ті роки	Роботизація окремих процесів	Автоматизація, аналогові обчислення та системи керування	Високопродуктивне обладнання, аналогова телеметрія
Mining 4.0 2000-і – теперішній час	Заміна людського інтелекту на «штучний» у низці напрямків	Глибока цифровізація, Інтернет речей, штучний інтелект, конвергентні технології	Безпілотні технології, дистанційне керування процесами, цифрове моделювання
Mining 5.0 2050-і (розрахунковий час розширення)	Синергія між людьми і автономними машинами	Штучний інтелект як основний засіб виробництва, Інтернет, кіберфізичні системи, інтелектуальний аналіз даних, роботи, повсюдна доповнена реальність	Безпілотний майнінг за допомогою колаборативних роботів, блокчейн у контролі та управлінні, постмайнінг, ESG, цифрові підлітки, машинне навчання

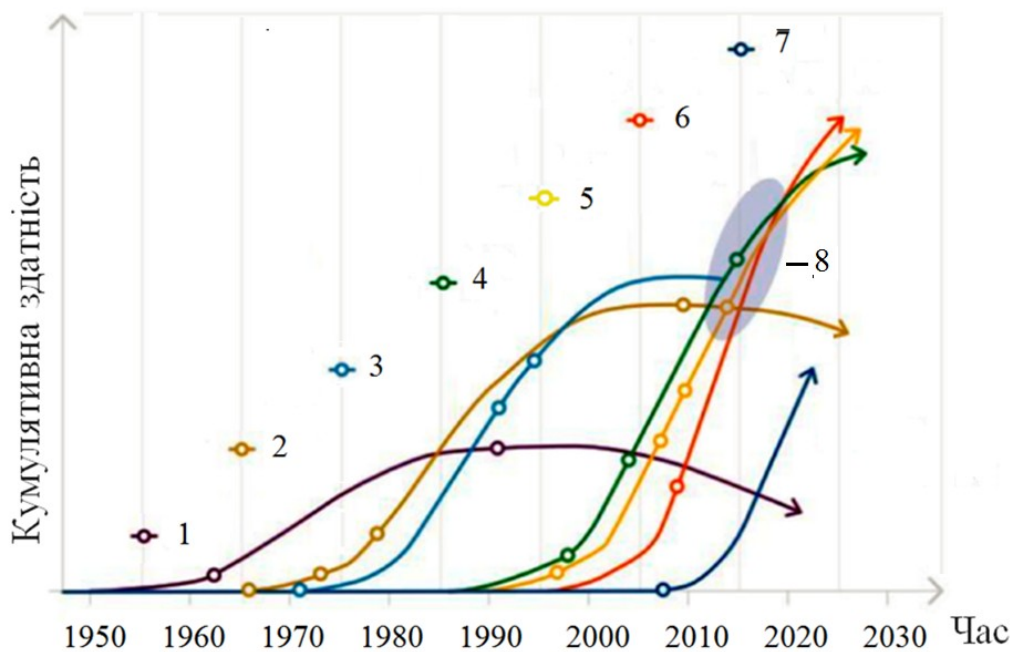


Рис. 1.1. Тенденції розвитку промислових цифрових інформаційних технологій у базових галузях: 1 - Мейнфрейм; 2 - Клієнт-сервер і ПК; 3 - Web 1.0, Електронна комерція; 4 - Web 2.0, хмарні та мобільні технології; 5 - Big Date, аналітика, візуалізація; 6 - IoT і розумні машини; 7 - Штучний інтелект; 8 - перехід до Industry 4.0. [1]

Технологічні переходи у гірничодобувній промисловості характеризують широке застосування визначальних інноваційних методів та засобів:

а) *Штучний інтелект та нейронні мережі у Mining 4.0.* Основою сучасних кіберфізичних систем є штучний інтелект і нейронні мережі, що дозволяють вивести енергоефективність і продуктивність на новий рівень оптимізації, робить видобуток корисних копалин більш безпечним, розумним, чистим та ефективним [6]. Штучний інтелект (ШІ) сьогодні значно вдосконалює світову гірничодобувну промисловість, особливо завдяки щоденним операціям, таким як оптимізація даних, усунення інформаційних сховищ та скорочення циклів розробки програм. На рис. 1.2 наведена базова структура гібридних систем штучного інтелекту [7].

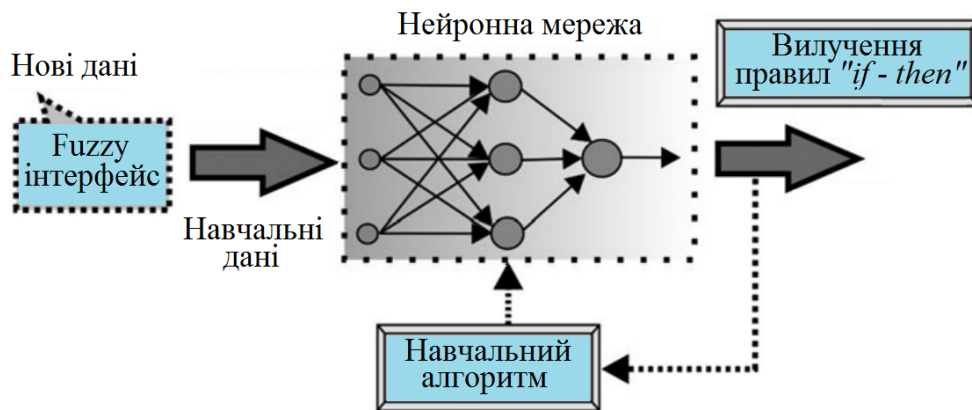


Рис. 1.2. Базова структура гібридних систем штучного інтелекту [7]

б) *Інтелектуальні датчики у Mining 4.0.* Перехід до Mining 4.0 без впровадження інтелектуальних датчиків у галузі контролю, управління, своєчасної діагностики та пошуку інженерних рішень є неможливим [8]. Інтелектуальний датчик - це пристрій, який отримує вхідні дані з фізичного середовища та використовує вбудовані обчислювальні ресурси для виконання заздалегідь визначених функцій при виявленні певних вхідних даних, а потім обробляє дані перед їхньою передачею. Одна з реалізацій інтелектуальних датчиків – це компоненти бездротової мережі датчиків та виконавчих механізмів, яка може мати тисячі вузлів. Кожен вузол підключений до одного або кількох інших датчиків та концентраторів датчиків, а також до окремих виконавчих механізмів. Інтелектуальний датчик складається з сенсора, який

збирає дані, мікропроцесора, який обчислює вихідні дані датчика, та будь-якої технології бездротового зв'язку (рис. 1.3) [9]. Інтелектуальний датчик може також включати кілька інших компонентів крім основних: функціональні перетворювачі, підсилювачі, засоби управління збудженням, аналогові фільтри, аналого-цифрові перетворювачі і компенсатори, що забезпечують вбудовану корекцію неідеальних вимірювань або вихідних даних.

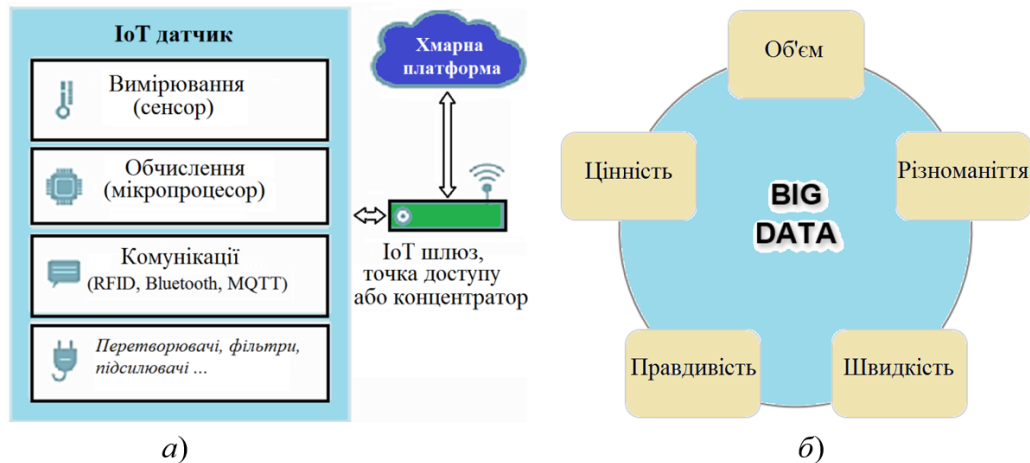


Рис. 1.3. Структура інтелектуального датчика (а) та ознаки великих даних (б) [9]

в) *Інтернет речей* у Mining 4.0. Інтернет речей – це технологія «ядра» кіберфізичних систем. Такі системи об'єднують різні досягнення Industry 4.0 – розумні датчики, Інтернет речей та машинне навчання – для заміни людей роботами у складних умовах. Технологія Інтернету речей дозволяє надати унікальний ідентифікатор практично будь-чому і передавати дані про ці речі через Інтернет або аналогічну сенсорну мережу [10]. Найважливішим та невід'ємним елементом Інтернету речей є інтелектуальний датчик.

г) *Великі дані* в розумному майнінгу (Mining 4.0). Майнінг 4.0. поєднує в собі штучний інтелект, здатний вирішувати складні оперативні завдання, сучасні телекомунікаційні системи (засоби зберігання і передачі великих даних) і засоби їх обробки [11]. Великі дані стосуються великої кількості різноманітних даних із багатьох джерел, які генеруються протягом життєвого циклу продукту. Зазвичай великі дані характеризуються п'ятьма ознаками, які показані на рис. 1.3. Серед зазначених ознак є об'єм, що стосується розміру та масштабу даних, різноманіття, що стосується кількості різних типів і форматів даних, швидкість,

що відноситься до високої швидкості, з якою дані генеруються та мають бути оброблені. Нещодавно до характеристик було додано ще дві ознаки – правдивість, яка вказує на якість, надійність або невизначеність даних, і цінність, яка вказує на те, що дані є цінними лише в належному контексті. Дані високої правдивості багато в чому впливають на загальні результати. Навпаки, малоправдиві дані містять багато безглузвих записів. Цінність стосується проблеми визначення корисних і цінних даних серед усіх великих даних [12].

д) *Цифрові двійники Mining 4.0.* Цифрові двійники, як і штучний інтелект, є іманентною частиною цифрової екосистеми гірничого підприємства (рис. 1.4), змінюючи роль людини в управлінні процесами, від водія автоматизованих машин (Оператор 3.0 дистанційного керування частково роботизованим обладнанням) і далі до Оператор 5.0 («шахтар майбутнього», який використовує біомеханічну підтримку, взаємодіє з колаборативними роботами, спирається на доповнену реальність за допомогою інженерів-машинобудівників [13]

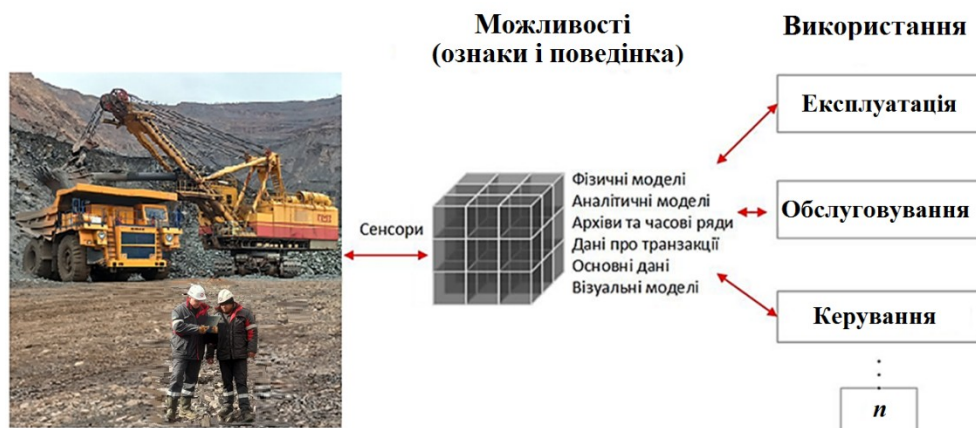


Рис. 1.4. Застосування цифрових двійників на гірничому підприємстві [14]

Оцифровуючи фізичне середовище, простір та процеси, технологія цифрових двійників може зручно відображати віртуальні інтерактивні цифрові моделі цих фізичних еквівалентів. У гірничодобувній промисловості така технологія дозволяє операторам візуалізувати шахту, не виходячи з офісу, тим самим оптимізуючи її експлуатацію, технічне обслуговування, продуктивність і безпеку.

е) *Машинний зір та навчання у Mining 4.0.* Машинний зір відкриває нові можливості для роботизації процесів видобутку корисних копалин, розподілу прийняття інженерних рішень між людьми та машинами (у тому числі автономними та колаборативними роботами) [15]. Система машинного зору включає пристрої, які використовуються для збору та обробки зображень фізичних об'єктів, які інтелектуально використовують датчики та фотоелектричні пристрої. Основними перевагами системи машинного зору є виявлення в режимі реального часу, безконтактність, довгострокова стабільність, можливість віддаленого моніторингу, висока точність, керована швидкість отримання зображень і програм для архівування даних, а також висока адаптивність до навколишнього середовища. Машинний зір виконує чотири основні функції (рис. 1.5): вимірювання, підрахунок, місцезнаходження та декодування [15].

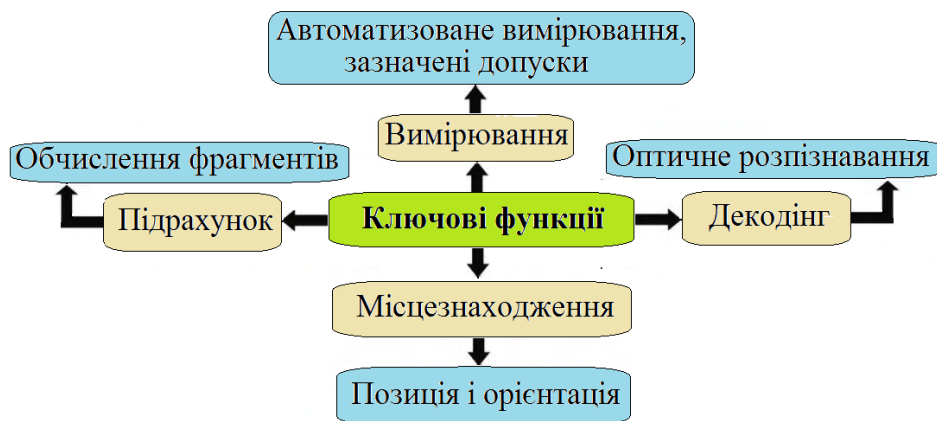


Рис. 1.5. Основні функції машинного зору [15]

є) *Віртуальна реальність у Mining 4.0.* Системи на основі віртуальної реальності вже розширюють межі ефективності навчання персоналу гірничодобувної галузі, зокрема з використанням ігрових методів. Простіші системи дозволяють візуалізувати віртуальну реальність, що відображає процеси в гірничих виробках за участю людини [16]. Створення на основі мережі 5G середовища моделювання, що поєднує текст, зображення та анімацію, може ефективно підвищити якість навчання, а також покращити практичні здібності та адаптованість учнів [17].

ж) *Хмарний майнінг* як шлях до цифрових технологій від Mining 4.0 до 5.0. Базовою цифровою технологією, що визначає шлях переходу до Mining 5.0, є хмарний майнінг, який дозволяє використовувати штучний інтелект не тільки для управління окремими процесами і навіть підприємствами, але і цілими промисловими кластерами, інтегруючи цифрові дані, технології, інтелектуальний потенціал, хмарні обчислення. параметри кооперативних зв'язків між компаніями [18]. Опора на багатокритеріальне ухвалення рішень дозволяє об'єднати фінансову та маркетингову стратегії підприємств, побудовані за допомогою нечіткої когнітивної карти, для завчасного планування природовідновлювальної діяльності. На основі єдиної хмарної платформи кожне гірниче підприємство може використовувати програмні та технічні послуги, які надає хмара, відповідно до своїх фактичних потреб. Тим часом дані, створені у зв'язках виробництва, експлуатації, обслуговування, управління та ін., обробляються та завантажуються в хмару. Такі функції, як геологічне моделювання, оцінка запасів, планування видобутку та проектування гірничих робіт, можна виконувати на хмарній платформі. Оператори, які спеціально займаються цією роботою, розподілені в різних місцях, охоплених хмарою. Експлуатація, обслуговування, оновлення та розширення платформи та програмного забезпечення можуть бути виконані постачальником. Режим обслуговування змінюється з локального на хмарний. Технічний персонал, персонал з експлуатації та технічного обслуговування, а також керівний персонал використовуватимуть хмарну платформу для прийняття завдань, доступу до ресурсів і спільної роботи (рис. 1.6) [18].

Розумне використання штучного інтелекту та геопросторових даних дозволяє ефективно управляти активами, підвищити їх доступність та надійність, скоротити витрати на обслуговування та знизити ризик виходу з ладу. Прикладом успішного впровадження наведених інноваційних інтелектуальних технологій є проект, розроблений спільно Huawei, Shaanxi Coal and Chemical Industry Group та впроваджений на Hongliulin Coal Mine [19].

На цьому підприємстві під землею тепер задіяно на 18% менше робітників, 97,7% вибоїв підтримуються інтелектуальними розробками, а інтелектуальне керування гірничими роботами полегшується за допомогою відео 5G та відеодзвінків. Більше 2700 комплектів обладнання на руднику з'єднані між собою з використанням єдиних стандартів, при цьому 170 мільйонів фрагментів даних передаються у хмару даних щодня. Ця інформація використана для створення понад 100 цифрових моделей, застосовується для прийняття виробничих та експлуатаційних рішень.

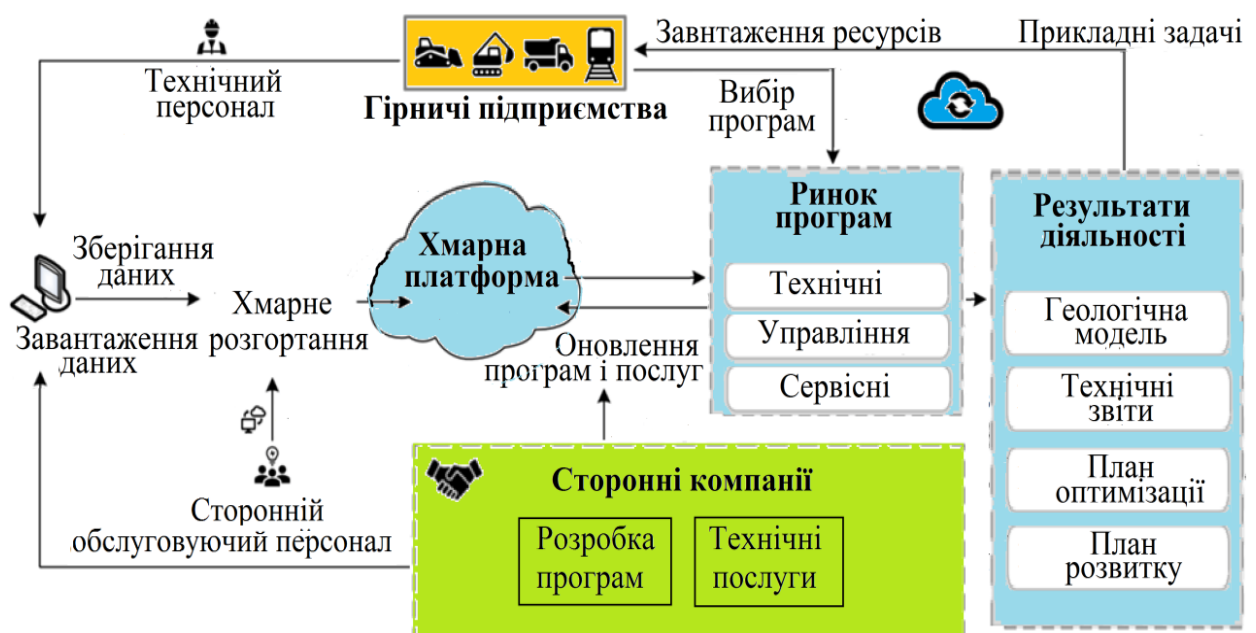


Рис. 1.6. Структура діяльності гірничого підприємства із застосуванням хмарної технології [19]

Таким чином, сучасний розвиток гірничого виробництва опосередкований такими процесами, як цифровізація та впровадження комп'ютерно-інтегрованих кіберфізичних систем у традиційні геотехнології (наземні та підземні), а також в управління гірничодобувними підприємствами. Результатом такого переходу є стабілізація видобутку корисних копалин за умов коливань кон'юнктури сировинних ринків, широке впровадження ощадливого виробництва, розширення відновлюваної енергетики. Найважливішим елементом цього процесу є забезпечення отримання оперативної інформації про характеристики мінеральної сировини на всіх етапах її видобутку та переробки.

1.2. Аналіз існуючих моделей процесу буріння свердловин

Швидкість буріння свердловини є ключовим показником ефективності процесу. Вища швидкість проходки (ROP) означає кращу продуктивність бурової установки, тому моделювання та прогнозування ROP має важливе значення для оптимізації операції буріння. Можна відзначити три основні підходи до прогнозування ROP: фізичні або традиційні моделі, моделювання на основі експериментальних даних та мультимодельний підхід.

1.2.1. Прогнозування швидкості проходки свердловин на основі фізичних моделей

Запропоновано багато моделей буріння для симуляції впливу на ROP параметрів бурової установки, властивостей навколишнього середовища та геології. Перші моделі базувалися на рівняннях RWN (ROP, WOB і RPM), які в основному керувалися емпіричними показниками, помноженими на константи пропорційності для врахування змінних, що впливають. Пізніше експериментальні випробування показали, що рівняння RWN надають достовірні результати лише за ідеальних умов очищення свердловини. Еволюція цього моделювання почалася в основному з робіт Каннінгема (Cunningham), після чого було опубліковано результати робіт Маурера (Maurer), Галле та Вудса (Galle and Woods), Бінгема (Bingham), Бургойна та Янга (Bourgoyne and Young), Уоррена (Warren) та ін. Наступні моделі в основному базуються на подальших удосконаленнях щойно згаданих [20].

Для порівняння нижче наведені рівняння (1.1), (1.2) за моделлю Галле та Вудса [21] та моделлю Уоррена [22]

$$ROP = C_f \frac{WOB_{sf}^k \left[e^{(-100/RPM_{sf}^2)} \cdot RPM_{sf} b_1 + b_2 RPM_{sf} \left(1 - e^{(-100/RPM_{sf}^2)} \right) \right]}{(0.928125 \cdot OD_{bit}^2 + 6 \cdot OD_{bit} + 1)^p}, \quad (1.1)$$

$$ROP = K \frac{RPM_{sf} (WOB_{sf} - (WOB_{sf})_t)^2}{OD_{bit}^2 \cdot S^2}, \quad (1.2)$$

де: b_1 дорівнює 0,75 або 0,428 для м'яких і твердих утворень відповідно; b_2 дорівнює 0,5 або 0,2 для м'яких і твердих утворень

відповідно; p - коефіцієнт зносу зуба; k - коефіцієнт, що враховує вплив навантаження на долото на ROP; C_f - коефіцієнт, що враховує тип долота, гідравліку, буровий розчин і міцність пласта; K - константа, що залежить від властивостей бурового долота та абразивності пласта, як наслідок умов буріння.

Модель Бінгема, одна з найперших традиційних моделей, була розроблена для застосування щодо будь-якого типу долота [23]

$$ROP = aRPM \left(\frac{WOB}{D_b} \right)^b, \quad (1.3)$$

де: ROP - швидкість проходки; WOB - вага на долото; RPM - швидкість обертання бура; D_b - діаметр долота; a та b - константи, визначені для даної гірської формації.

Слід зазначити, що вищенаведені константи визначаються для кожної окремої формації і фактично представляють кількісну оцінку легкості буріння конкретного пласта.

Прикладом моделі, специфічної щодо типу долота, є модель Гарленд і Рамперсад (Hareland and Rampersad) [24]

$$ROP = 14,14N_cRPM \frac{A_v}{D_b}, \quad (1.4)$$

де: N_c - кількість фрез, A_v - площа зразка породи, стиснутої перед фрезою.

Параметр A_v встановлюється на основі типу долота: у випадку долота з полікристалічним алмазом (PDC) це формалізується як

$$A_v = \cos\alpha \cdot \sin\theta \left(\left(\frac{d_c}{2} \right) \cos^{-1} \left(1 - \frac{4WOB}{\cos\theta\pi N_c \sigma_c d_c^2} \right) - \left(\frac{2WOB}{\cos\theta\pi N_c \sigma_c} - \frac{4WOB^2}{(\cos\theta\pi N_c \sigma_c d_c)^2} \right)^{0,5} - \left(\frac{WOB}{\cos\theta\pi N_c \sigma_c} \right) \right), \quad (1.5)$$

де: α - передній кут різця; θ - зворотний кут різця; d_c - діаметр різця (дюйми); σ_c - необмежена міцність на стиск.

Інші змінні повторюються з моделі Бінгема (1.3).

Підсумовуючи короткий огляд, слід зазначити, що традиційні фізичні моделі ROP зазнали безперервних модифікацій, дослідження та розробки тривають,

однак однією з найповніших моделей ROP є модель, запропонована Бургойном і Янгом [1,25]. Основні складові цієї моделі будуть розглянуті у наступних розділах.

1.2.2. Моделі швидкості проходки свердловин на основі експериментальних даних

Під час бурових робіт ведеться моніторинг та записується велика кількість даних. Моделі на основі даних використовують параметри, виміряні на поверхні, такі як вага на долоті, кількість обертів за хвилину, параметри системи очистки свердловини та інші для прогнозування ROP. Склад даних є важливим для побудови прогнозних моделей. Параметри відгуку є функцією типу пласта, літології, температури тощо [26]. Для створення точної моделі прогнозування вибрані дані буріння повинні мати об'єктивні умови, подібні до умов цільової свердловини. Прийнято вважати, що зміщені, тобто пробурені поблизу, свердловини краще відображають умови пласта цільової свердловини, тому набір даних, що використовується для аналізу та оптимізації, доцільно обирати з даних буріння саме зміщених свердловин.

На рис. 1.7 наведено загальна схема формування моделі процесу буріння на основі даних отриманих від цільової свердловини та історичних даних буріння свердловин поблизу неї із застосуванням алгоритмів машинного навчання [27].

Моделі прогнозування для різних метрик використовують однакові вхідні характеристики, що робить моделі пов'язаними. Завдяки відповідним змінам у пов'язаних моделях оператор може більш повно оцінити процес буріння. На рис.1.7 позначені моделі ROP (швидкості проходки), TOB (крутного моменту на долоті) та MSE (механічної питомої енергії).

Параметри свердловин, включаючи максимальні та мінімальні параметри, середнє значення та стандартне відхилення, можна розділити на три категорії: параметри керування, об'єктивні параметри та параметри реагування.

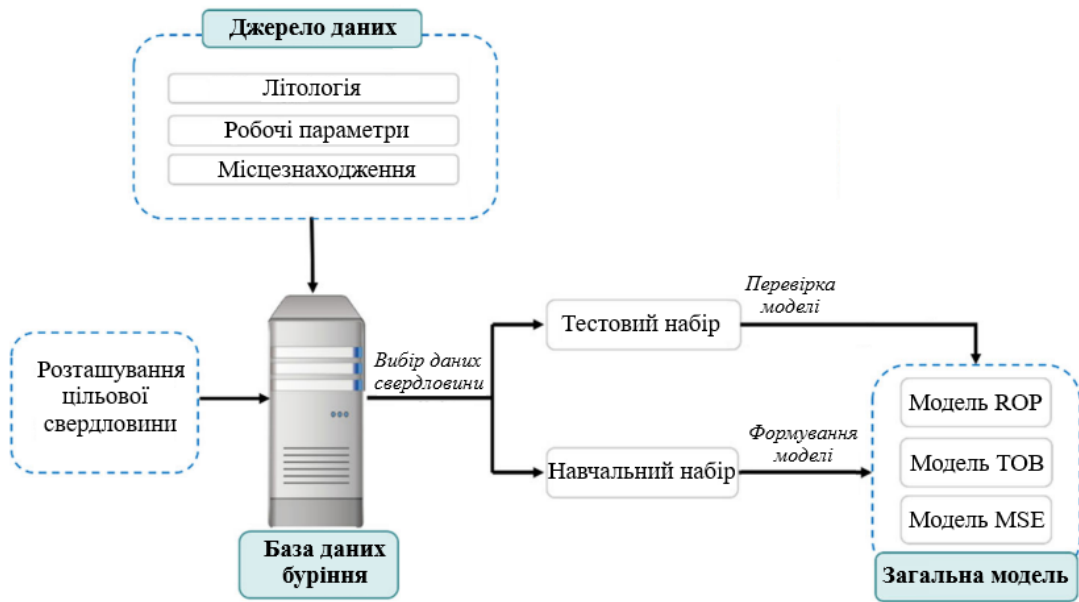


Рис. 1.7. Загальна схема формування моделі процесу буріння на основі даних

Параметри, якими можна маніпулювати в режимі реального часу, є параметрами керування, такими як навантаження на долото (WOB), оберти за хвилину (RPM) та параметри системи очистки свердловини. Навпаки, ті, якими неможливо маніпулювати в режимі реального часу, відносяться до об'єктивних параметрів, наприклад тип літології, умови пласта. Параметри реагування відносяться до таких, що змінюються разом з параметрами керування та об'єктивними параметрами: швидкість проходки, крутний момент та тиск у вертикальній трубі (SPP).

Дані, що використовуються для прогнозування, повинні бути керованими в режимі реального часу та застосовуватися до цільової свердловини для підвищення ефективності буріння.

Машинне навчання (ML) можна використовувати для точного прогнозування ROP під час буріння в межах певної фації або навіть для кількох фацій поспіль (з відповідними навчальними даними). Методи ML не містять жодних емпіричних констант або специфікацій долота і не прив'язані до свердловини (ВНА). Прогнози з використанням ML залежать лише від вхідних даних і вибору їх параметрів (зазвичай відомих як функції в колах машинного навчання). Використання нейронних мереж для застосування в ML мають багато застосувань у бурінні [24,28].

У роботі [29] нейронні мережі використані для визначення ступеня зносу долота під час буріння. Якість долота визначається із застосуванням вхідних параметрів буріння, таких як ROP, гідравлічна потужність на квадратний дюйм, WOB, швидкість обертання та крутний момент. Зазначається, що результати, передбачені нейронною мережею, були прийнятно точними, однак необхідно було імпортувати більше даних, щоб визначити краще узгоджену тенденцію між вхідними змінними та ступенем зносу долота.

Автори роботи [30] представили метод прогнозування ROP за допомогою нейронних мереж. Використано 8000 вимірювань за допомогою симулятора бурової установки. Ці дані включали швидкість обертання, крутний момент, навантаження на долото, продуктивність буріння пласта, швидкість циркуляції бурового насоса, тип долота, знос зубів долота, знос підшипника долота та час обертання долота. Ці параметри використано в якості вхідних у моделі на основі нейронної мережі, щоб передбачити значення ROP.

У дослідженні [31] нейронні мережі використані для прогнозування ROP шляхом застосування семи параметрів, включаючи ECD (еквівалентна циркуляційна густина бурового розчину), WOB, швидкість обертання, глибину свердловини, знос зубів, градієнт порового тиску та число Рейнольдса. Подібним чином нейронні мережі також застосовували, щоб передбачити знос долота та покращити значень ROP [32].

Авторами роботи [33] розроблено керовану даними модель ROP для передбачення можливих проблем із застряганням бурової колони за допомогою методів ML.

Взагалі, моделі, на основі даних мають дві основні переваги: по-перше, немає потреби в емпіричних константах або властивостях долота, а по-друге, вхідними даними є реальна записана інформація на поверхні землі (з бурової установки).

1.2.3. Мультимодельний підхід

Моделі на основі фізичних явищ зазвичай передбачають обчислювально

ресурсоемні процеси. Саме тому, такі моделі можуть бути непридатними для використання у реальному часі. Обчислювальні потреби зростають геометрично, коли прогностичні можливості моделей мають бути використані для оптимізації виробничих операцій на родовищах, проектів свердловин або інвестиційних портфелів в умовах невизначеності. Щоб зробити підходи до оптимізації та кількісної оцінки невизначеності життєздатними, фізичну модель необхідно замінити сурогатними моделями, керованими даними, які генеруються на основі цих фізичних моделей. Слід зазначити, що моделі, керовані даними, можна навчати, використовуючи як симуляційні, так і польові дані. Таким чином, вартість рішень, що отримуються, визначається вартістю симуляції, вартістю оптимізації та вартістю оцінки сценаріїв невизначеності. Отже, метою обрання методів моделювання є зменшення вартості зазначених складових. Приклад того, як створити фізичну модель, керовану даними (б) або комбінацію обох за допомогою оптимізації (а), наведено на рис. 1.8 [34].

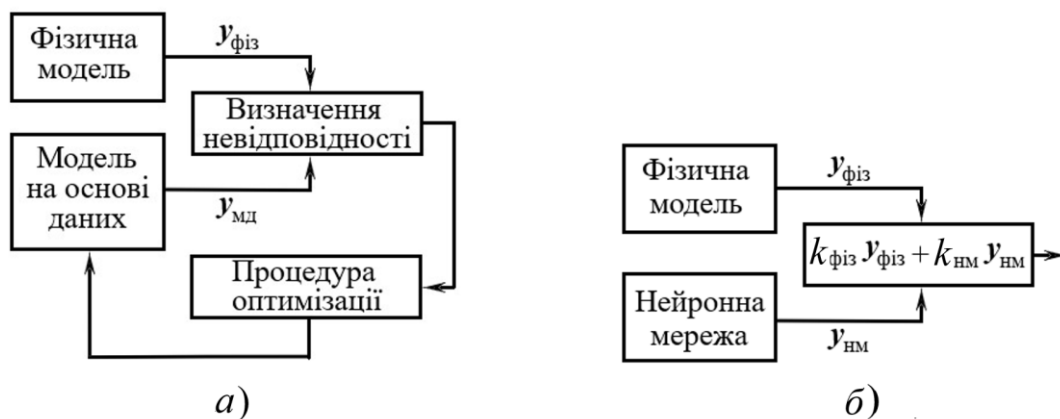


Рис. 1.8. Приклади реалізації мультимодельного підходу

Однак, для розробки вдосконалених прогностичних моделей необхідно дотримуватися збалансованого підходу. Самі дані не можуть бути альтернативою фізичному моделюванню, але в поєднанні з обґрунтованими та детальними знаннями фізичної проблеми та її обмежень, вони можуть привести до успішних рішень.

Іншим прикладом об'єднання фізичних моделей та таких, що формуються на основі даних, є поєднання прогнозів нейронної мережі з результатами фізичного моделювання. Нейронна мережа обробляє емпіричні дані, тоді як

фізичні правила пов'язують систему з реальністю. Оскільки реальні дані можуть бути зашумленими, фізичні моделі часто бувають досить корисними. На рис. 1.8 наведена схема структури, яка включає фізичну модель та модель на основі нейронної мережі [35].

Фізична модель, наприклад у вигляді лінійної комбінації змінних, продукує статичний прогноз. Нейронна мережа навчається протягом кількох епох. Для кожної навчальної епохи також формується прогноз, що поєднує результати фізичного моделювання та прогноз нейронної мережі.

Мультимодельні методи також поєднують елементи нечіткої логіки, машинне навчання та багатовимірну статистику. Багатофакторний статистичний аналіз і машинне навчання мають свої сильні сторони в геологічному моніторингу буріння. Багатовимірний статистичний аналіз відмінно підходить для виявлення зв'язків між декількома змінними, забезпечуючи чітке уявлення про тенденції та кореляції в даних буріння. З іншого боку, машинне навчання є потужним при обробці великих наборів даних і виявленні складних моделей, дозволяючи виявляти аномалії в реальному часі та прогнозувати несправності. Поєднання цих двох методів поєднує їх сильні сторони, що призводить до більш надійного моніторингу, покращення інтерпретації даних і прогнозування несправностей [36].

У роботі [37] запропоновано використання методу гібридного ймовірнісного PCA у поєднанні з моделями багатовимірної згорткової довготривалої короткочасної пам'яті (CNN-LSTM). Такий підхід передбачає інтеграцію нейронної мережі та ймовірнісної кластеризації для підвищення ефективності виявлення аномалій. Метод аналізу незалежних компонентів (ICA), заснований на ансамблевому навчанні для моніторингу негаусівських процесів, покращує узагальнення моделі шляхом інтеграції логіки ансамблевого навчання [38]. Автори дослідження [39] запропонували подібний метод, представивши ансамблеве навчання та аналіз канонічної змінної ядра (KCVA), поєднуючи кілька моделей KCVA з використанням байєсівського висновку для покращення продуктивності моніторингу процесу.

Таким чином, вдосконалення традиційних моделей та подальше їх корегування, використання гібридного підходу, додавання додаткових змінних, наприклад, параметрів вібрації та питомої енергії, використання нормалізаційних коефіцієнтів тощо, може призвести до кращої відповідності між результатами моделювання та реальними значеннями [1].

1.3. Техніка і технології моніторингу процесу буріння свердловин

Буріння є однією з найважливіших і дорогих частин розвідки і видобутку корисних копалин. Понад 25–35 % витрат на видобуток припадає на буріння. Параметри, що впливають на операцію буріння, можна розділити на два типи: контрольовані та неконтрольовані. Одночасний вплив цих параметрів на продуктивність буріння створює складні умови, які не завжди можна ефективно оцінити та передбачити [40]. З цієї причини пошук комплексного методу або індикатора, який може точно виміряти вплив цих факторів, може бути дуже корисним для оптимізації операцій буріння.

Каротаж або моніторинг під час буріння (МБ) є важливим завданням у гірничих роботах. Точне вимірювання робочих параметрів бурової установки та характеристик породи може значно знизити вартість бурових робіт [41].

Система МБ включає будь-який інструмент, який можна використовувати під час буріння, включно з устаткуваннями, розташованими на тросі. Звичайна структура МБ складається із свердловинного зонда, системи передачі даних і комплекту наземного обладнання. Свердловинні пристрої здатні передавати дані майже в реальному часі на поверхню або зберігати дані в пристрої пам'яті для перегляду на поверхні.

У табл. 1.2 наведено основні дані, які зазвичай збираються в результаті наземних і свердловинних вимірювань [42].

табл. 1.2. Зведення типів даних, які збираються в результаті наземних і свердловинних вимірювань

Група параметрів	Поверхневі вимірювання	Вимірювання у свердловині
Параметри свердловини	Температура Тиск	Температура Тиск
Механічні параметри	Швидкість обертання RPM Навантаження на долото WOB Крутний момент Згинальний момент Обертний момент Швидкість проникнення RPM	Швидкість обертання RPM Навантаження на долото WOB Крутний момент на долоті Згинальний момент Обертний момент Вібрація
Геологічні параметри	Аналіз шламу	Щільність Пористість Питомий опір Гамма Акустика Магнітні властивості
Параметри напрямку		Нахил Азимут

Збір даних у свердловині значно покращує точність вимірювань і може сприяти підвищенню швидкості буріння та його енергоефективності. На рис. 1.9 наведена інформація стосовно частоти використання даних, зібраних інструментами МБ, для керування процесом буріння на сучасних бурових установках [42].

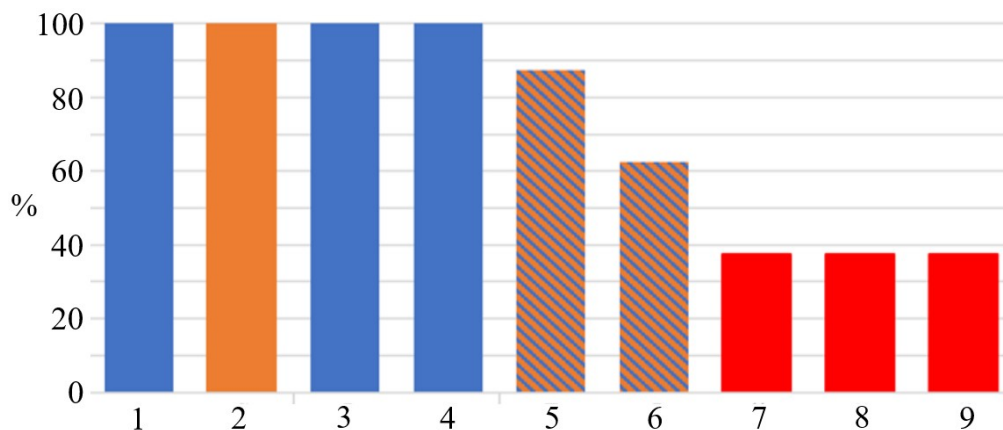


Рис. 1.9. Дані, що збираються інструментами МБ, і частота їх використання для керування процесом буріння: 1 – температура у свердловині; 2 – тиск у свердловині; 3 – напрямок; 4 – кут; 5 – швидкість обертання; 6 – вібрація; 7 – згинальний момент; 8 – крутний момент; 9 – вага на долоті [42]

Для визначення параметрів, наведених у табл. 1.2, можуть бути використані прямі чи непрямі вимірювання. Наприклад, поточні бурові установки, обладнані системами МБ, використовують вимірювання тиску гідравлічних систем для опосередкованого визначення параметрів буріння, таких як тиск у напрямку вниз і момент обертання, замість того, щоб безпосередньо вимірювати їх поблизу бурового долота. Цей метод був розроблений через різноманітні механічні та технологічні обмеження, які виникають під час досліджень на місці. Однак, за оцінками фахівців непрямі вимірювання можуть мати похибку до 30%, залежно головним чином від конструкції бурової установки та розташування гідравлічного контуру [43].

З іншого боку, наприклад, пристрій TICOR здатний безпосередньо вимірювати зусилля, що прикладаються до долота (рис. 1.10) [43].

Разом із введенням параметра, відомого як питомий коефіцієнт тертя-ковзання долота μ , це дозволило запропонувати вираз для розрахунку крутного моменту на *TOB* долоті [44,45]

$$TOB = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{D}{2}} r^2 \mu \frac{WOB}{(\pi/4)D^2} dr d\theta = \int_0^{\frac{D}{2}} \frac{8\mu WOB}{D^2} r^2 dr = \frac{8\mu WOB}{D^2} \frac{D^3}{24} = \frac{\mu D WOB}{3}. \quad (1.6)$$

де: WOB – вага на долоті; θ – кут обертання; D – діаметр долота.

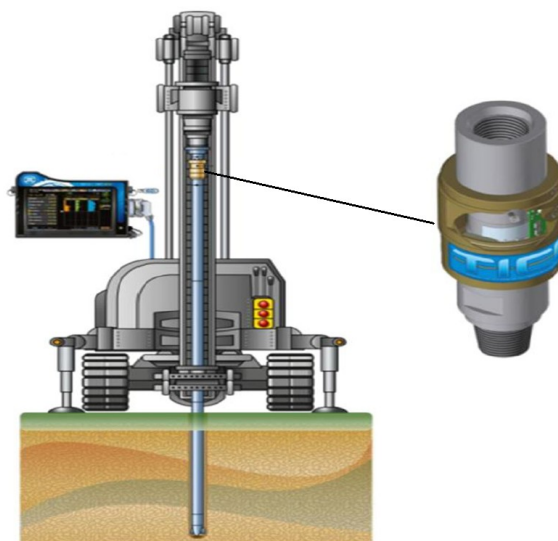


Рис. 1.10. Вимірювання основних параметрів процесу буріння свердловин та розташування датчика TICOR на буровій установці

Загальна схема розрахунку крутного моменту на TOB долоті наведена на рис. 1.11

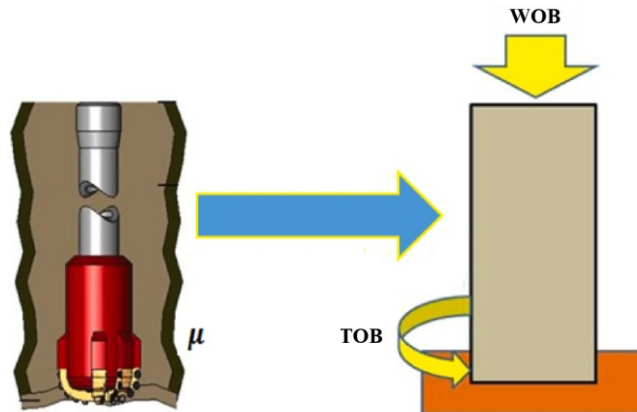


Рис. 1.11. Розрахунок крутного моменту на долоті

Важливим елементом енергоємної контактної взаємодії бурової установки з породою є вібрація. Вона є проявом хвиль тиску, що утворюються в матеріалі енергією, яка виділяється в результаті деформації або різних типів руйнування. У міру того, як ці хвилі тиску поширюються через матеріал (порода чи елементи бурової установки), вони можуть бути зафіксовані датчиками і проаналізовані, щоб отримати уявлення про властивості середовища [46-48].

Під час буріння виявлений вібраційний сигнал є комбінацією декілька складових. Як показано на рис. 1.12, ці джерела можна розділити на три великі класи: сигнал від бурової установки, сигнал від породи, що буриться та сигнал, що формує оточуюче середовище [41].

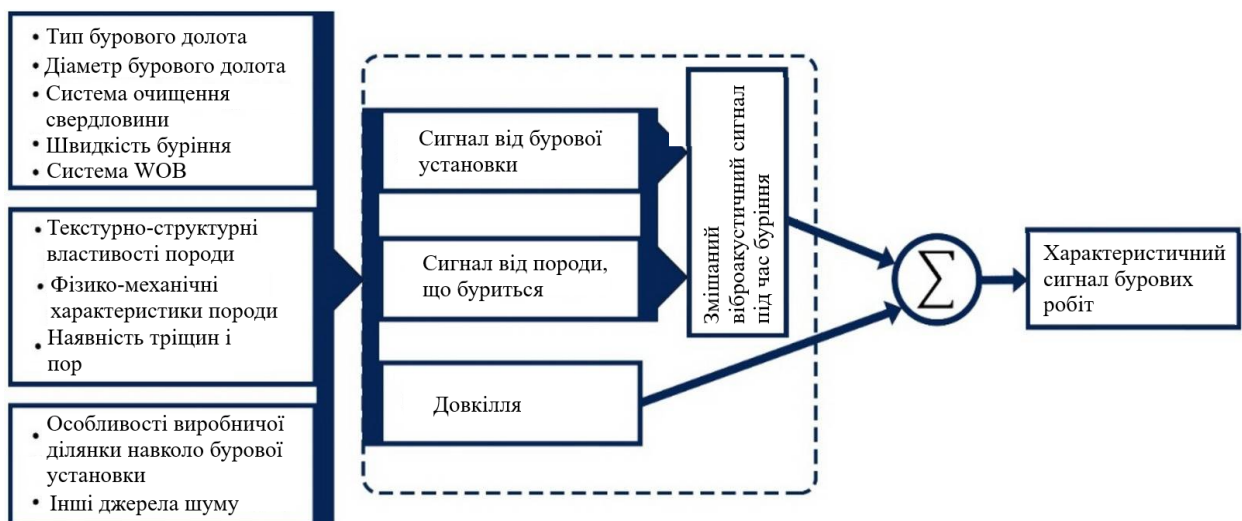


Рис. 1.12. Джерела віброакустичного сигналу при бурінні свердловин.

Одним із недоліків існуючих моніторів вібрації є їх нездатність розрізняти різні режими цього процесу. Це унеможливорює своєчасне використання у реальному часі результатів аналізу безпосередньо при бурінні свердловин для внесення коригувальних дій з метою усунення вібрації та використання її параметрів для керування процесом.

В роботі [49] пропонується метод прямого кількісного визначення різних режимів вібрації безпосередньо в процесі буріння. У системі використовуються чотири акселерометри та магнітометр, встановлені в датчику амортизатора бурової колони. Три акселерометри встановлені в комірці під кутом 120 градусів один від одного та орієнтовані для радіального вимірювання. Четвертий акселерометр встановлений в осьовому напрямку. В одній з кишень також встановлений магнітометр. Кишені також можуть містити тензодатчики для вимірювання WOB і TOB, таким чином забезпечуючи повний інструмент діагностики свердловинного буріння.

Доцентрове прискорення $A_c(t)$ розраховується за виразом [49]

$$A_c(t) = \frac{A_1(t) + A_2(t) + A_3(t)}{3}, \quad (1.7)$$

де: $A_1(t), A_2(t), A_3(t)$ – результати вимірювань прискорення радіальними акселерометрами.

Разом з тим: $A_c(t) = w^2(t) \cdot r$, (1.8)

де: r – радіус датчика, а w – кутова швидкість обертання в рад/сек.

З виразу (1.8) слідує

$$w(t) = \sqrt{A_c(t)/r}. \quad (1.9)$$

Відповідно миттєва частота обертання обрховується таким чином

$$RPM = \left(60/2\pi\right) w(t). \quad (1.10)$$

Ефект переривчастого ковзання визначається максимальною швидкістю обертання

$$w_{ss} = \max[w(t)]. \quad (1.11)$$

Режим зворотного вихору обчислюється піком

$$A_w(t) = A_1(t) + A_2(t)\cos(120\text{deg}) + A_3(t)\cos(240\text{deg}) \quad (1.12)$$

Величина поперечної вібрації відповідає векторній сумі

$$A_{Lat}(t) = \sqrt{A_x(t)^2 + A_y(t)^2}, \quad (1.13)$$

де: $A_x(t)$ та $A_y(t)$ - прискорення по осі x та осі y, відповідно.

Вимірювання параметрів осьової вібрації виконується осьовим акселерометром.

Важливим елементом моніторингу процесу буріння свердловин є ультразвукові та електромагнітні вимірювання.

Акустичний (ультразвуковий) каротаж - це інструмент дослідження свердловин, який визначає відповідний інтервал часу Δt , що є мірою того, наскільки швидко пружні хвилі стиснення і поперечні хвилі проходять через досліджуване середовище.

У роботах [50-52] зазначається, що в результаті ультразвукового каротажу свердловин можуть бути отримані такі параметри процесу розповсюдження ультразвукових хвиль у руді, як швидкість та затухання. У свою чергу, ці параметри можуть бути використані для оцінки щільності та пружних якостей руди.

У роботі [53] наводяться характеристики відгуку електромагнітного випромінювання (EMR) та акустичної емісії (АЕ) у процесі руйнування під механічним навантаженням камнеподібного матеріалу з використанням системи реєстрації АЕ-EMR, що складається із системи навантаження, системи збору даних та системи екранування.

Слід зазначити, що АЕ характеризує не тільки фізико-механічні особливості випробуваного зразка, а й поточний стан його структури (напруженість, наявність ушкоджень, тріщин і т.д.)

У роботі [54] наведено оцінки часового спектру сигналів та середньоквадратичного значення акустичної емісії в процесі лабораторного буріння (свердління) зразків гірських порід з метою розпізнавання їх класу та властивостей міцності. Досліджено 9 зразків осадових, метаморфічних та

магматичних порід для визначення їх механічних властивостей, у тому числі на одновісне стиснення. міцність на стиск (UCS), міцність на розтягування (BTS), число відскоку Шмідта (SRN) та швидкість поздовжньої хвилі (P_w). У ході випробувань використовувався датчик акустичних хвиль для реєстрації акустичних сигналів, що поширюються в середовищі, або, іншими словами, рівня звукового тиску всього процесу буріння.

Після оцінки часового спектра сигналу, сформованого при бурінні зразків кожного типу породи, обчислювалося його середньоквадратичне значення та порівнювалося з властивостями цієї породи (рис. 1.13).

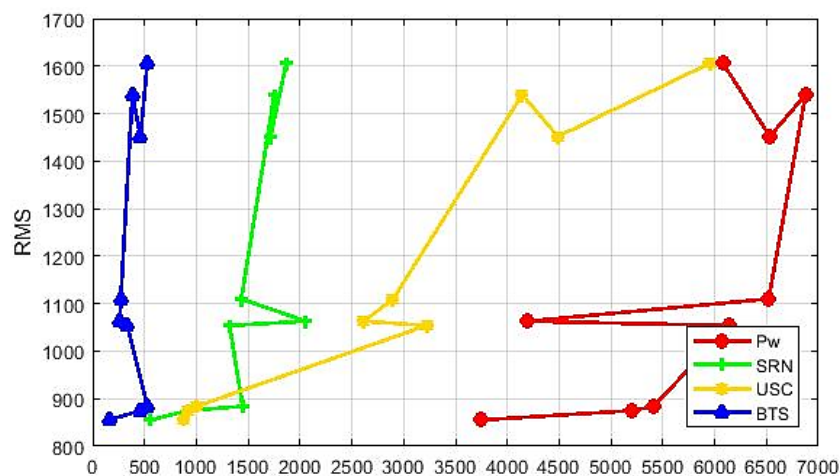


Рис. 1.13. Залежності середньоквадратичного значення амплітуди акустичної емісії RMS від характеристик властивостей гірської породи: P_w – швидкість поздовжньої хвилі, м/с; SRN – число відскоку Шмідта; USC – міцність на стиск, МПа; BTS – міцність на розтяг, МПа

Аналіз акустичних сигналів, записаних під час бурових випробувань, показав, що середньоквадратичні значення цих сигналів знаходяться в діапазоні від 800 до 1600. В цілому більш міцні та тверді породи мають вищі значення, що вказує на те, що звуковий тиск при бурінні краще поширюється в більш твердих породах. Для осадових порід RMS знаходиться в діапазоні від 800 до 1000, метаморфічних порід – в діапазоні від 1000 до 1200, а для вивержених порід, які мали більш високу міцність і твердість, цей параметр знаходиться в діапазоні від 1400 до 1600. Результати випробувань зразків трьох основних типів гірських порід показали, що середньоквадратичні значення акустичних

сигналів, що реєструються в процесі буріння, досить специфічні для використання при ідентифікації класу породи, що розбурюється, і оцінки її властивостей міцності [54].

Постійний моніторинг енергоефективності виявився цінним інструментом для керування швидкістю проходки ROP. Деякі проекти використовували цю концепцію для визначення даних буріння в реальному часі, тоді як інші розглядали її як основу для формування ROP перед початком операції буріння [41].

Питома механічна енергія (MSE) використовується для визначення кількості енергії, необхідної для руйнування одиниці об'єму породи і визначається рівнянням [45,55]

$$MSE = \frac{Work}{Drilled\ Rock\ Volume}, \quad (1.14)$$

де: *Work* – загальна виконана робота; *Drilled Rock Volume* – об'єм пробуреної породи.

Цей параметр був вперше використаний у гірничодобувній промисловості для оцінки ефективності буріння [56]. Пізніше MSE було введено як метрику оптимізації в реальному часі під час буріння для контролю параметрів операції [57]. Автори роботи [58] поєднують ROP з формулами питомої енергії та надають графіки відповідні залежності ROP у реальному часі для покращення оптимізації буріння. Зазначається можливість виявлення ускладнень у свердловині, коли MSE збільшується зі зменшенням ROP чи невідповідними змінами WOB та RPM. Точне прогнозування цих метрик є основою оптимізації відповідних параметрів.

Таким чином, сучасний стан моніторингу процесу буріння свердловин характеризується наявністю різноманітних підходів щодо його технологічного та технічного забезпечення. Найбільш поширені непрямі вимірювання основних змінних процесу буріння можуть мати притаманну похибку до 30%, залежно, головним чином, від конструкції бурової установки та розташування сенсорів.

Враховуючи складність мінералогічних та текстурно-структурних особливостей покладів залізної руди, як і раніше, залишається серйозною проблемою отримання оперативної достовірної інформації про їх характеристики та створення моделі фізики гірських порід, яка відображала б стан досліджуваного середовища для практичного використання. Зазначені особливості впливають на якість та енергоефективність керування процесом буріння свердловин.

1.4. Методи автоматизованого керування та оптимізації процесу буріння свердловин.

Автоматизація процесу буріння потребує системного підходу, який інтегрує дані про свердловину та поверхню в реальному часі з досвідом та моделями попереднього буріння. Система автоматизованого керування (САК) змінює робочі параметри, такі як навантаження на долото, швидкість обертання його та ін. в залежності від змінних робочих умов. Крім того, САК оновлює модель, використовуючи дані в реальному часі, по суті імітуючи рішення досвідченого бурильника, адаптуючись до результатів недосконалих прогнозів. Рівень інтеграції між поверхневими та свердловинними системами значно відрізняється та обмежений можливостями датчиків поблизу долота та вздовж бурової колони, а також смугою пропускання каналу зв'язку для передачі результатів вимірювань і команд.

Ступінь автоматизації процесу буріння можна поділити на три рівня: перший рівень це система, яка продукує вказівки для бурильників, другий - система приймає рішення зі схвалення бурильника, а третій наближається до автономної системи, у якій бурильник втручається лише за потреби (рис. 1.14) [59].

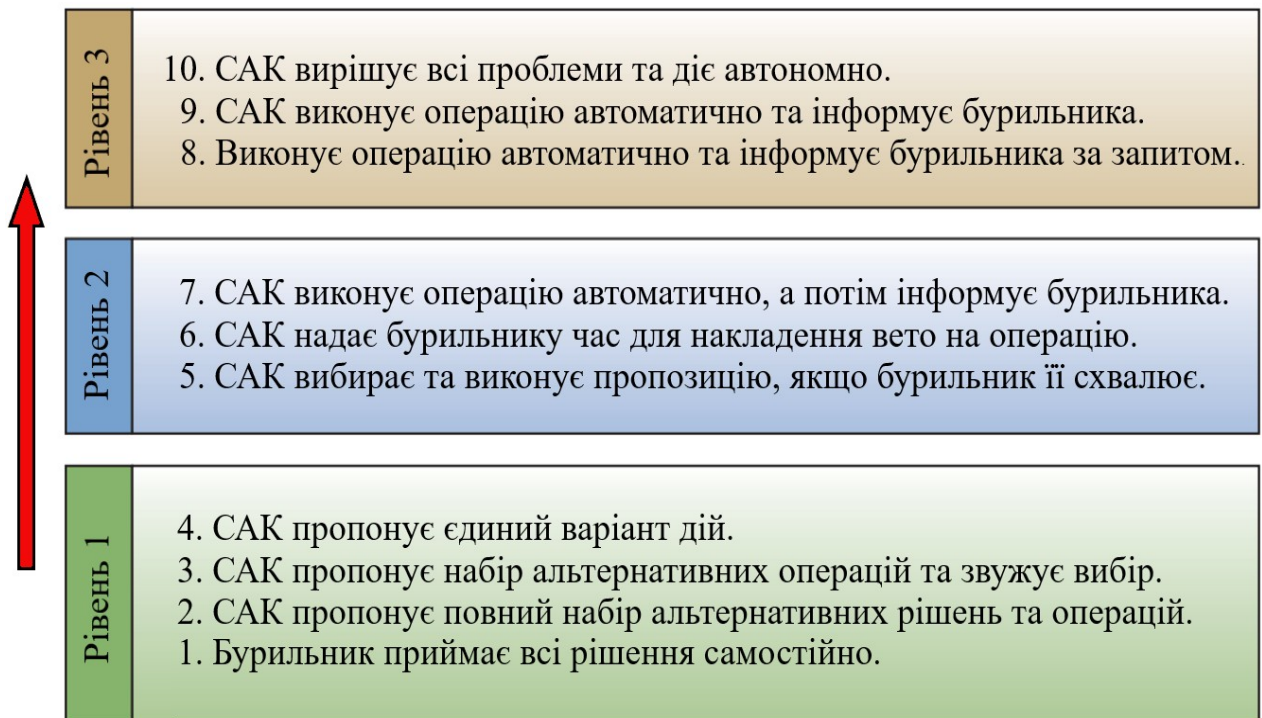


Рис. 1.14. Рівні автоматизації процесу буріння свердловин

У роботі [60] обґрунтовано перехід від традиційних пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) структур до впровадження розширених стратегій керування, здатних усунути обмеження, притаманні ПІД-регуляторам. ПІД-регулятори формують керуючі впливи на основі історичних даних без передбачення майбутніх станів системи та не здатні враховувати обмеження. Ці особливості стають особливо очевидними в сценаріях, що вимагають від системи управління уникати перевищення цільового значення або підтримки вихідних даних у заданих межах [61].

Як можна судити за результатами опитування провідних фахівців у галузі автоматизації виробничих процесів щодо їх оцінки поточного та майбутнього застосування існуючих технологій автоматизованого керування (Табл. 1.3), особлива увага приділяється і, ймовірно, у майбутньому буде ще більше приділятися модельно-прогнозуючому керуванню (МПК) [62].

Табл. 1.3. Оцінки застосування існуючих технологій автоматизованого керування

№	Технології керування	Поточний вплив, %	Майбутній вплив, %
1	ПІД керування	91	78
2	Ідентифікація систем	65	72
3	Оцінка та фільтрація	64	63
4	Модельно-прогнозуюче керування	62	85
5	Аналіз даних процесу	51	70
6	Виявлення та ідентифікація несправностей	48	78
7	Децентралізоване, скоординоване керування	29	54
8	Робастне керування	26	42
9	Інтелектуальне керування	24	59
10	Нелінійне керування	21	42
11	Адаптивне керування	18	44
12	Гібридні динамічні системи	11	33
13	Теорія ігор	5	17

МРК використовує модель об'єкта управління для прогнозування майбутніх станів системи, тим самим полегшуючи прийняття обґрунтованих рішень, які оптимізують поточну та майбутню продуктивність системи з огляду на обмеження.

Основне завдання контролера МРК - визначити послідовність кроків керованої змінної y , щоб можна було відслідкувати рух системи до її заданих значень оптимальним чином. Розрахунки керування засновані на мінімізації прогнозованих відхилень від опорної траєкторії.

Моделі кінцевого відклику на крок (FSR) використовуються майже у всіх рівняннях моделювання МРК і отримуються шляхом простого введення єдиної крокової зміни u_k в процесі, що працює в стійкому стані. Коефіцієнти моделі $(S_1, S_2, S_3, \dots, S_N)$ є вихідними значеннями на кожному часовому кроці.

Прогнозований вихід для миттєвого часу k розраховується з наступного рівняння [63]

$$\hat{y}_k = \sum_{i=1}^{N-1} S_i \Delta u_{k-1} + S_N u_{k-N} . \quad (1.15)$$

Невідповідність між прогнозованим моделлю виходом та фактичним вимірним значенням на певному часовому кроці k визначається як

$$d_k = y_k - \hat{y}_k . \quad (1.16)$$

Тоді виправлений прогноз становить

$$\hat{y}_k^c = \hat{y}_k - d_k . \quad (1.17)$$

З урахуванням рівнянь (1.15), (1.16) і (1.17), виправлений прогноз для j -го кроку має такий вигляд

$$\widehat{y_{k+j}^c} = \sum_{i=1}^j S_i \Delta u_{k-i+j} + \sum_{i=1}^{N-1} S_i \Delta u_{k-i+j} + S_N u_{k-N+j} + d_{k+j} , \quad (1.18)$$

де: d_{k+j} - коригуючий член.

Різниця між траєкторією заданого значення та майбутніми прогнозами на j -му кроці, при $j \leq P$, визначається за формулою

$$r_{k+j} - \widehat{y_{k+j}^c} = r_{k+j} - \left[\sum_{i=1}^{N-1} S_i \Delta u_{k-i+j} + S_N u_{k-N+j} + d_{k+j} \right] - \sum_{i=1}^j S_i \Delta u_{k-i+j} . \quad (1.19)$$

Рівняння (1.19) має важливе значення для вирішення задачі оптимізації і може використовуватися в квадратичній цільовій функції для горизонту прогнозування P та горизонту керування M [63]

$$f_{obj} = \sum_{i=1}^P (r_{k+1} - \widehat{y_{k+1}^c})^2 + w \sum_{i=0}^{M-1} \Delta u_{k+1}^2 , \quad (1.20)$$

де: w – вхідні ваги.

Аналогічно визначаються рівняння прогнозування для системи МІМО. Така система буде мати цільові функції для кожної змінної y , кожної зі своїми власними параметрами та вхідними вагами w [64].

Процес буріння свердловин можна оптимізувати за різними показниками, такими як швидкість проходки (ROP), крутний момент на долоті (ТОВ), питома механічна енергія (MSE), питома вартість буріння та ін. Наведена на рис. 1.15 загальна схема процедури оптимізації є продовженням структури, що показана на рис. 1.7 у підрозділі 1.2.

Ключовим елементом процедури оптимізації процесу буріння є його модель. Розглянуті у підрозділі 1.2 моделі використовують фактичні польові дані, зібрані за допомогою систем реєстрації даних та моніторингу процесу, як вхідні параметри для прогнозування ROP.



Рис. 1.15. Загальна схема процедури оптимізації процесу буріння свердловин. На теперішній час відомі різноманітні методи оптимізації параметрів буріння [65]. Зокрема запропоновано багато методів, що оптимізують параметри з однією метою (одноцільові методи): мінімальна питома механічна енергія [66], мінімальна вартість буріння [67], максимальна швидкість проходки [68]. Однак у реальних бурових операціях різні цілі оптимізації часто конфліктують одна з одною, і збільшення однієї цілі часто супроводжується зменшенням інших. Тому для синергетичної оптимізації параметрів буріння доцільно одночасно використовувати кілька цільових показників.

У роботі [69] у якості цільової функції оптимізації пропонується максимізація ROP та мінімізація MSE. Це досягається пошуком відповідних параметрів WOB та RPM. Максимізація ROP та мінімізація ризику виникнення прихват-прослизання (stick-slip) вібрації із застосуванням керованих параметрів WOB, RPM, GPM (потік, що формується гідравлічним насосом за хвилину) пропонується у роботі [70]. Параметр довговічності долота та максимальна ROP обрано у якості цільової функції у роботі [71]. Оптимізація

виконується із застосуванням параметрів WOB, RPM. Такий же підхід використано у дослідженні [72] але до параметрів, які використовуються для оптимізації додано PP (тиск гідравлічного насоса). У якості додаткової до ROP цільової функції у роботі [73] виконується мінімізація непродуктивного часу (NPT) роботи бурової установки. При цьому до звичайних параметрів, що оптимізуються, додано GPM.

Зазначений багатоцільовий підхід забезпечує кращі результати, ніж оптимізація з однією цільовою функцією. Тобто можна вважати, що метод багатоцільової оптимізації параметрів буріння з урахуванням граничних умов є більш обґрунтованим та перспективним.

Прикладом підходу, який базується на моделі взаємодії долота PDC із гірською породою і техніці обробки даних, що виявляє зміни у відгуку долота, є алгоритм ROPO [59]. Застосована модель передбачає, що взаємодія долота PDC розбивається на три лінійні фази з урахуванням глибини різання породи (рис. 1.16) [59].

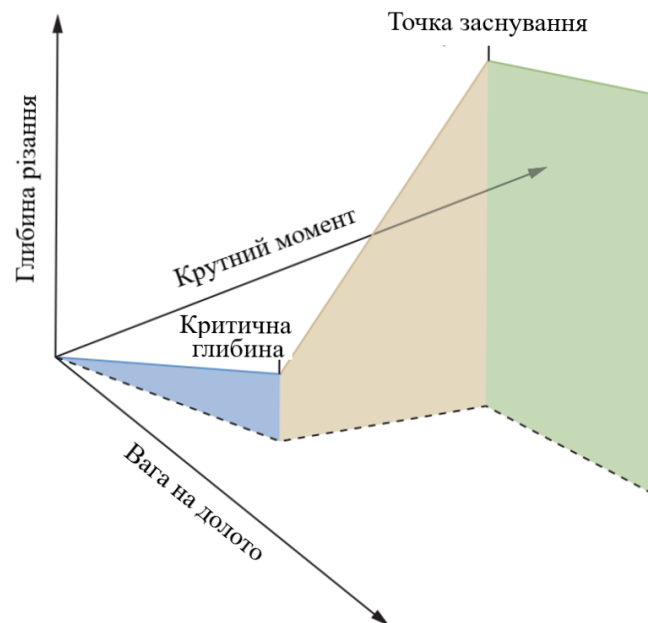


Рис. 1.16. Фази буріння, за якими працює алгоритм ROPO [59]

Глибина різання за один оберт долота оцінюється шляхом ділення швидкості проходки на RPM. Це дозволяє дані про буріння відобразити в реальному часі у трьох вимірах: навантаження на долото, крутий момент на долоті та глибина різання. Модель ROPO характеризує реакцію долота в реальному часі та

визначає оптимальні значення обертів за хвилину та навантаження на долото у межах набору комплексних обмежень робочих параметрів для досягнення максимального ROP [59].

Для підвищення ефективності та якості автоматизованого керування процесом буріння свердловин в роботах [74-76] виконується оперативне визначення властивостей феромагнітних гірських порід із застосуванням електромагнітного акустичного перетворення зондуючих сигналів та характеристик вібрації бурового інструменту з подальшим використанням отриманих результатів для динамічної корекції робочих параметрів бурової установки.

У роботі [77] наведено алгоритм оптимізації процесу буріння LightGBM [78] із застосуванням моделювання параметрів відгуку (ROP, TOB та MSE) за допомогою машинного навчання. Це ефективна структура реалізації дерева рішень з посиленням градієнта (GBDT). GBDT є ансамблевою моделлю дерев рішень, навчених послідовно [79]. На кожній ітерації GBDT вивчає дерева рішень, підганяючи негативні градієнти (також відомі як залишкові помилки).

LGBM містить дві перспективні методики: односторонню вибірку на основі градієнта (GOSS) та ексклюзивне об'єднання ознак (EFB), щоб мати справу з великою кількістю екземплярів даних та великою кількістю ознак відповідно. За допомогою GOSS та EFB LightGBM може значно перевершити інші структури з точки зору швидкості обчислень та споживання пам'яті. Висока швидкість обчислень дозволяє моделі прогнозувати умови у свердловині та оптимізувати параметри в режимі реального часу. Крім того, алгоритм LGBM може автоматично обробляти характеристики категорії без повторного кодування даних, що дозволяє бурильникам зосередитися на моделюванні, а не на попередній обробці даних [77].

Інтелектуальний алгоритм оптимізації, наведений у роботі [80], відноситься до класу алгоритмів, заснованих на еволюційних процесах біологічного виживання або фізичних явищах у природі, які використовуються для вирішення задач оптимізації. Відповідно до принципів побудови таких

алгоритмів, вони поділяються на інтелектуальні алгоритми, подібні до людських, еволюційні алгоритми, алгоритми ройового інтелекту, алгоритми росту рослин та подібні до природних алгоритмів. До загальновідомих алгоритмів належать генетичний алгоритм, алгоритм оптимізації рою частинок, алгоритм мурашиної колонії, алгоритм імітації відпалу, алгоритм диференціальної еволюції тощо. Генетичний алгоритм може вирішувати дискретні та неперервні задачі, а також підходить для вирішення складних задач комбінаторної оптимізації та оптимізації функцій. Завдяки диверсифікованим популяціям та операціям мутації можна ефективно уникнути локального оптимуму [81].

Незважаючи на багатообіцяючі результати, досягнуті завдяки інтелектуальній оптимізації параметрів буріння, слід враховувати кілька зауважень [80]. По-перше, існуючі методики оптимізації базуються на наборі параметрів буріння та даних з конкретного родовища. Різні гірські породи, варіації їх властивостей або геологічні аномалії можуть призвести до відхилень у продуктивності моделі. По-друге, в процесі оптимізації деякі параметри буріння, такі як WOB та RPM, вважаються відносно стабільними з часом. Однак у реальних бурових операціях ці параметри можуть коливатися через зміну умов буріння, таких як знос бурового долота, нестабільність стовбура свердловини та зміни властивостей пласта. Нарешті, хоча найбільш досконалі підходи включають кілька цільових функцій, можуть бути інші фактори, що впливають на продуктивність буріння, такі як споживання енергії, параметри безпеки або вплив на навколишнє середовище, які не враховуються в поточному процесі оптимізації.

1.5 Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналізу [47,82] вітчизняних та зарубіжних досліджень в області перспективних напрямків розвитку техніки і технологій гірничого виробництва виявлено значний потенціал для підвищення ефективності і покращення якості автоматизованого керування процесом буріння свердловин.

1. Сучасний розвиток гірничого виробництва опосередкований такими процесами, як цифровізація та впровадження комп'ютерно-інтегрованих кіберфізичних систем у традиційні геотехнології, а також в управління гірничодобувними підприємствами. Результатом такого переходу є стабілізація видобутку корисних копалин за умов коливань кон'юнктури сировинних ринків, широке впровадження ощадливого виробництва, розширення відновлюваної енергетики. Найважливішим елементом цього процесу є забезпечення отримання оперативної інформації про характеристики мінеральної сировини на всіх етапах її видобутку і переробки та формування ефективного автоматизованого керування технологічними операціями.

2. Швидкість буріння свердловини є ключовим показником ефективності процесу. Вища швидкість проходки (ROP) означає кращу продуктивність бурової установки, тому моделювання та прогнозування ROP має важливе значення для оптимізації операції буріння. Вдосконалення традиційних моделей та подальше їх корегування, використання гібридного підходу, що включає елементи нечіткої логіки та нейронні мережі для навчання моделей, додавання нових змінних, таких як, наприклад, параметри вібрації та питома енергія, використання нормалізаційних коефіцієнтів тощо, сприяє кращій відповідності між результатами моделювання та реальними значеннями.

3. Сучасний стан моніторингу процесу буріння свердловин характеризується наявністю різноманітних підходів щодо його технологічного та технічного забезпечення. Найбільш поширені непрямі вимірювання основних змінних процесу буріння можуть мати притаманну похибку до 30%, залежно, головним чином, від конструкції бурової установки та розташування сенсорів. Враховуючи складність мінералогічних та текстурно-структурних особливостей покладів залізної руди, як і раніше, залишається серйозною проблемою отримання оперативної достовірної інформації про їх характеристики та створення моделі фізики гірських порід, яка відображала б стан досліджуваного середовища для практичного використання.

4. Автоматизація процесу буріння потребує системного підходу, який інтегрує дані про свердловину та поверхню в реальному часі з досвідом та

моделями попереднього буріння. Різні гірські породи, варіації їх властивостей або геологічні аномалії можуть призвести до погіршенню ефективності моделі та її невідповідності до реальних умов. При виконанні бурових операціях робочі параметри бурової установки можуть коливатися через знос бурового долота, нестабільність стовбура свердловини та зміни властивостей пласта. Нарешті, при формуванні автоматизованого керування процесом буріння свердловин також мають враховуватися такі фактори як споживання енергії, параметри безпеки та вплив на навколишнє середовище.

На основі виконаного аналізу наукових джерел для визначення шляхів підвищення ефективності керування процесом буріння свердловин і покращення якості його моделювання та інформаційного забезпечення сформульовано наступні задачі дисертаційної роботи:

- розробити гібридну модель процесу буріння свердловин, аналітична частина якої симулює динаміку основних функціональних складових бурової установки, а нейро-нечітка структура використовується для визначення важкоформалізованої функції взаємодії «бурове долото - гірська порода»;
- розробити метод виділення інформативної складової взаємодії бурового долота з гірською породою в процесі буріння свердловин із супутнього вібраційного сигналу та обґрунтувати метод оперативної ідентифікації неефективності робочого режиму бурової установки на основі її спектрального аналізу;
- визначити характеристичні ознаки взаємодії бурового інструменту з гірською породою з використанням вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки, а також часових і спектральних характеристик вібрації долота та розробити метод розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин, заснований на класифікації характеристичних параметрів у векторному просторі ознак із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої структури;
- розробити автоматизовану дворівневу систему керування буровою установкою, нижній рівень якої утворюють замкнуті контури пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання основних змінних, а на верхньому

рівні використовується модельно-прогнозуюче керування для динамічного корегування їх заданих значень;

- розробити комп'ютерно-інтегровану технологію бурових робіт в залізорудному кар'єрі, що включає буріння розвідувальних та технологічних (вибухових) свердловин та забезпечує формування і підтримання оптимальної швидкості проходки шляхом модельно-прогнозуючого формування регулюючих дій та оперативного визначення основних мінералогічних різновидів залізної руди у родовищі.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

2.1. Принципи побудови та структура гібридної моделі процесу буріння свердловин

Обертальне буріння є стандартним методом, що використовується в гірничій промисловості при розвідці та видобутку корисних копалин. Бурові установки, що застосовуються в даний час, сильно розрізняються за своєю конструкцією, призначенням і можливостями. Стаціонарні бурові установки використовуються в основному для розвідувального буріння та при видобуванні вуглеводневої сировини, мобільні (пересувні) – для буріння експлуатаційних та вибухових свердловин (рис. 2.1) [83].

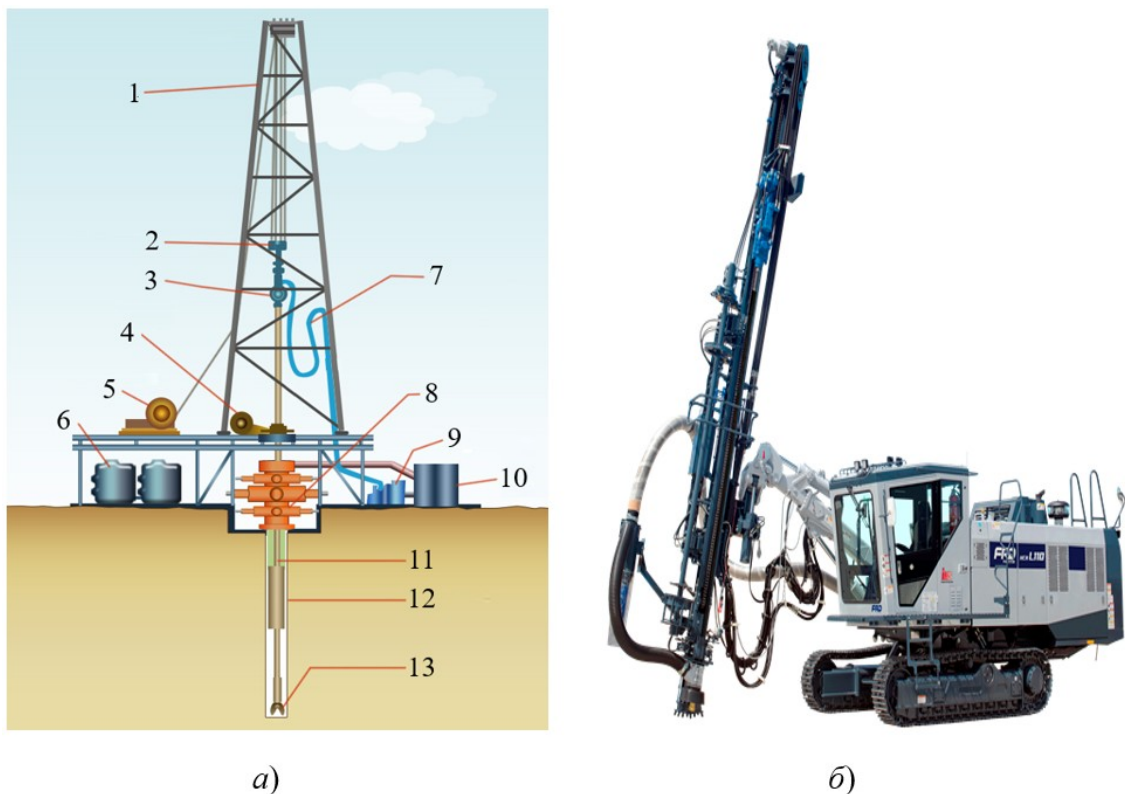


Рис. 2.1. Стаціонарна - (а) [84] та мобільна (пересувна) - (б) [85] бурові установки: 1- вишка; 2 – пересувний блок; 3 – вертлюг; 4 – роторний привід; 5 – лебідка; 6 – двигуни; 7 – напірна труба; 8 – обладнання для запобігання викидам; 9 – насос; 10 – буровий розчин; 11 – бурильна труба; 12 – обсадна колона; 13 – бурове долото

Однак, основними складовими частинами будь-якої бурової установки є: приводний силовий блок із трансмісією - А, бурова колона (штанга) - В та блок бурового інструменту - С (рис. 2.2) [83].

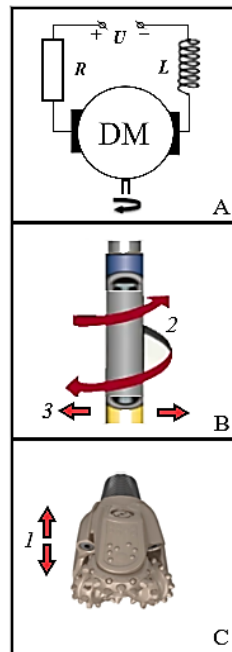


Рис. 2.2. Основні складові частини бурової установки та види її вібрацій в процесі буріння свердловин: 1 – поздовжні; 2 – крутильні; 3 – поперечні

Крім того, використовуються ряд систем, що забезпечують процес буріння: система очищення свердловини і транспортування зруйнованої гірської маси; система моніторингу стану бурової установки; система керування процесом буріння. Силовий блок забезпечує підйом і опускання бурового інструменту, а також формує крутний момент, який за допомогою бурильної колони (штанги) передається від приводного двигуна на буровий інструмент. Долото, що обертається, руйнує гірську породу, яка транспортується на поверхню гідравлічним (буровий розчин) або пневматичним (стиснене повітря) методом. Системи моніторингу стану та управління буровою установкою забезпечують її безперебійну експлуатацію та оптимізацію технічних та економічних показників процесу буріння.

Долото і бурильна колона (штанга) обертаються за допомогою двигуна з верхнім приводом на поверхні. Оскільки механічна енергія передається від поверхні до долота, це призводить до нелінійної взаємодії між бурильною

колоною та свердловиною, що викликає вібрацію бурильної колони. Поєднання маси, жорсткості та динамічних сил є факторами, які змушують систему вібрувати всіма можливими способами, а саме. аксіально, латерально та торсіонно (рис. 2.2).

Досягнення високих швидкостей проходки (ROP) є однією із основних цілей управління процесом буріння. ROP в першу чергу залежить від змін навантаження на долото (WOB) та швидкості обертання долота (RPM). Маючи на увазі весь можливий робочий діапазон змін WOB та RPM цей зв'язок є нелінійним [86]. Це зумовлено закономірностями взаємодії долота з гірською породою і її фізико-механічними характеристиками, що змінюються.

Проблемним питанням для вирішення завдання оптимального керування бурінням свердловин є оперативне визначення фізико-механічних характеристик гірської породи, що буриться.

Процес буріння свердловин, як об'єкт управління, може бути представлений у вигляді деякого оператора, що перетворює вектори вхідних змінних у вектори вихідних параметрів. У свою чергу результати процесу буріння можуть бути використані для визначення фізико-механічних характеристик рудної сировини, що видобувається, тобто визначальної інформації для наступних стадій її підготовки до металургійного переділу.

Кінцевим завданням автоматизованого управління процесом буріння є досягнення оптимальних технологічних та економічних показників. При цьому отриманий результат залежить від якості математичного опису об'єкта управління.

Результати аналізу існуючих моделей процесу буріння показують, що він характеризується наявністю багатьох змінних з нелінійними взаємозв'язками, безпосереднє визначення яких пов'язано із значними труднощами чи взагалі неможливо [87]. Наприклад, осьова модель швидкості проникнення у вертикальному напрямку ROP_v розглядається як загальна нелінійна функція

$$ROP_v = f_v(RPM, WOB, P, \alpha), \quad (2.1)$$

де: RPM - швидкість обертання бурильної колони; WOB - вага на долоті; P - параметри системи очистки свердловини; α - параметри моделі, що представляють такі фактори, як властивості породи, динаміку процесу, тип і розмір долота та інші.

Процедура очистки свердловини від уламків пробуреної породи із застосування бурового розчину (стаціонарні бурові установки) чи з використанням стиснутого повітря (мобільні бурові установки) є окремим питанням, розглядається у багатьох роботах і надалі у цьому дослідженні детально не розглядається.

Зазвичай для формалізації математичної моделі об'єкта управління використовуються рівняння стану системи [88]

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (2.2)$$

$$y = g(x), \quad (2.3)$$

де: $x = [x_1, \dots, x_n]^T$ - стан системи; $y = [y_1, \dots, y_n]^T$ - вихід системи; f та g - в загальному випадку нелінійні функції.

У випадку, коли відсутній адекватний аналітичний опис системи, що моделюється, управління має формуватися на підставі апроксимації функцій f та g . У гібридних моделях принципи моделювання типу «чорного ящика» використовуються для представлення важкоформалізованих складових моделі [89]. Стратегія гібридного моделювання цілком природно поєднується зі структурою аналітичної моделі, оскільки ця структура зазвичай ґрунтується на рівняннях балансу (наприклад, маси, енергії або моменту).

Нехай оберально-поступальний рух бурового долота спрямований нормально до вільної поверхні напівпростору (гірської породи) $Z > 0$ і вздовж своєї осі симетрії [90]. Передбачається, що порода має ізо- або ортотропну будову, а зміна її фізико-механічних властивостей по глибині (координаті Z) можна описати кусково-заданною функцією з кінцевим числом точок розриву 1-го роду з відповідними координатами z_n , $n = 1, 2, \dots, N$; де N - число шарів породи. Між точками розриву передбачається монотонна зміна властивостей породи, що описуються її параметрами міцності σ, τ, f (межа міцності на стиск,

показник міцності на зріз і коефіцієнт міцності породи за шкалою М.М. Протодяконова [91]). Результируюча сила $F(z(t))$ процесу взаємодії долота з гірською породою визначається в інтегральному вигляді зусиллям подачі та має вигляд інтегрального рівняння [83, 91, 92]

$$C_F \int_0^{z_0-z(t)} K_F(\zeta(t)) \sigma(z_0 - \zeta(t)) d\zeta = \phi_F(z(t)); z \geq z_0 - h(t), \quad (2.4)$$

де $C_F = \frac{1}{(h \cdot tg \phi_0)}$; $K_F = \beta_0 + \beta h(t(\zeta))$; $\phi_F(z) = \tilde{F}(t(z)) - C_F f_0 (\beta_0 + \beta h_0) [h_* - z_0 + z]/2$; $h_* \leq h(t)$.

Результиуюча моменту обертання $M(z(t))$ процесу взаємодії, що розвивається на долоті також має вигляд інтегрального рівняння

$$C_M \int_0^{z_0-z(t)} K_M(\zeta(t)) \tau_{cp}(z_0 - \zeta(t)) d\zeta = \phi_M(z(t)); z \geq z_0 - h(t), \quad (2.5)$$

де $C_M = \frac{1}{(h \cdot tg \phi_0)}$; $K_M = \alpha h(t(\zeta))$; $\phi_M(z) = \tilde{F}(t(z)) - C_M f_0 \alpha h_0 [h_* - z_0 + z]/2$; $h_* \leq h(t)$, а величини параметрів α , β_0 , β - обчислюються у процесі розв'язання задачі.

Інтегральні рівняння (2.4), (2.5) описують процес взаємодії долота з середовищем, що характеризується властивостями міцності, геометрія якого, в загальному випадку не має обмежень за винятком таких, що продиктовані практичними міркуваннями. Математична модель процесу включає як опис статичного, так і динамічного режимів взаємодії, а з погляду класу формалізації є системою інтегральних рівнянь Вольтерра 1-го роду [91]. Наведена модель енергоємного процесу взаємодії є по суті багатовимірною моделлю, оскільки фізичний процес взаємодії сам собою реалізується у просторі (хоча у спрощених випадках його доцільно моделювати як одномірний). Наведений конкретний процес моделюється як процес, що має дві незалежні просторові координати та одну змінну за часом. Математична модель допускає моделювання багатовимірного, $ID \geq 3$, динамічного процесу, у якого в ролі змінних можуть розглядатися узагальнені координати.

Наведені залежності (2.4), (2.5) дозволяють моделювати перехідні процеси режимів взаємодії долота з гірською породою, що виникають при переході

бурового інструменту з одного шару породи до іншого з відмінними від попереднього властивостями міцності. Ці процеси обумовлені як характеристиками бурової установки, так і властивостями гірської породи.

Ці рівняння визначають динаміку відповідних змінних стану і включають різні параметри. Деякі з цих параметрів безпосередньо пов'язані з регульованими або вимірюваними змінними, наприклад, зміни навантаження на долото WOB та швидкості обертання долота RPM. Навпаки, інші параметри (наприклад, фізико-механічні характеристики гірської породи) мають важкоформалізований взаємозв'язок з одним або декількома змінними станами та мають бути відповідно змодельовані, щоб отримати повну модель процесу.

Таким чином, для забезпечення оптимальної роботи бурової установки її математична модель повинна включати в себе взаємозв'язки «бурове долото - гірська порода», що безпосередньо не вимірюються та важко формалізуються

Ідентифікацію цих взаємозв'язків, враховуючи нестачу точних формалізованих знань, нелінійний характер поведінки, високий ступінь невизначеності та неявну залежність «вхід-вихід», доцільно проводити із застосуванням апарата нечіткої логіки методом двоетапної ідентифікації за допомогою нечітких баз знань [93,94].

Отриману таким чином структуру можна розглядати як шарувату мережу, яка має багато спільного зі звичайною нейронною мережею. Зазвичай зазначений підхід відносять до нейро-нечіткого моделювання [51].

Для вирішення задачі ідентифікації можуть бути використані найбільш поширені нечіткі системи типу Мамдані та Такагі-Сугено [94,95]. Нечітка система Мамдані має такий взаємозв'язок між входами і виходом із застосуванням лінгвістичних правил «if - then» [88]

$$R_j: \text{ If } x_1 \text{ is } P_1^k \text{ and } x_2 \text{ is } P_2^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } P_n^m, \text{ then } y = Q^j. \quad (2.6)$$

Нечіткі системи Такагі-Сугено (TS) є більш загальними, ніж нечіткі системи Мамдані. Фактично, можна показати, що системи Мамдані є окремими випадками нечітких систем TS. У системах TS наслідки правил не включають нечіткі множини, як системи Мамдані, а натомість є математичними виразами

$$R_i: \text{ If } x_1 \text{ is } P_1^K \text{ and } x_2 \text{ is } P_2^L \text{ and ... and } x_n \text{ is } P_n^M, \text{ then } q^i = f_i(\cdot), \quad (2.7)$$

де $f_i(\cdot)$ - функції без пам'яті $f_i(\cdot)$.

Чіткий вихід цієї системи такий [88]

$$y^{\text{crisp}} = \frac{\sum_{i=1}^R q^i \mu_i(x)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x)}, \quad (2.8)$$

де $\mu_i(x)$ – значення належності передумови правила i .

Чіткий вихідний сигнал можна виразити як

$$y^{\text{crisp}} = q^1 \xi_1(t) + q^2 \xi_2(t) + \dots + q^R \xi_R(t), \quad (2.9)$$

де $\xi_i(t)$ – нечіткі базисні функції [96]

$$\xi_i(t) = \frac{\mu_i(x(t))}{\sum_{i=1}^R \mu_i(x(t))}, \quad i = 1, \dots, R. \quad (2.10)$$

Функції $f_i(\cdot)$ є лінійними відносно вхідних даних

$$f_i(\cdot) = a_o^i + a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + \dots + a_n^i x_n, \quad (2.11)$$

де коефіцієнти a_j^i є константами.

При цьому вихідний сигнал y^{crisp} є нелінійною функцією вхідних даних $x_1, \dots, x_n$.

База знань у цій системі є гібридною: її правила містять посилки у вигляді нечітких множин та висновків у вигляді чіткої лінійної функції. Ця база знань може трактуватися як деяке розбиття простору впливаючих факторів на нечіткі підобласті, в кожній з яких значення функції відгуку розраховується як лінійна комбінація входів. Правила є свого роду перемикачами з одного лінійного закону "входи-вихід" на інший. Границі підобластей розмиті, отже одночасно можуть виконуватися кілька лінійних законів, але з різними вагами. Результуюче значення виходу y визначається як суперпозиція лінійних залежностей, що виконуються в цій точці x n -мірного факторного простору. Такий підхід особливо зручний у разі представлення моделі об'єкта управління як комбінації лінійних динамічних субмоделей його робочих режимів.

Припускаємо, що ідентифікована нелінійна залежність представлена вибіркою даних «входи-вихід» [51]

$$(X_i, y_r), r = \overline{1, M}, \quad (2.12)$$

де $X_r = (x_{r,1}, x_{r,2}, \dots, x_{r,n})$ - вектор входів та y_r - вихід у r -парі; M - обсяг вибірки.

Завдання ідентифікації полягає у знаходженні нечіткої моделі F , що забезпечує мінімальне значення середньоквадратичної нев'язки [97]

$$R = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_r - F(X_r))^2 \rightarrow \min, \quad (2.13)$$

де $F(X_r)$ - значення виходу нечіткої моделі при значенні входів, заданих вектором X_r .

Вихід нечіткої моделі залежить від її структури - бази знань та параметрів: функцій приналежності, реалізацій логічних операцій, методу дефазифікації, а також коефіцієнтів лінійних функцій у висновках правил моделі типу Такагі-Сугено. Знаходження структури та параметрів нечіткої моделі, що забезпечують мінімальне значення критерію, є завданням ідентифікації. Припустимо, що окрім числових пар «входи-вихід» існує ще й лінгвістична інформація про ідентифіковану залежність у формі експертних висловлювань. Позначимо через G вектор параметрів функцій приналежності термів вхідних змінних, через Q - вектор коефіцієнтів лінійних функцій у висновках правил моделі типу Такагі-Сугено. Тоді параметрична ідентифікація для моделі типу Такагі-Сугено зводиться до наступного завдання математичного програмування: знайти такий вектор, щоб [93, 97]

$$R = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_r - F(G, Q, X_r))^2 \rightarrow \min. \quad (2.14)$$

На керовані змінні (G, Q) накладаються обмеження, що забезпечують лінійну впорядкованість елементів множин.

Результуюча гібридна модель може бути сформульована відповідно до (2.2) наступним чином

$$\dot{x} = f_a(x, u, f_b(x, u, \theta)), \quad (2.15)$$

де f_a - аналітична частина моделі; f_b - частина моделі типу «чорної скриньки», яка задається вектором параметрів θ .

Для реалізації викладених принципів побудови гібридної моделі процесу буріння свердловин необхідно виконати аналітичний опис динаміки складових

частин бурової установки, а також нейро-нечітке моделювання функцій, що важко формалізуються, за допомогою яких задаються характеристики взаємозв'язків «бурове долото - гірська порода».

2.2. Визначення основних змінних та робочих режимів процесу буріння свердловин

Параметри буріння, такі як вага на долоті (WOB) і швидкість його обертання (RPM) під час виконання самого буріння, часто базуються на практиці польової експлуатації, а не розраховуються для формування оптимальних значень. Особливо це стосується процесу буріння експлуатаційних (вибухових) свердловин мобільними буровими установками. При цьому, якщо робочі значення WOB та RPM відрізняються від оптимальних, можна очікувати значного збільшення витрат, пов'язаних з бурінням [82].

Для формування оптимального керування бурінням свердловин необхідно визначити основні змінні та робочі режими цього процесу. Однією з найбільш повних та поширених моделей процесу буріння свердловин є BYM ROP [98].

Основне рівняння цієї моделі складається з 8 функцій, які діють і мають значний вплив на величину ROP [99]

$$ROP = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \cdot f_8 . \quad (2.16)$$

де: f_1 – ефект міцності пласта; f_2 – ефект глибини та ущільнення; f_3 – вплив порового тиску; f_4 – вплив перепаду тиску; f_5 – вплив діаметра долота і WOB; f_6 – вплив швидкості обертання; f_7 – вплив зносу зуба свердла; f_8 – ефект ударної сили гідравлічного струменя долота.

Функції у рівнянні (2.16) визначаються наступним чином

$$f_1 = e^{2.303 \cdot a_1}, \quad (2.17)$$

$$f_2 = e^{2.303 \cdot a_2 \cdot (TVD_N - TVD)}, \quad (2.18)$$

$$f_3 = e^{2.303 \cdot a_3 \cdot TVD^{0.69} \cdot (EPP - EPP_N)}, \quad (2.19)$$

$$f_4 = e^{2.303 \cdot a_4 \cdot TVD \cdot (EPP - ECD)}, \quad (2.20)$$

$$f_5 = \left[\frac{WOB_{sf}/OD_{bit} - (WOB_{sf}/OD_{bit})_t}{(WOB_{sf}/OD_{bit})_N - (WOB_{sf}/OD_{bit})_t} \right]^{a_5}, \quad (2.21)$$

$$f_6 = \left[\frac{\text{RPM}_{\text{sf}}}{(\text{RPM}_{\text{sf}})_N} \right]^{a_6}, \quad (2.22)$$

$$f_7 = e^{-a_7 \cdot h}, \quad (2.23)$$

$$f_8 = \left[\frac{F_j}{(F_j)_N} \right]^{a_8}, \quad (2.24)$$

де TVD - справжня вертикальна глибина; TVD_N - значення нормалізації справжньої вертикальної глибини; EPP - фактичний еквівалентний градієнт порового тиску; EPP_N - фактичне значення нормалізації еквівалентного порового тиску; ECD - фактична еквівалентна циркулююча щільність; WOB_{sf} - виміряна вага поверхні в бітах; OD_{bit} - зовнішній діаметр свердла; $(\text{WOB}_{\text{sf}}/\text{OD}_{\text{bit}})_N$ - нормалізоване значення ваги долота стосовно його зовнішнього діаметра; RPM_{sf} - виміряна швидкість обертання поверхні бурильної колони; $(\text{RPM}_{\text{sf}})_N$ - нормалізоване значення швидкості обертання поверхні бурильної колони; h - параметр, що оцінює частковий знос зуба; F_j - ударна сила гідравлічного струменя, що прикладається до долота; a_1 - коефіцієнт міцності пласта та властивостей бурового розчину; a_2 - нормальний коефіцієнт тенденції ущільнення; a_3 - недоущільнення та коефіцієнт порового тиску; a_4 - коефіцієнт диференціального тиску; a_5 - константа, що залежить від умов буріння, WOB і поведінки кривої бурового долота; a_6 - константа, що залежить від умов буріння та поведінки кривої обертів на хвилину; a_7 - коефіцієнт зносу зуба; a_8 - гідравлічний коефіцієнт.

Вираз f_1 в першу чергу представляє вплив міцності пласта на швидкість проходки ROP. Також він представляє деякі параметри, які не були окремо змодельовані. Вираз f_2 моделює вплив ущільнення на ROP, припускаючи експоненціальне зменшення ROP з глибиною у нормально ущільненому пласті. Вираз f_3 моделює вплив ущільнення на ROP, припускаючи експоненціальне збільшення ROP зі збільшенням градієнта порового тиску. Нижчий ROP в основному пов'язаний з напругою розкривних порід, отже, вказуючи на більш ущільнений і менш пористий інтервал. Вираз f_4 відображає вплив перепаду тиску на дні свердловини на ROP. Підвищений тиск у вибої свердловини може

мати негативний вплив на ROP, оскільки шлам може утримуватися на вибої, таким чином збільшуючи тертя та знос зубів бурових долот, а також знижуючи ефективність очищення свердловини. Вираз f_5 моделює вплив ваги на долоті та діаметра долота на швидкість проникнення. Збільшений WOB має експоненціальну та пропорційну реакцію на ROP. Важливо також, що швидкість проходки залежить від розміру отвору, ROP має обернено пропорційне відношення до розмірів бурового долота. Вираз f_6 відображає вплив швидкості обертання на ROP. Припускається, що збільшена швидкість обертання прямо пропорційна та експоненціальна швидкості проникнення. Як правило, після максимального збільшення обертів (точка заснування) це негативно впливає на ROP; вібрація також може бути відповідальним фактором. Вираз f_7 відображає вплив зносу зубів долота на швидкість проникнення. На знос зубів впливають абразивність утворення, геометрія зуба, маса насадки, швидкість обертання та процеси очищення. Наведена модель розроблена для бурових установок, що використовують бурові розчини для очищення та транспортування шламу, який формується при бурінні свердловин. Отже вираз f_8 моделює вплив гідравліки долота на швидкість проходки. Збільшена реактивна сила передбачає краще очищення зубів бурового долота на дні отвору, а також кращі гідравлічні умови для транспортування шламу на поверхню завдяки підтримці всієї області навколо бурового долота та бурильної колони більш чистою, уникаючи різниці прилипання та зменшення швидкості тертя.

Таким чином, модель буріння є функцією багатьох змінних, і лише деякі з них (наприклад, WOB і RPM) можуть бути змінені оператором буріння чи відповідною системою автоматичного керування. Також слід зазначити, що існує багато чинників, які визначаються реальними умовами буріння (фізико-механічні характеристики гірського масиву, стан бурового інструменту) і не можуть бути передбачені та застосовані в моделі заздалегідь. За таких умов одним із методів полегшення параметричної ідентифікації моделі та

покращення умов формування керуючих впливів є використання робочих режимів відповідного процесу.

Як показано у роботі [100] для різних типів бурових доліт можна спостерігати три фази ефективності буріння, пов'язані з реакцією ROP на зміну WOB та RPM. Під час процесу буріння вага прикладається до долота, що веде до того, що фрези постійно вриваються в породу. Крім того, обертання долота призводить до бічного переміщення різців із руйнуванням породи. Фаза R1 є типовою для неефективного буріння через недостатню навантаження на долото. При низьких значеннях WOB має місце недостатня глибина проникнення долота у гірську породу, що спричиняє більший рівень тертя. Тобто у цій фазі буріння переважає скребковий механізм, низьке навантаження на долото разом із вищим рівнем тертя призводять до марного витрачання енергії, низьких показників ROP, що вказує на неефективність процесу буріння.

Фаза R2 є типовою для ефективного буріння, де існує лінійна залежність між WOB і ROP. У цій фазі, завдяки належним, достатньо високим значенням WOB, задіяно кілька механізмів буріння, включаючи сколювання, подрібнення та шабрування, що зменшує роботу, яка витрачається на тертя, і призводить до вищих показників ROP. Енергія у цій фазі ефективно використовується для руйнування гірських порід.

При подальшому підвищенні ROP, коли великий об'єм породи буриться за короткий період часу, не вдається видалити весь буровий шлам до того, як він повторно опиниться під долотом. У фазі R3 при збільшенні WOB співвідношення між WOB і ROP відхиляється від лінійної реакції через недостатнє очищення вибою. Переходу процесу буріння у фазу R3 також сприяють зміна літології, вібрація тощо. Ця фаза, як і фаза R1, також характеризується низькою ефективністю використання задіяної енергії [101].

На рис. 2.3 схематично наведено взаємозв'язок між швидкістю проходки ROP та навантаженням на долото WOB і швидкістю його обертання RPM [100].

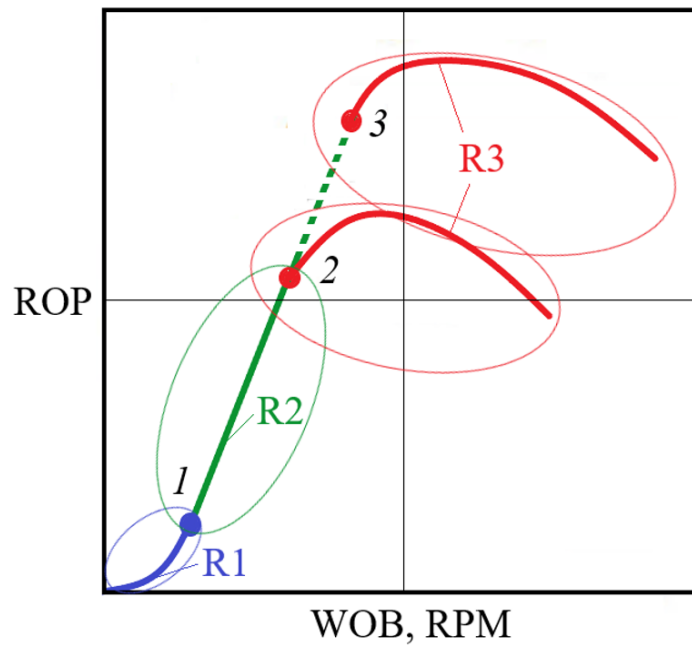


Рис. 2.3. Визначення робочих режимів процесу буріння свердловин: R1-початкова фаза; R2 - фаза ефективного буріння; R3 - фаза неефективного буріння

Порогове значення навантаження на долото WOB_t , що є точкою переходу між фазою R1 неефективної області буріння, і фазою R2 області ефективного буріння визначається виразом [102, 103]

$$WOB_t = WOC_t \times NOC, \quad (2.25)$$

де: WOC_t и NOC - порогове навантаження на різці та кількість різців.

Для однієї фрези порогову вагу WOC_t , необхідну для створення порогової глибини різання DOC_t , можна розрахувати за такими рівняннями

$$WOC_t = 270 \times \left(\frac{\Omega_{RPM}}{80} \right)^{0.1} \times \frac{11}{NOC} \times \left(\frac{\tan(BR)}{\tan(25^\circ)} \right)^{0.2} \times \frac{D_c}{0.51} \times \frac{UCS}{28000}, \quad (2.26)$$

$$DOC_t = 0.018 \times \left(\frac{80}{\Omega_{RPM}} \right)^{0.3} \times \frac{11}{NOC} \times \frac{D_c}{0.51}, \quad (2.27)$$

де: Ω_{RPM} , BR , D_c та UCS - швидкість обертання поверхні в об/хв, задній кут у градусах, діаметр фрези та міцність на необмежений стиск.

Порогова швидкість проникнення ROP_t може бути розрахована на основі значень порогової ваги різця WOC_t та граничної глибини різання DOC_t з використанням рівняння [101]

$$ROP_t = DOC_t \times \Omega_{RPM} \times 5. \quad (2.28)$$

Ці граничні значення є відправною точкою ефективного буріння (фаза R2). На основі порогового значення швидкості проходки ROP_t рівняння швидкості проходки, що є умовним рівнянням, може бути визначено для фаз неефективного та ефективного буріння відповідно, як показано нижче [101]

$$ROP = \begin{cases} 2 \times 10^{-6} \times G \times \frac{\Omega_{RPM}^{0.7} \times WOB_0^{2.6}}{UCS \left[1 + 0.3 \left(\frac{\Omega_{RPM}}{100} \right) \right]} ; \\ WOB < WOB_t \rightarrow \text{Фаза I} ; \\ G \times \frac{\Omega_{RPM} \times (WOB_0 - WOB_t)}{UCS \left[1 + 0.3 \left(\frac{\Omega_{RPM}}{100} \right) \right]} + ROP_t ; \\ WOB \geq WOB_t \rightarrow \text{Фаза II} \end{cases}, \quad (2.29)$$

де: G - коефіцієнт геометрії долота, що розраховується, як показано нижче

$$G = 880 \times \frac{NOB^{0.3}}{NOC^{1.05}} \times \frac{D_c \times \cos(SR)}{D_b^2 \times (\tan(BR))^{0.2}}. \quad (2.30)$$

Швидкість проникнення ROP для фаз R1 і R2 розраховується за формулою (2.29). Коли прикладене навантаження на долото перевищує порогове значення навантаження на долото, використовуватиметься рівняння фази II механічної швидкості проходки, інакше використовуватиметься рівняння фази R1. Це пов'язані рівняння осьових і крутильних рухів бурильної колони. Параметр тертя може бути розрахований з використанням нахилу TOB до WOB та лінійного графіка швидкості обертання поверхні. Міцність у необмеженому стисканні UCS розраховується з використанням емпіричної залежності [104]

$$UCS = 0.033 \times V_p - 34.83, \quad (2.31)$$

де: UCS - в МПа; V_p - швидкість поздовжньої хвилі для породи в м/с.

Використання багатьох емпіричних даних та залежностей (наприклад, (2.31), які потрібно визначати виключно для конкретної бурової установки, стану обладнання та невизначеність стосовно ідентифікації фази R3 неефективної області буріння є недоліком розглянутого методу.

Наведений у підрозділі 2.1 підхід дозволяє значною мірою позбутися наведених недоліків. Цей підхід використаний для ідентифікації нелінійної дискретно-динамічної системи, що відповідає робочим режимам бурової установки, із застосуванням різницевого рівняння «вхід-вихід».

За цим методом нечітка система типу TS з R_i правилами представлена у вигляді [88]

R_i : If $y(k)$ is P_1^K and $y(k-1)$ is P_2^L and ... and $y(k-n+1)$ is P_n^M , then

$$y^i(k+1) = \alpha_{i,1}y(k) + \alpha_{i,2}y(k-1) + \dots + \alpha_{i,n}y(k-n+1) + \beta_{i,1}u(k) + \beta_{i,2}u(k-1) + \dots + \beta_{i,m}u(k-m+1), \quad (2.32)$$

де: $y(k), \dots, y(k-n+1)$ – поточні та минулі виходи об'єкта; $u(k), \dots, u(k-m+1)$ – поточні та минулі вхідні дані об'єкта.

Ця нечітка система створює змінну в часі дискретну систему, що описується різницеvim рівнянням

$$y(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^R \mu_i(y(k), \dots, y(k-n+1)) y^i(k+1)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(y(k), \dots, y(k-n+1))} \quad (2.33)$$

де $\mu_i(y(k), \dots, y(k-n+1))$ – значення належності до передумови R_i (2.32).

Таким чином, система дискретного часу, створена нечіткою системою TS, є [88]

$$y(k+1) = \alpha_1 y(k) + \alpha_2 y(k-1) + \dots + \alpha_n y(k-n+1) + \beta_1 u(k) + \beta_2 u(k-1) + \dots + \beta_m u(k-m+1), \quad (2.34)$$

де $\alpha_1 = \alpha_{1,1}\xi_1(k) + \alpha_{2,1}\xi_2(k) + \dots + \alpha_{R,1}\xi_R(k)$,

$\alpha_2 = \alpha_{1,2}\xi_1(k) + \alpha_{2,2}\xi_2(k) + \dots + \alpha_{R,2}\xi_R(k)$,

⋮

$\alpha_n = \alpha_{1,n}\xi_1(k) + \alpha_{2,n}\xi_2(k) + \dots + \alpha_{R,n}\xi_R(k)$,

$\beta_1 = \beta_{1,1}\xi_1(k) + \beta_{2,1}\xi_2(k) + \dots + \beta_{R,1}\xi_R(k)$,

$\beta_2 = \beta_{1,2}\xi_1(k) + \beta_{2,2}\xi_2(k) + \dots + \beta_{R,2}\xi_R(k)$,

⋮

$\beta_m = \beta_{1,m}\xi_1(k) + \beta_{2,m}\xi_2(k) + \dots + \beta_{R,m}\xi_R(k)$,

а нечіткі базисні функції задаються як [96]

$$\xi_j(t) = \frac{\mu_j(k)}{\sum_{j=1}^R \mu_j(k)}, \quad j = 1, \dots, R. \quad (2.35)$$

Застосування наведеного підходу щодо визначення робочих режимів бурової установки у системі автоматизованого керування процесом буріння

свердловин розглянуто у розділі 4. Інший метод ідентифікації фази R3 неефективної області буріння наведено у розділі 3.

2.3. Моделювання головних функціональних складових бурової установки

При обертальному способі буріння має місце реалізація п'яти механізмів взаємодії робочого органу установки з гірською породою:

- втискання інструменту, залежить від величини межі міцності породи на стиск;
- зріз шару породи, залежить від показника міцності породи на зріз;
- ударне сколювання породи, залежить від сили удару різця долота;
- тертя інструменту об стінки свердловини, визначається величиною глибини буріння;
- видалення бурового шламу із вибою, нелінійно залежить від глибини свердловини [82].

Наведена сукупність механізмів взаємодії робочого органу бурової установки з гірською породою призводить до складної динаміки рухів її основних функціональних блоків, що включає обертові та поступальні складові. Її динамічна модель може бути представлена у вигляді сукупності з'єднаних елементарних базових коливальних блоків, що складаються з пружини k (засобів для зберігання потенційної енергії), маси m або інерції J (засобів для зберігання кінетичної енергії) та демпфера c (засобів, за допомогою якого енергія поступово губиться) (рис. 2.4) [47, 83].

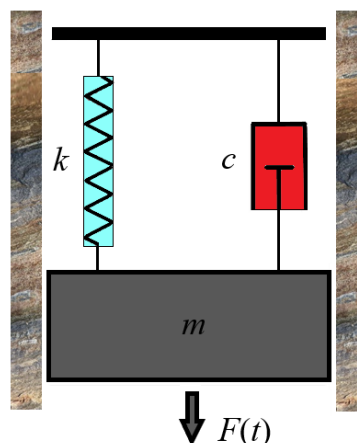


Рис. 2.4. Модель базового коливального блоку

Періодична сила $F(t)$, що діє на наведену систему, може бути виражена через гармонійні функції з використанням ряду Фур'є наступним чином [105]

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt). \quad (2.36)$$

Тоді стаціонарне рішення щодо наведеної схеми можна записати як

$$\begin{aligned} x_p(t) = & \frac{a_0}{2k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n/k}{\sqrt{(1-r_n^2)^2 + (2\zeta r_n)^2}} \cos(nwt - \psi_n) + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n/k}{\sqrt{(1-r_n^2)^2 + (2\zeta r_n)^2}} \sin(nwt - \psi_n). \end{aligned} \quad (2.37)$$

У процесі буріння параметри демпфування змінюються (взаємодія бурового долота з гірською породою, тертя бурової колони об стінки свердловини, рух взаємопов'язаних частин бурової установки), що призводить до змін параметрів відклику системи на прикладений силовий вплив. На рис. 2.5, 2.6 наведено залежність фазового кута та безрозмірної величини відклику на гармонійний сигнал від співвідношення частот r для різних значень коефіцієнту демпфування ζ від 0,1 до 1.0

$$r = \frac{w}{w_n}. \quad (2.38)$$

При цьому величина безрозмірного відгуку задається як пропускна здатність [105,106]

$$\frac{|X(iw)|}{A} = \left[\frac{1 + \left(\frac{2\zeta w}{w_n}\right)^2}{1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2 + \left(\frac{2\zeta w}{w_n}\right)^2} \right], \quad (2.39)$$

де A – амплітуда гармонійного впливу; ζ – коефіцієнт демпфування.

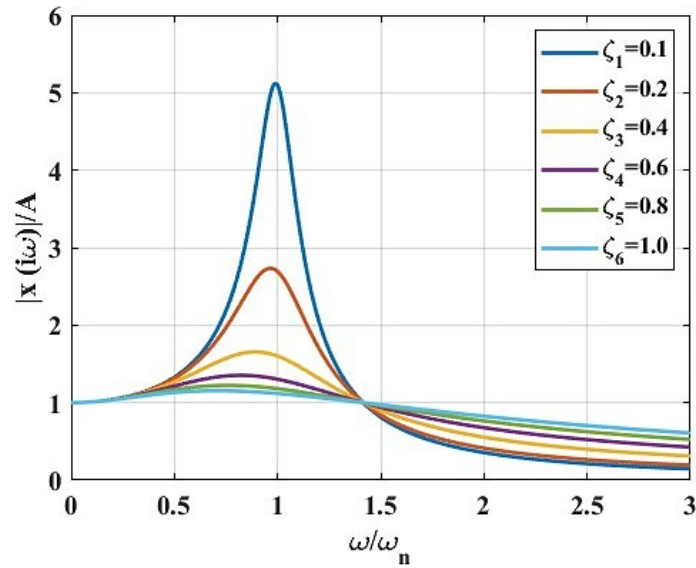


Рис. 2.5. Залежність безрозмірної величини відклику коливальної системи на гармонійний сигнал від співвідношення частот γ

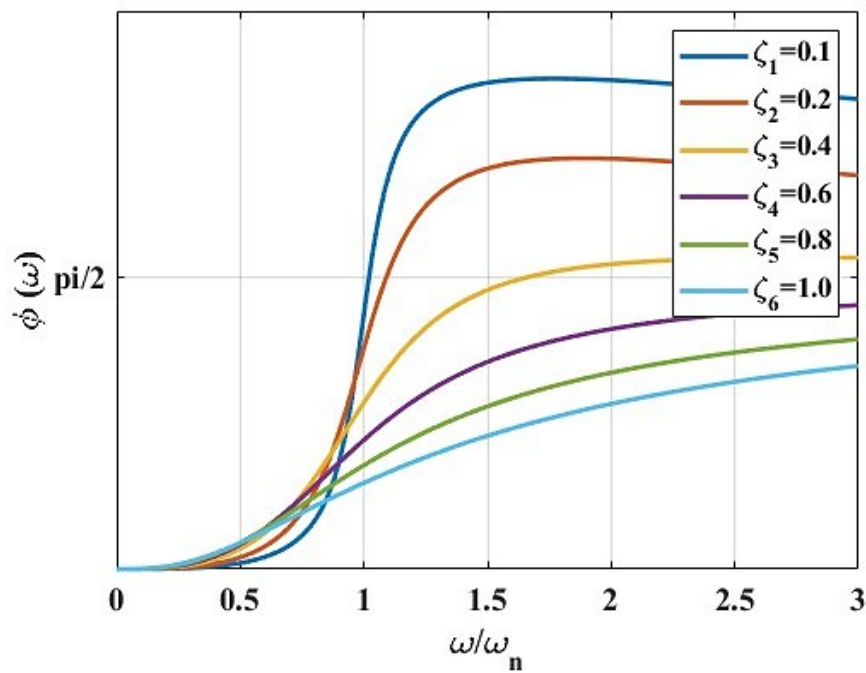


Рис. 2.6. Залежність фазового кута відклику на гармонійний сигнал від співвідношення частот γ

Фазовий кут ϕ визначається виразом

$$\phi(w) = \tan^{-1} \left[\frac{2\zeta \left(\frac{w}{w_n}\right)^2}{1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2 + \left(\frac{2\zeta w}{w_n}\right)^2} \right]. \quad (2.40)$$

Використання наведеного підходу дозволяє моделювати параметри динаміки бурового інструменту в процесі взаємодії із гірською породою, що є характеристичними ознаками цього процесу.

Динамічну модель бурової установки можна представити у вигляді структури, що симулює: рух приводної системи в надземній частині, рух бурового інструменту в свердловинній частині та вплив динаміки бурового долота на рух інших функціональних складових бурової установки [82]

2.3.1. Моделювання руху приводної системи бурової установки

Електромеханічна система приводу бурової установки складаються з трьох частин: силової головки, коробки передач і двигуна. Рівняння руху системи має вигляд [82, 107]

$$J_r \ddot{\theta}_r + c \dot{\theta}_r + K \theta = T_m, \quad (2.41)$$

$$b \Omega_{ref} + u = T_m, \quad (2.42)$$

$$J_r = J_{rot} + n^2 J_m, \quad (2.43)$$

де: φ_r - кутове зміщення силової головки, rad; φ_b - кутове зміщення долота, rad; φ - кутові зміщення між φ_r і φ_b , rad; J_r - еквівалентний момент інерції силової головки, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; J_m - момент інерції двигуна, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; J_{rot} - момент інерції силової головки, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; c - коефіцієнт демпфування силової головки, $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$; u - вхідний сигнал, $\text{N} \cdot \text{m}$; Ω_{ref} - задана швидкість долота, rad/s ; T_m - рухомий момент двигуна, $\text{N} \cdot \text{m}$; K - коефіцієнт жорсткості на кручення бурильної колони, $\text{N} \cdot \text{m/rad}$.

У процесі буріння свердловин регулювання швидкості обертання бурового інструменту має важливе значення для пристосування до варіацій, що виникають у різних геологічних шарах. Поширеним приводом у бурових установках є двигун постійного струму. Він безпосередньо забезпечує обертовий рух і разом із відповідною трансмісією може забезпечувати поступальний рух. Електрична еквівалентна схема двигуна постійного струму показана на рис. 2.7 [108].

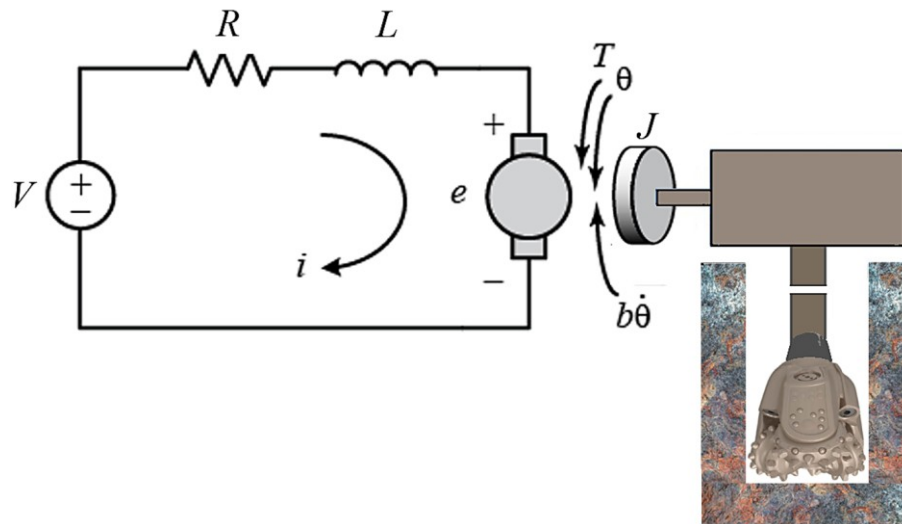


Рис. 2.7. Електрична еквівалентна схема приводу бурової установки на основі двигуна постійного струму

На рис. 2.7 та наведених далі рівняннях використані такі позначення: J - момент інерції ротора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; b - константа в'язкого тертя двигуна, Нм ; K_e - стала електрорушійної сили, В/рад/с ; K_t - постійний крутний момент двигуна, Нм/А ; R - електричний опір, Ом ; L - електрична індуктивність, Н .

Розглядається система, входом якої є джерело напруги V , прикладене до якоря двигуна, а виходом - швидкість обертання валу $\dot{\theta}$. Ротор і вал вважаються жорсткими. Застосовується модель в'язкого тертя, тобто момент тертя пропорційний кутовій швидкості валу. Розглядається двигун з якірним керуванням. Тоді

$$T = K_t i . \quad (2.44)$$

Зворотна ЕРС e пропорційна кутовій швидкості валу

$$e = K_e \dot{\theta} . \quad (2.45)$$

Оскільки в одиницях СІ константи крутного моменту двигуна та зворотної ЕРС рівні, далі використовується позначення K для представлення як константи крутного моменту двигуна, так і константи зворотної ЕРС.

Відповідно до рис. 2.7 справедливі рівняння на основі 2-го закону Ньютона та закону Кірхгофа [107,108]

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K i , \quad (2.46)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K \dot{\theta} . \quad (2.47)$$

Застосовуючи перетворення Лапласа, на основі наведених вище рівнянь можна отримати наступну передатну функцію розімкнутого циклу

$$P(s) = \frac{\dot{\theta}(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js+b)(Ls+R)+K^2} \left[\frac{\text{rad/s}}{V} \right]. \quad (2.48)$$

У формі простору станів наведені вище рівняння мають наступний вигляд

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V, \quad (2.49)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

Наведена на рис. 2.7 модель приводу бурової установки на основі двигуна постійного струму змодельована за допомогою блоків фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink® /MATLAB® [109]. Блоки в бібліотеці Simscape фактично представляють фізичні компоненти; отже, складні багатодоменні моделі можна побудувати без необхідності виводити математичні рівняння на основі фізичних принципів. На рис. 2.8 наведена Simscape модель силового блоку бурової установки із двигуном постійного струму [82].

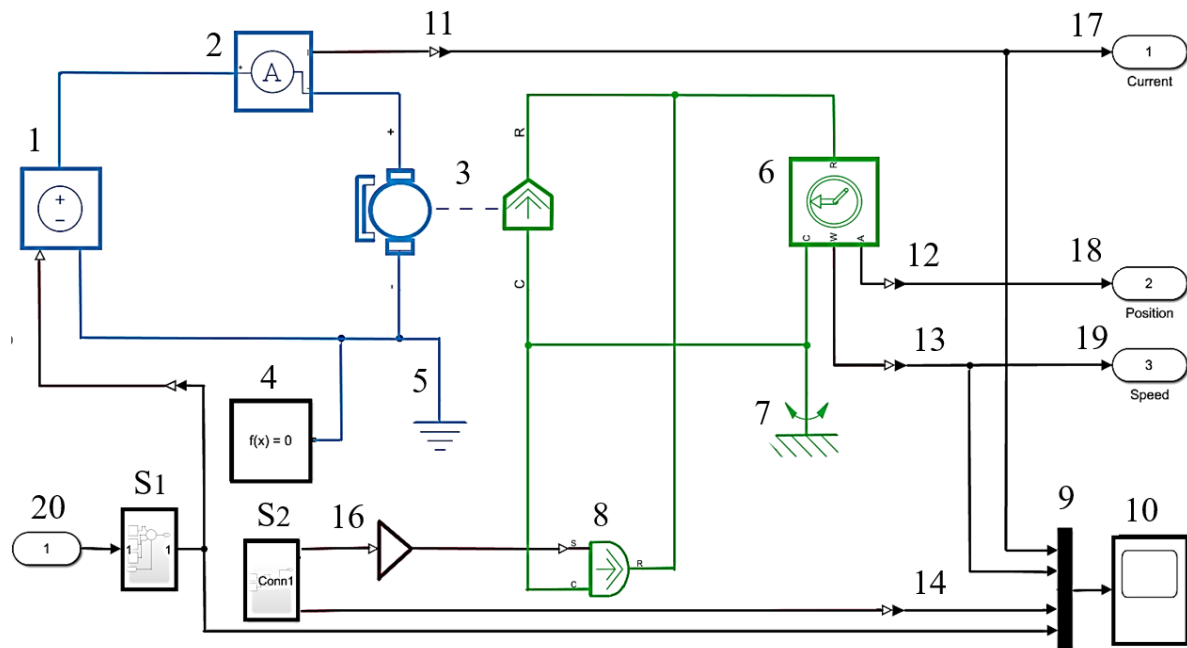


Рис. 2.8. Simscape модель силового блоку бурової установки із двигуном постійного струму

У наведеній на рис. 2.8 моделі використані наступні елементи: 1 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sources; 2 - блок Current Sensor із бібліотеки Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sensors; 3 - блок DC Motor із бібліотеки Simscape/Electronics/Actuators & Drivers/Rotational Actuators; 4 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape/Utilities; 5 - блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Elements; 6 - блок Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape/Foundation Library/Mechanical/Mechanical Sensors; 7 – блок Mechanical Rotational Reference із бібліотеки Simscape/Foundation Library/Mechanical/Rotational Elements; 8 – Ideal Torque Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 9 – блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 10 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks; 11,12,13,14 - блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 15 - блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 16 – блок PS Gain із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Physical Signals / Functions 17,18,19 - блоки Out In із бібліотеки Simulink/Ports & Subsystems; 20 - блок In із бібліотеки Simulink/Ports & Subsystems..

Блок двигуна постійного струму моделює як електричні, так і механічні характеристики двигуна. Блок контрольованого джерела напруги формує напругу на якорі двигуна. Ідеальний датчик обертального руху являє собою пристрій, який вимірює різницю кутових положень і кутових швидкостей між двома вузлами. У наведеній моделі цей блок використовується для вимірювання положення та швидкості валу двигуна порівняно з фіксованим еталонним значенням, представленим блоком Mechanical Rotational Reference block. Блок датчика струму Current Sensor використовується для вимірювання струму, споживаного двигуном. Довідковий блок Electrical Reference block виконує функції аналогічні блоку Mechanical Rotational Reference block але стосовно електричних функцій моделі. Блоки PS-Simulink перетворюють фізичні сигнали у вихідні сигнали Simulink, а блок Simulink-PS навпаки

перетворює вхідний сигнал Simulink у фізичний сигнал. Блок конфігурації розв'язувача Solver Configuration використовується для визначення деталей чисельного вирішувача, під час моделювання Simscape. Блоки Out та In використовуються для інформаційної комунікації з робочою областю Matlab.

Для моделювання змін робочих режимів силового блоку використано сформовані підсистеми з набором типових впливів та збурень: Subsystem S1 - на електричній стороні моделі та Subsystem S2 – на її механічній стороні.

На рис. 2.9 наведено результати моделювання типових режимів роботи силового блоку: зміни прикладеної напруги (*a*); відповідні зміни величини струму якоря (*b*); зміни навантаження на механічній стороні (*c*) та зміни швидкості обертання ротора з перешкодами у вимірюваному сигналі (*d*). Отримані результати свідчать про необхідність застосування системи автоматичного керування приводом для забезпечення підтримки визначеної відповідно до застосованого критерію швидкості обертання бурового інструменту в незалежності від змін навантаження на нього, збурень та перешкод у вимірюваному сигналі [82].

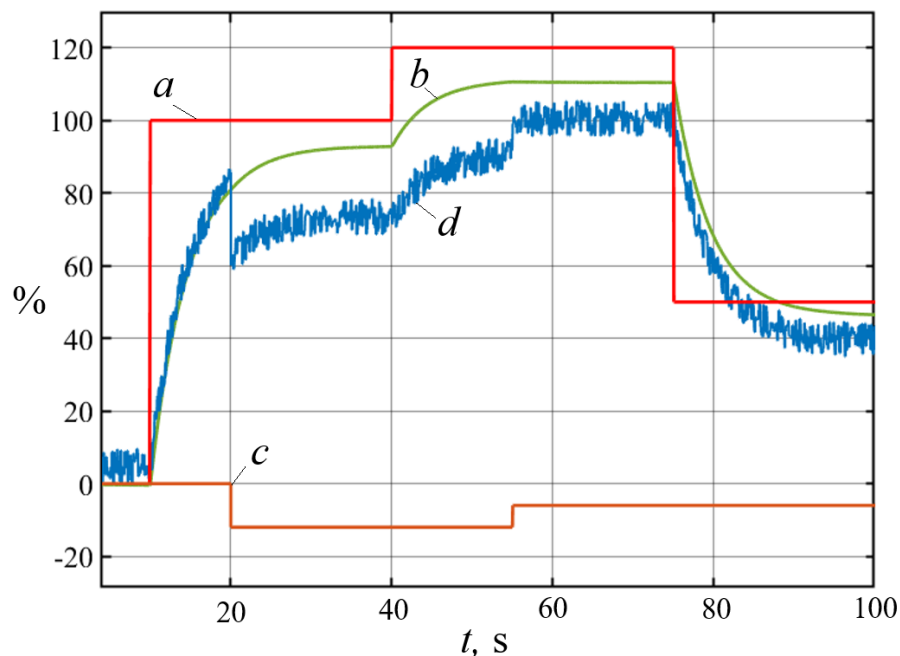


Рис. 2.9. Результати моделювання типових режимів роботи силового блоку бурової установки із двигуном постійного струму (нормалізовані змінні відносно первісного значення): *a* - зміна прикладеної напруги; *b* - зміна

величини струму якоря; c - зміна механічного навантаження; d - зміна швидкості обертання ротора з перешкодами у вимірюваному сигналі

Наведена модель використана у подальшому синтезі автоматизованого керування буровою установкою у розділі 4.

2.3.2. Моделювання руху свердловинної частини бурової установки

Поширеним підходом щодо моделювання бурової колони є представлення її зосередженою масою, яка складається з двох ступенів свободи. Такий підхід може бути проілюстрований Simscare моделлю з еквівалентною масою та жорсткістю для осьового (рис. 2.10, *a*) та крутильного (рис. 2.10, *b*) рухів [82,102,109,110].

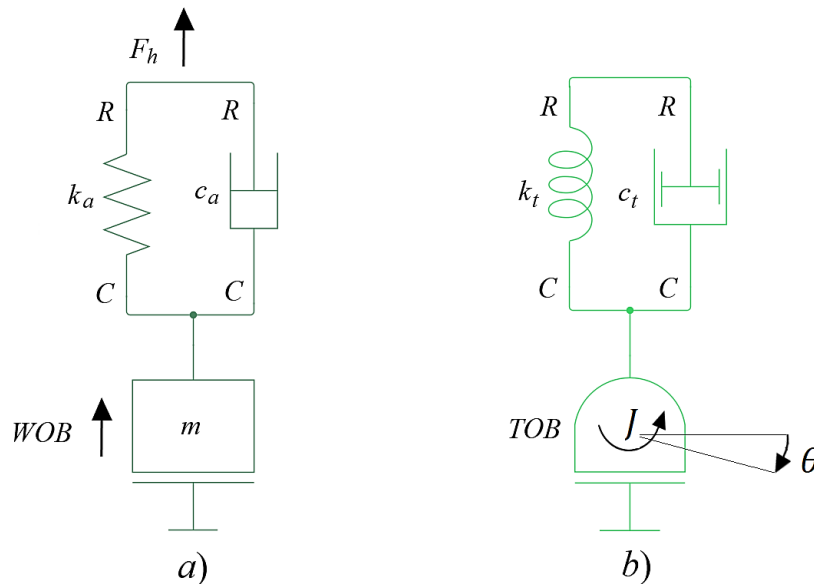


Рис. 2.10. Модель бурової колони із зосередженими параметрами для (а) осьового та (b) крутильного рухів

У цьому випадку рівняння руху для осьового та крутильного рухів бурової колони мають наступний вигляд [102, 110, 111]

$$m\ddot{x} + c_a\dot{x} + k_a(x - v_0 \times t) = -WOB, \quad (2.51)$$

$$J\ddot{\theta} + c_t\dot{\theta} + k_t(\theta - \Omega \times t) = -TOB, \quad (2.52)$$

де $m, x, J, c_a, c_t, k_a, k_t, v_0, \theta, \Omega$ - відповідно ефективна маса бурової колони, осьове зміщення, ефективний полярний момент інерції, коефіцієнт демпфування при осьовому русі, коефіцієнт демпфування при крутильному

русі, осьова жорсткість, жорсткість на кручення, початкова осьова швидкість, кутове зміщення долота і швидкість обертання поверхні в радіанах за секунду (RPS).

Осьові та крутильні рівняння руху (2.51), (2.52) пов'язані за рахунок сил взаємодії долота.

Однак, враховуючи довжину бурової колони (особливо це стосується стаціонарних бурових установок), для визначення складних нелінійних рухів, що виникають у процесі буріння, її модель доцільно представити у вигляді розподіленої сукупності зосереджених мас на валу, окремі частини якого можуть мати свої особливі характеристики [51, 112].

Із метою реалізації такого підходу для моделювання бурової колони (штанги), як структури з розподіленими параметрами, використаний блок Flexible Shaft із бібліотеки Simscape / Driveline / Couplings & Drives [109, 113]. Цей блок являє собою вал з податливістю на кручення і вигин. Вал закручується у відповідь на прикладений крутний момент і згинається у відповідь на статичний дисбаланс маси. Скручування затримує передачу потужності між кінцями валу, змінюючи динамічну реакцію системи.

Ця модель ділить вал на різні елементи, які з'єднуються між собою за допомогою паралельних пружинних амортизаторів. Елементи забезпечують інерцію валу, а системи пружинних демпферів забезпечують податливість валу.

Блок дозволяє моделювати податливість в однорідному або аксіально неоднорідному валу. Аксіально неоднорідний вал - це такий, для якого будь-який із цих атрибутів змінюється по довжині валу: жорсткість на кручення; крутильна інерція; жорсткість на вигин; щільність; модуль зсуву; модуль Юнга; зовнішній діаметр; внутрішній діаметр.

Для торсійної моделі блок гнучкого валу наближає розподілені безперервні властивості валу за допомогою методу зосереджених мас. Модель містить кінцеву кількість N , послідовно згрупованих пружинних елементів FE із демпфуванням інерції, плюс остаточну інерцію. Результатом є сукупність $N+1$

моментів інерції, з'єднаних N обертовими пружинами та N обертовими демпферами (рис. 2.11) [82, 113].

Кожен гнучкий елемент l_{FE_i} , являє собою коротку секцію валу і містить: одну пружину k_{FE_i} , для податливості на кручення (всього в мережі N пружин); один демпфер b_{FE_i} , для демпфування матеріалу (всього мережа має N заслінок); два моменти інерції I_{FE_iC} та I_{FE_iR} для опору обертанню. Інерції сусідніх гнучких елементів консоліднуються разом так, що мережа має загальну кількість інерцій $N+1$.

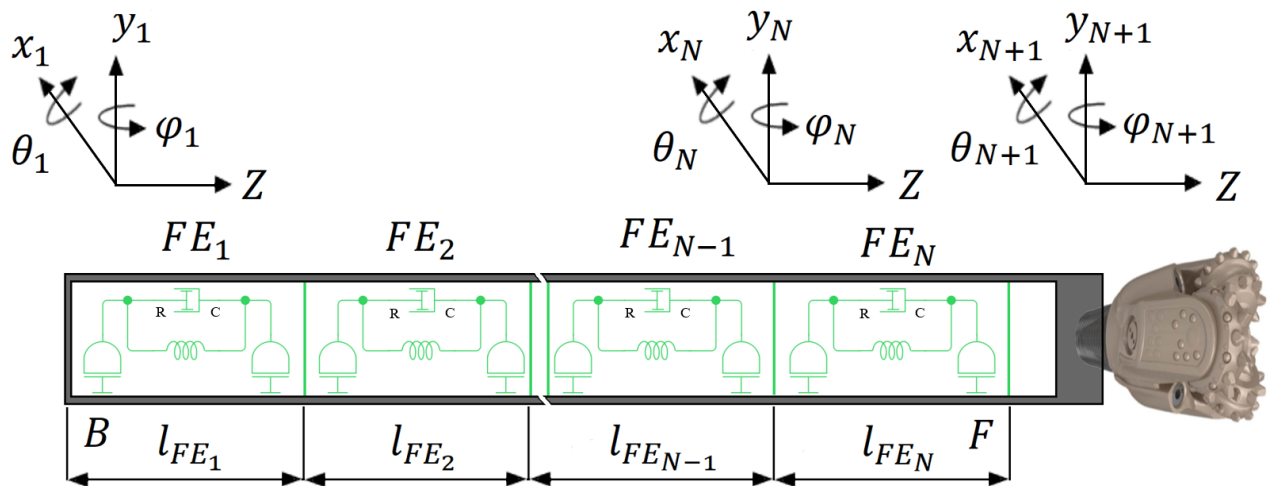


Рис. 2.11. Модель бурової колони на кручення та вигин

Блок розглядає вал як еквівалентну фізичну мережу з N гнучких елементів (рис. 2.12) [82].

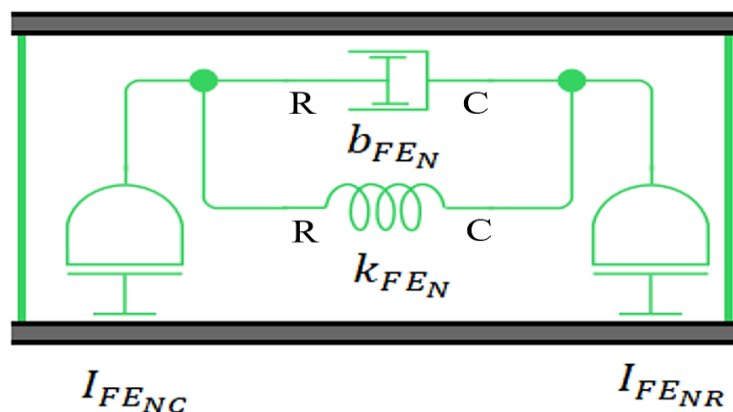


Рис. 2.12. Модель окремої секції бурової колони

Для аксіально однорідної структури довжини гнучких елементів, податливість, демпфування та розподілена інерція у фізичній мережі рівні, так що [82, 113, 114]

$$l_{FE_1} = l_{FE_2} = \dots = l_{FE_N} = \frac{L}{N}, \quad (2.53)$$

$$k_{FE_1} = k_{FE_2} = \dots = k_{FE_N} = k, \quad (2.54)$$

$$b_{FE_1} = b_{FE_2} = \dots = b_{FE_N} = b, \quad (2.55)$$

$$I_{FE_1C} = I_{FE_1R} = I_{FE_2C} = I_{FE_2R} = \dots = I_{FE_NC} = I_{FE_NR} = \frac{I}{2N}. \quad (2.56)$$

Для аксіально неоднорідного валу величина податливості, демпфування та інерції R -вузлів і C -вузлів можуть відрізнятися для окремих гнучких елементів у фізичній моделі мережі.

Модель кручення може бути параметризована використовуючи жорсткість k та полярний момент інерції J або розміри та властивості матеріалу валу. Жорсткість та інерція для кожного елемента обчислюються на основі розмірів валу та властивостей матеріалу таким чином [113, 114]

$$J_p = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4), \quad (2.57)$$

$$m = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \rho l, \quad (2.58)$$

$$J = \frac{m}{8} (D^2 + d^2) = \rho l \cdot J_p, \quad (2.59)$$

$$k = J_p \cdot \frac{G}{l}, \quad (2.60)$$

де: J_p - полярний момент інерції валу в місці розташування гнучкого елемента; D - зовнішній діаметр валу в місці розташування гнучкого елемента; d - внутрішній діаметр валу в місці розташування гнучкого елемента (для суцільного валу $d = 0$, для кільцевого валу $d > 0$); l - довжина гнучкого елемента; m - маса вала в місці розташування гнучкого елемента; J - момент інерції валу в місці розташування гнучкого елемента; ρ - щільність матеріалу валу; G - модуль пружності зсуву матеріалу валу; k - оберտальна жорсткість гнучкого елемента.

Подібно до моделі кручення, метод зосереджених мас для моделі згинання дискретизує розподілені безперервні властивості валу на кінцеву кількість N ,

гнучких елементів. N гнучких елементів відповідають $N+1$ зосередженій інерції, з'єднаній послідовно за допомогою демпфуючих і пружинних елементів. Однак для моделі згинання кожна маса має чотири ступені свободи: переміщення та обертання в обох напрямках x та y , перпендикулярних до осі валу (рис. 2.11).

Рівняння руху зосередженої маси [115] має наступний вигляд

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{B} + \mathbf{G}_{Disk}\Omega)\dot{\mathbf{x}} + (\mathbf{K} + \mathbf{G}_{Disk}\dot{\Omega})\mathbf{x} = \mathbf{f}, \quad (2.61)$$

$\mathbf{M}$ - матриця $4(N+1) \times 4(N+1)$, яка представляє масу валу; $\mathbf{B}$ - матриця $4(N+1) \times 4(N+1)$ для внутрішнього демпфування; $\mathbf{G}_{Disk}$ - матриця $4(N+1) \times 4(N+1)$, яка враховує дискову гіроскопію; Ω - швидкість кручення валу під час моделювання; $\mathbf{K}$ - матриця $4(N+1) \times 4(N+1)$ для задання жорсткості пружини; $\mathbf{x}$ - вектор $4(N+1) \times 1$, який представляє ступені свободи для всіх вузлів; $\mathbf{f}$ - вектор $4(N+1) \times 1$, який представляє зовнішні сили внаслідок застосування статичного дисбалансу маси.

Рівняння для матриці мас [116] має вигляд

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{1/2} + \mathbf{M}_{2/3} + \dots + \mathbf{M}_{i/i+1} + \dots + \mathbf{M}_{N/N+1} + \sum \mathbf{M}_{disk,i}, \quad (2.62)$$

де $\mathbf{M}_{i/i+1}$ - матриця мас для окремого гнучкого елемента (для кожного гнучкого елемента половина маси та моменту інерції передається вузлам на обох кінцях гнучкого елемента); $\sum \mathbf{M}_{disk,i}$ - сумарні матриці мас твердих мас, концентрично прикріплених до валу.

На рис. 2.13 наведена модель у розширенні Simscape® для Simulink® /MATLAB® [109,117,118], яка демонструє торсіонну реакцію бурової колони на прикладення ступінчастого крутного моменту [82].

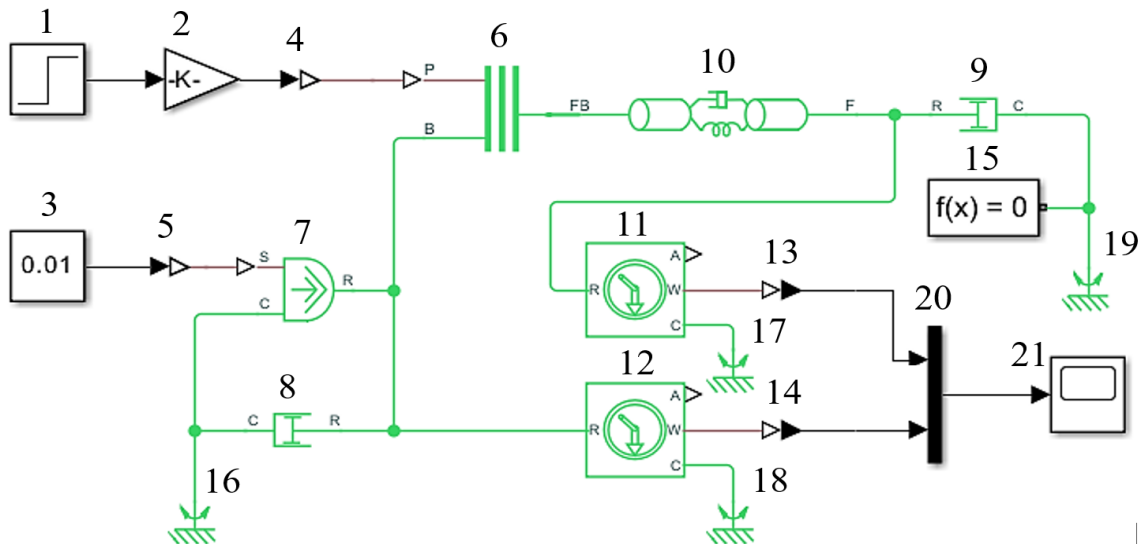


Рис. 2.13. Моделювання торсіонної реакції бурової колони на прикладення ступінчастого крутного моменту

Для моделювання динаміки бурової колони використані наступні блоки: 1 - блок Step із бібліотеки Simulink / Sources; 2 - блок Gain, із бібліотеки Simulink / Math Operations; 3 - блок Constant із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks; 4,5 – блоки Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 6 - блок дискової фрикційної муфти Disc Friction Clutch із бібліотеки Simscape / Driveline / Clutches; 7 - блок ідеального джерела крутного моменту Ideal Torque Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 8,9 – блоки Rotational Damper із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 10 - блок гнучкого валу Flexible Shaft із бібліотеки Simscape / Driveline / Couplings & Drives; 11,12 – блоки Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 13,14 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 15 - Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 16,17,18,19 – блоки Mechanical Rotational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 20 - блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 21 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks.

Блок дискової фрикційної муфти являє собою фрикційну муфту з двома наборами плоских фрикційних дисків, які контактують для зчеплення. Зчеплення вмикається, коли прикладений тиск пластини перевищує пороговий

тиск увімкнення. Після зачеплення пластини відчують моменти тертя, які дозволяють їм передавати механічну потужність.

Блок обертового демпфера моделює ідеальний механічний обертовий в'язкий демпфер в механічних ротаційних системах.

Блок Ideal Torque Source являє собою ідеальне джерело механічної енергії, яке генерує крутний момент, пропорційний вхідному фізичному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно вважається достатньо потужним, щоб підтримувати заданий крутний момент незалежно від кутової швидкості на клеммах джерела.

Блок Gain множить вхідні дані на постійне значення. Блок Constant генерує сигнал дійсної або комплексної постійної величини. Цей блок використовується для забезпечення постійного вхідного сигналу.

Бурова колона представлена 10 елементами, кожен з яких моделюється відповідно до структури, наведеної на рис. 2.11. На рис. 2.14 показано перехідні процеси по швидкості на валу приводного двигуна (*a*) та безпосередньо на буровій колоні (*b*) [82].

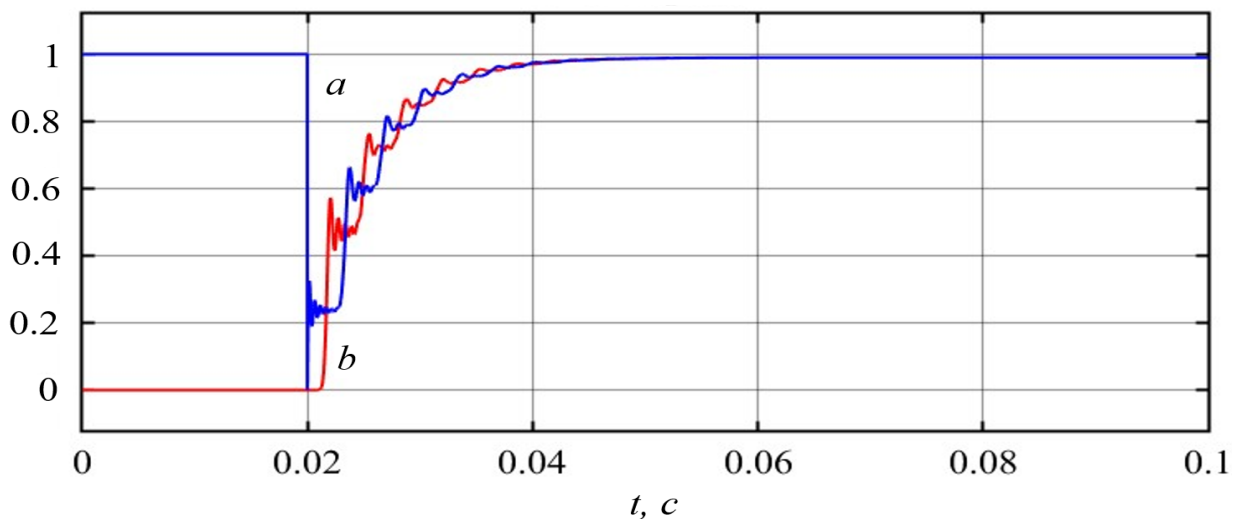


Рис. 2.14. Перехідні процеси по швидкості на валу двигуна (*a*) та безпосередньо на буровій колоні (*b*) (нормалізовані значення)

Як видно з представлених графіків, на зазначені процеси впливає аксіально розподілена структура бурової колоні, тобто параметри елементів, з якої вона складається. Наведений підхід дозволяє моделювати динамічні особливості

рухів бурової колони та використовувати отримані оцінки для формування ефективних режимів процесу буріння, що використано у розділі 4.

2.3.3. Моделювання впливу динаміки бурового долота на рух функціональних складових бурової установки

Долото - основний інструмент, який використовується при бурінні; воно виконує руйнівальну дію щодо гірської породи при проходці свердловин. Вибір найкращого долота та умов його експлуатації є однією з проблем, з якою стикаються інженери під час буріння. Існує широкий вибір бурових долот, які використовуються відповідно до умов буріння. Проте для обертального буріння їх в основному поділяють на дві категорії: шарошечні долота та долота з фіксованими різцями (рис. 2.15) [82, 119-121].

Долота з фіксованими фрезами містять леза, вбудовані в корпус долота. Долото та леза обертаються як єдине ціле. Це є перевагою, оскільки немає необхідності турбуватися про вихід з ладу частин, що рухаються. Крім того, через зсув дії різців, ці долота потребують меншого навантаження на робочі поверхні і можуть використовуватися для більш широкого діапазону пластів. Біти з полікристалічним алмазом PDC (Polycrystalline Diamond Compact) є поширеним типом біт з фіксованою фрезою.

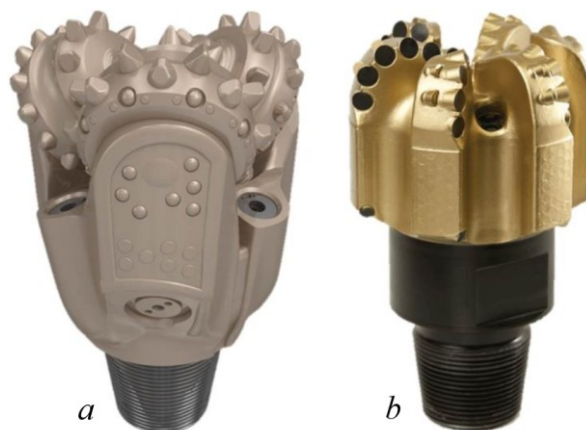


Рис. 2.15. Шарошечні долота (*a*) [120] та долота з фіксованими різцями (*b*) [121]

Шарошечні долота мають одну або кілька шарошок з ріжучими елементами, які обертаються вздовж осі конуса при русі долота проти пласта.

Зуби шарошки періодично стикаються з породою і під впливом осьового зусилля F подачі кожен із них заглиблюється на певну глибину (рис. 2.16).

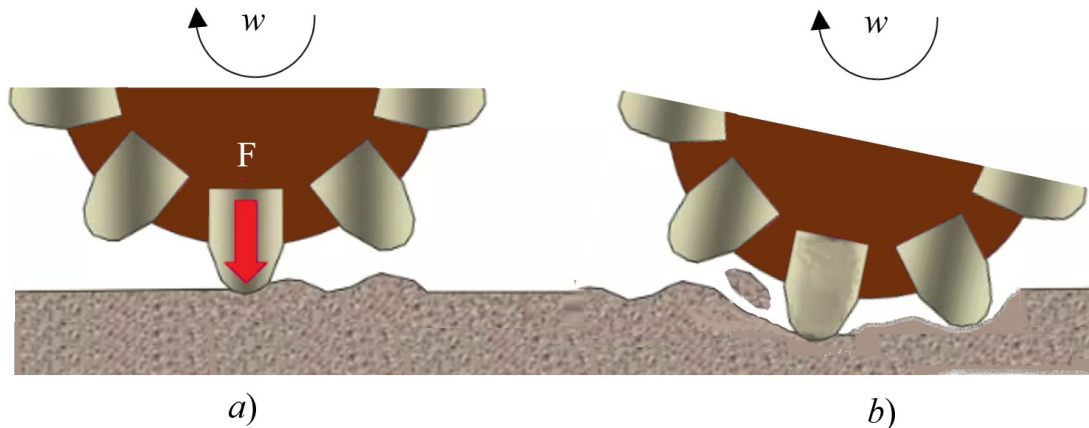


Рис. 2.16. Схема взаємодії шарошечного долота з гірською породою

Внаслідок косого удару у породі утворюється несиметрична лунка, витягнута у напрямі удару. У наступний момент, завершуючи сколювання породи прослизанням, зуб вдавлюється в лунку, що утворилася, завершуючи процес руйнування в даній точці вже під дією статичного вдавлювання.

Експериментальні дослідження та теоретичні моделі довели, що об'єм лунки для зуба у формі долота визначається як [122]

$$V_c = \left(\frac{F}{SL} \right)^2, \quad (2.63)$$

де: V_c - об'єм лунки на одиницю ширини різця; F - сила прикладена до одного зуба; S - міцність гірської породи; L - довжина гребеня зуба.

Якщо кожен удар зуба вважається однаково ефективним, то швидкість проходки ROP можна визначити як [122]

$$ROP = \frac{4wL_tV_c}{\pi d_b^2}, \quad (2.64)$$

де: w - швидкість обертання долота; L_t - загальна довжина гребеня зуба долота; d_b - діаметр долота.

Рівняння (2.64) не є реалістичним виразом для ROP, оскільки воно означає, що верхньої межі ROP немає зі збільшенням навантаження на долото. Обмеження на ROP накладаються як через механічну конструкцію, так і через міркування щодо видалення шламу. Оскільки зубці приникають глибше в пласт, навантаження розподіляється на більшу кількість зубців. Якщо

припустити, що частка ваги, яка підтримується сусідніми зубцями, пропорційна загальній глибині проникнення зубців і нерозривно пропорційна їх довжині, то ROP визначається за формулою [122]

$$ROP = \left(\frac{ad_b^3 S^2}{wW^2} + \frac{2c}{wd_b} - \frac{c^2 \cdot ROP}{w^2 d_b^2} \right)^{-1}, \quad (2.65)$$

де: a, c - безрозмірні константи.

Загалом можна відзначити універсальність породоруйнівної дії шарошечних доліт, а саме поєднання динамічних та статичних впливів на породу та реалізацію породоруйнівних зусиль як у напрямку перпендикулярно до забою (роздавлювання), так і в площині вибою (сколювання). Можна додати, що при прослизанні шарошок на вибої відбувається ще й різання-сколювання породи. В результаті цього процесу формуються коливання різної амплітуди і частоти як у самому долоті, так і у гірському масиві.

При бурінні долотом PDC процес взаємодії породи з долотом включає різання/зсув породи, що викликає тертя між різцями та породою. При цьому кожен окремий різець відчуває різну величину та напрямок сили, залежно від його розташування на профілі долота (рис. 2.17) [123].

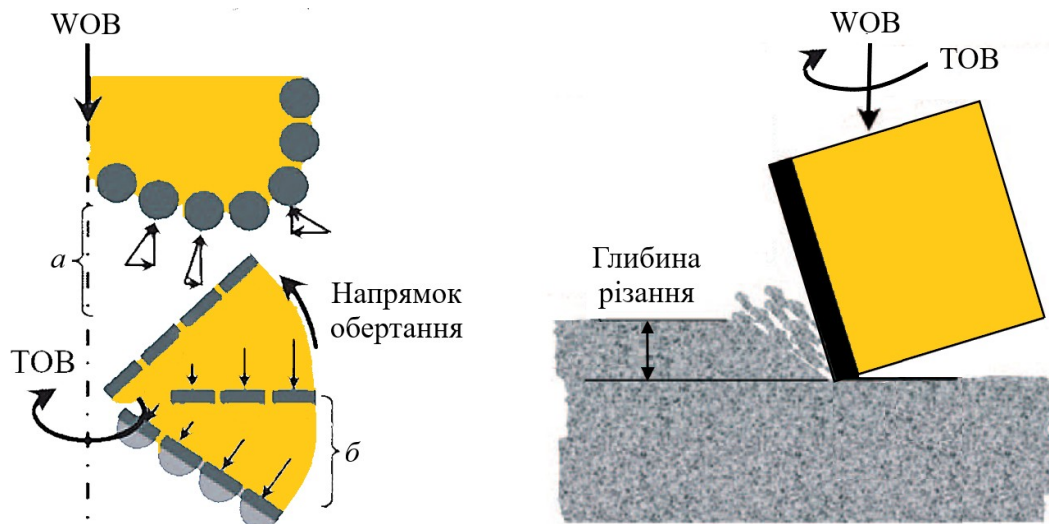


Рис. 2.17. Механізм взаємодії долота PDC з гірською породою: а) - реактивні сили на різці через навантаження на долото WOB; б) - реактивні сили на різці через крутний момент на долоті TOB

Феноменологічна модель, запропонована у роботі [124], враховує, що ріжуча дія фрикційного долота складається як з процесу різання, так і з процесу тертя. Вважається, що компоненти TOB та WOB діють на кожен різець долота. При бурінні гірських порід середня ріжуча сила T_c і середня вага, що переноситься ріжучою поверхнею, W_c є ріжучими компонентами TOB і WOB відповідно, а сила тертя T_f і поверхня контакту W_f є відповідними компонентами тертя. У моделі взаємодії породи з долотом як вхідні дані використовуються WOB і кутова швидкість долота w_b , а момент, що крутить, на долоті T_b ; крутний момент, пов'язаний з тертям T_f ; вага, пов'язана з тертям W_f ; крутний момент, пов'язаний з різанням T_c ; вага, пов'язана з різанням W_c , є виходами.

Рівняння для крутного моменту на долоті T_b (відображає момент нелінійного тертя, обумовлений взаємодією породи і долота), що зазнає переривчастого прослизання [111, 123, 125]

$$T_b = D_b W_b [\mu_{cb}(w_b) + (\mu_{sb} - \mu_{cb})e^{-\lambda|w_b|}], \quad (2.66)$$

де: μ_{cb} та μ_{sb} - статичні коефіцієнти сухого та кулонівського тертя; λ - коефіцієнт загасання, що дорівнює 0,9; w_b - кутова швидкість долота.

Це явище, відоме як «прихват-прослизання», відбувається, коли механізм зачеплення бурового долота з пластом має нелінійний характер [126]

. Це змушує всю бурову колону ковзати або зупинятися. Однак, якщо накопичена крутильна енергія досягне певного рівня, долото раптово відпускається і починає обертатися з високою швидкістю. Результируюча торсіонна біжуча хвиля передається у верхню частину системи обертання. Однак, оскільки силова головка має сильну інерцію, вона може утримувати бурову колону, так що торсіонна хвиля повертається до долота. Таким чином, долото знову зупиняється і хвиля крутного моменту повторюється, що спричиняє дуже велику та шкідливу вібрацію бурової колони. Якщо втратити контроль за цим процесом, бурова колона та долото будуть пошкоджені разом [127].

Для моделювання руху долота в процесі його взаємодії з гірською породою використано блок тертя обертання Rotational Friction із бібліотеки Simscape® для Simulink® /MATLAB® [109]. Він відтворює функцію тертя при контакті між обертовими тілами. Крутний момент тертя моделюється як функція відносної швидкості та вважається сумою компонентів тертя Штрібека (Stribeck), Кулона та в'язкості, як показано на рис. 2.18 [125, 128].

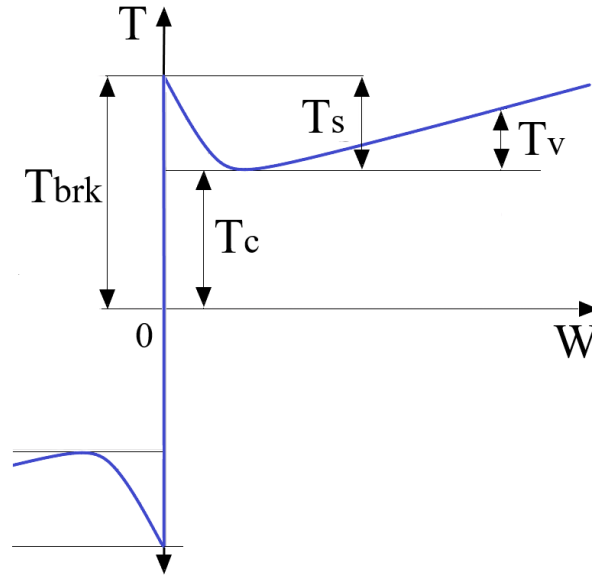


Рис. 2.18. Компоненти тертя обертання

Тертя Штрібека (Stribeck) T_s - це характеристики з від'ємним нахилом, що мають місце при низьких швидкостях [129]. Кулонівське тертя T_c призводить до постійного крутного моменту при будь-якій швидкості. В'язке тертя T_v протидіє руху з крутним моментом, прямо пропорційним відносній швидкості. Сума кулонівського і стрібеківського тертя в околицях нульової швидкості визначає тертя відриву T_{brk} . Загалом тертя обертання апроксимується такими рівняннями [128, 129]

$$T = \sqrt{2e} (T_{brk} - T_c) \exp\left(-\left(\frac{w}{w_{st}}\right)^2\right) \cdot \frac{w}{w_{st}} + T_c \cdot \tanh\left(\frac{w}{w_{coul}}\right) + fw, \quad (2.67)$$

де $w_{st} = w_{brk}\sqrt{2}$; $w_{coul} = w_{brk}/10$; $w = w_R - w_C$; T - момент тертя; T_c - кулонівський момент тертя; T_{brk} - момент тертя відриву; w_{brk} - швидкість тертя відриву; w_{st} - поріг швидкості Штрібека; w_{coul} - поріг кулонівської швидкості;

w_R та w_C - абсолютні кутові швидкості портів R і C блоку тертя обертання; ω – відносна швидкість; f – коефіцієнт в'язкого тертя.

Експоненціальна функція, яка використовується в частині рівняння сили Штрібека, є неперервною і спадає при величинах швидкості, більших за швидкість відривного тертя. Функція гіперболічного тангенса, яка використовується в кулонівській частині рівняння сили, гарантує, що рівняння є гладким і неперервним через $\omega = 0$, але швидко досягає свого повного значення при ненульових швидкостях.

На рис. 2.19 наведена модель механічної системи обертання бурового інструменту з ефектом «прихват-прослизання» у розширенні Simscape® для Simulink® /MATLAB® [101, 109, 130].

У моделі, що представлена на рис. 2.19 використані наступні елементи: 1 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 – блок Rotational Friction із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 4 – блок Inertia із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 5 – блок Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 6 – блок Ideal Angular Velocity Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 7,8,9,10 – блок Mechanical Rotational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 11,12 – блоки PS Terminator із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Physical Signals / Sinks; 13 – блок Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 14 - блок Rotational Spring із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 15 – блок Rotational Damper із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 16,17 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 18 – блок Gain із бібліотеки Simulink / Math Operations; 19 – блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 20 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks [125].

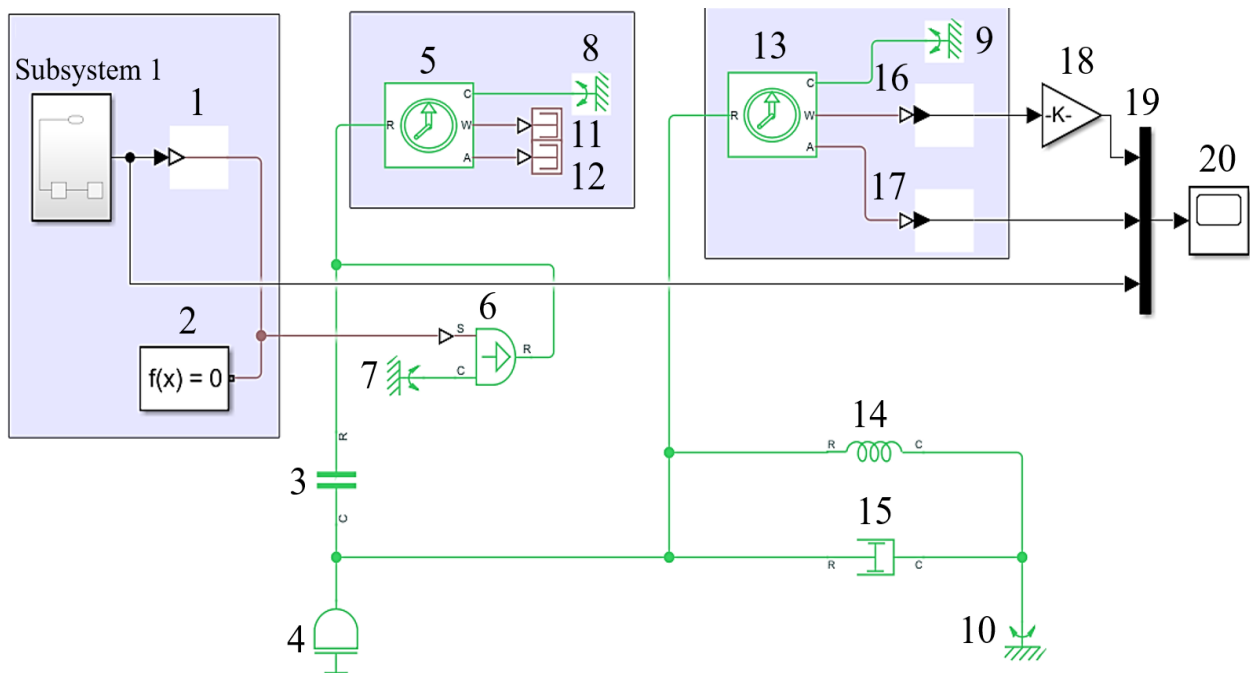


Рис. 2.19. Модель механічної системи обертання долота у свердловині з врахуванням ефекту «прихват-прослизання»

Модель включає електричну підсистему формування сигналу джерела обертання (Subsystem 1), підсистему перетворення електричного сигналу у механічний рух на основі блока 6 Ideal Angular Velocity Source і підсистему врахування механічних властивостей контактної взаємодії бурового долота із середовищем із застосуванням блока 3 Rotational Friction, блока 4 Inertia, блока 14 Rotational Spring та блока 15 Rotational Damper. Інерційний блок з'єднаний з нерухомою точкою за допомогою пружини та демпфера. Інерція приводиться в дію джерелом швидкості за допомогою фрикційного елемента ковзання. Фрикційний елемент має різницю між тертям відриву та тертям Кулона, що призводить до стрибкоподібного руху за інерцією.

На рис. 2.20 наведено результати моделювання режиму «прихват-прослизання» долота у свердловині [101, 125].

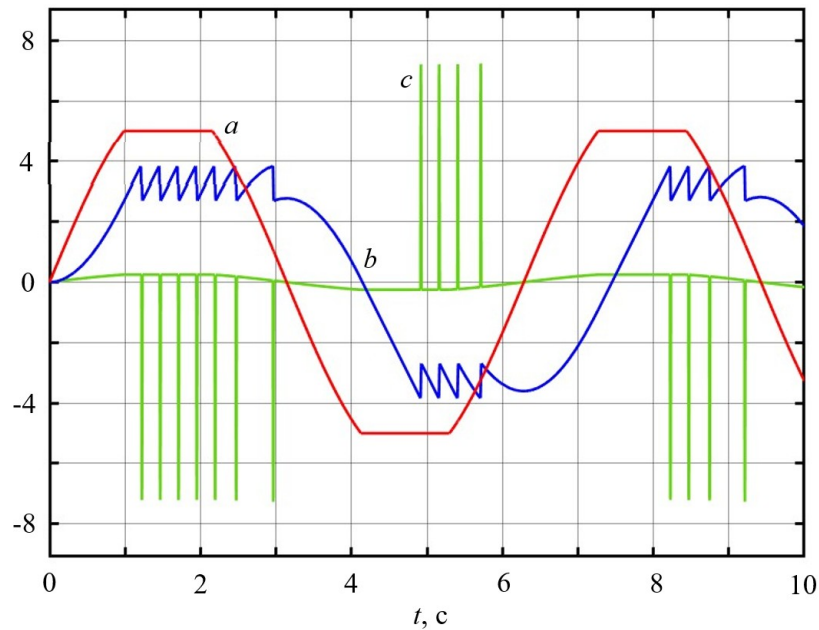


Рис. 2.20. Результати моделювання режиму «прихват-прослизання» долота у свердловині: *a* - кутова швидкість джерела, rad/s $(-5 \ 0 \ 5)$; *b* - кутова позиція, rad $(-4 \ 0 \ 4)$; *c* - кутова швидкість долота за результатами контактної взаємодії, rad/s $(-150 \ 0 \ 150) = /0.05$

Як свідчать наведені на рис. 2.20 графіки, в результаті виникнення режиму «прихват-прослизання» долота у свердловині у частотній картині кутової швидкості долота з'являються нові складові, що означає відповідні зміни у спектрі цього процесу.

Для моделювання аксіальних рухів складових бурової установки, як реакції на взаємодію долота з гірською породою, сформовано модель у розширенні Simscape® для Simulink® /MATLAB® [109], яка наведена на рис. 2.21.

У наведеній на рис. 2.21 моделі використані наступні елементи: 1,2,3 - блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 4,5,6 - Translational Damper із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 7,8,9 - блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 10 - блок Ideal Translational Velocity Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 11,12,13,14 - блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 15,16,17,18,19 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library /

Mechanical / Translational Elements; 20 - блок Uniform Random Number із бібліотеки Simulink / Sources; 21 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 22,23,24,25,26,27,28,29 – блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 30,31 - блок Mux із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Signal Routing; 32,33 - блок Scope із бібліотек Scope Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks [125].

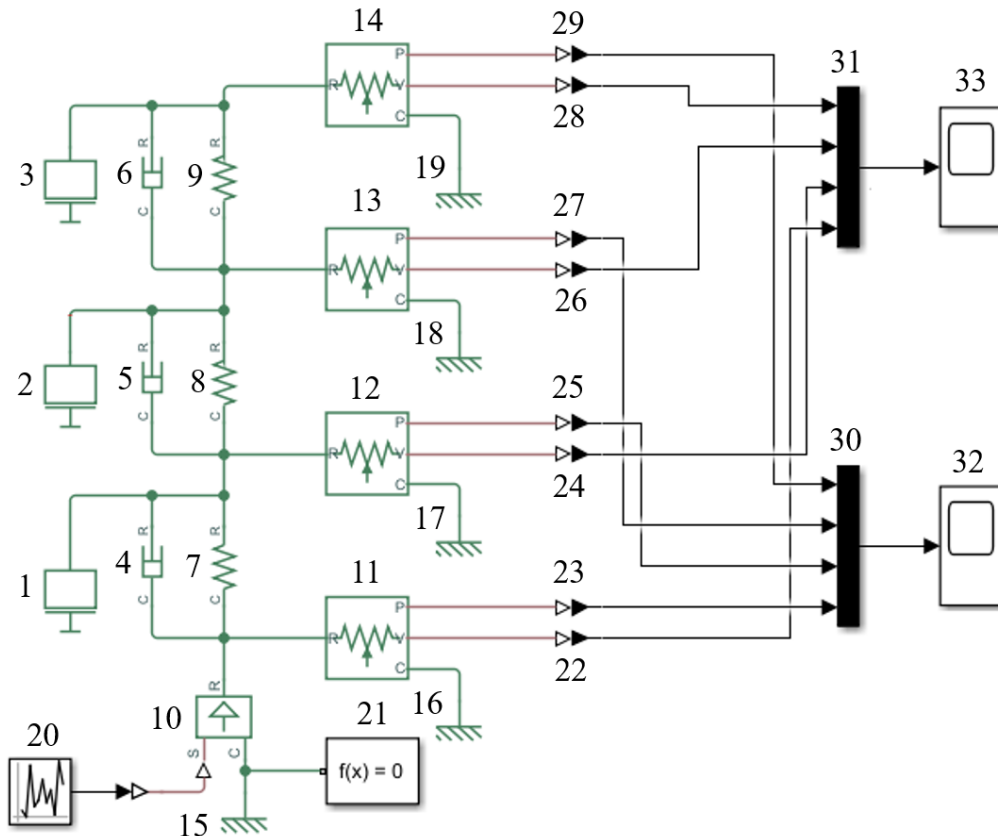


Рис. 2.21. Модель аксіальних рухів складових бурової установки через взаємодію долота з гірською породою

Блок Translational Damper являє собою ідеальний механічний поступальний в'язкий демпфер. Блок Mass являє собою ідеальну механічну масу, що використовується при поступальному русі. Блок Translational Spring являє собою ідеальну механічну лінійну пружину.

Блок Ideal Translational Velocity Source являє собою ідеальне джерело швидкості, яке генерує диференціал швидкості на своїх терміналах, пропорційний вхідному фізичному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно вважається достатньо потужним, щоб підтримувати задану швидкість

незалежно від сили, що діє на систему. Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює змінну, виміряну між двома механічними трансляційними вузлами, у керуючий сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню. Датчик ідеальний, оскільки не враховує інерцію, тертя, затримки, споживання енергії тощо.

Блок Uniform Random Number генерує рівномірно розподілені випадкові числа протягом заданого інтервалу. Блок Mix поєднує вхідні дані з однаковим типом і складністю у віртуальний вектор. Блок Score відображає сигнали у часової області.

На рис. 2.22 наведено результати моделювання змін швидкості рухів основних структурних складових бурової установки в залежності від динаміки рухів бурового інструменту: *a* - приводний блок; *b* - свердловинна частина; *c* - блок бурового інструменту; *d* - вхідний сигнал [125].

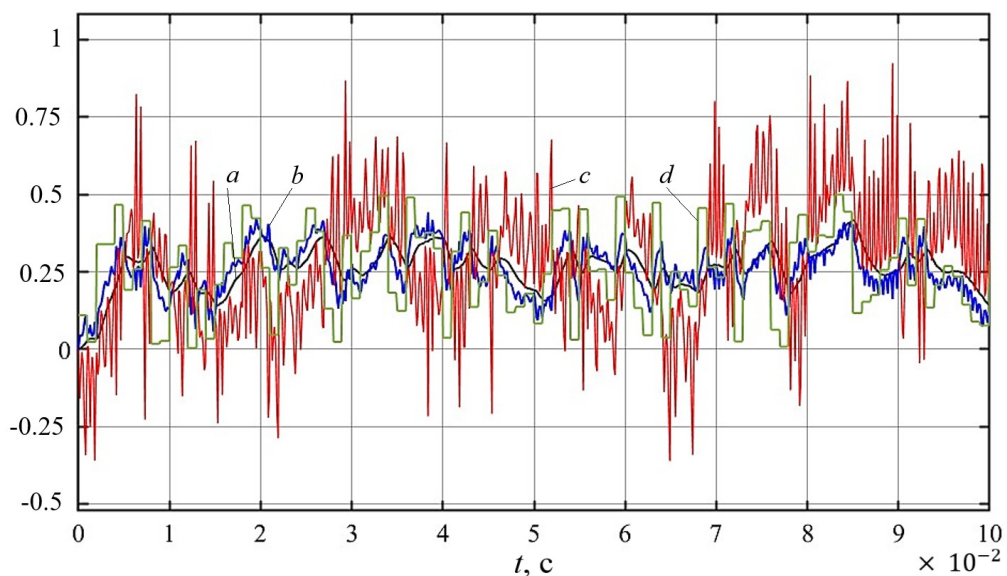


Рис. 2.22. Результати моделювання змін швидкості рухів основних структурних складових бурової установки в залежності від динаміки рухів долота (нормалізовані значення): *a* - приводний блок; *b* - свердловинна частина; *c* - блок бурового інструменту; *d* - вхідний сигнал

Як свідчать наведені залежності, у частотній області механічні складові бурової установки постають природним фізичним фільтром високих частот сформованих коливань. Таким чином, при використанні параметрів динаміки

рухів долота в процесі його взаємодії з гірською породою в якості характеристичних ознак, сенсор має бути максимально наближений до джерела коливань чи використана процедура виділення відповідної складової з інтегрованого сигналу.

Таким чином, руйнування гірської породи в процесі буріння свердловин носить яскраво виражений динамічний характер енергоємної контактної взаємодії, впродовж якої кожен елемент долота є джерелом високоамплітудних віброакустичних коливань, які в сукупності характеризують цей процес. В силу значної невизначеності перебігу фізичних явищ, що відбуваються в цьому процесі з урахуванням пружних деформацій породи і зубів долота здійснити його адекватний аналітичний математичний опис практично неможливо. Отже для вирішення пов'язаних з цим проблем доцільно використати підхід, наведений у підрозділі 2.1. Результати його застосування для формування ефективного керування процесом буріння свердловин наведено у розділі 4.

2.4 Висновки до розділу 2

Результати математичного аналізу та комп'ютерного моделювання основних фізичних процесів і робочих операцій, що відбуваються при бурінні свердловин, узагальнено у наступних висновках:

1. Доведено, що математична модель процесу буріння свердловин повинна мати гібридну структуру, яка включає аналітичний опис динаміки функціональних складових частин бурової установки, а також функції, що аналітично не визначаються, за допомогою яких задаються характеристики взаємозв'язків «бурове долото - гірська порода». Для формалізації цих функцій доцільно використати нейро-мережеву систему опрацювання характеристичних ознак зазначених взаємозв'язків.

2. Функціональна структура моделі процесу буріння представлена сукупністю основних робочих складових і включає: блок приводу бурової установки у наземній частині, блок бурового інструменту у свердловинній частині та блок руйнування гірської породи. Динамічне моделювання

зазначених блоків виконано за допомогою розширення Simscape® для Simulink® /MATLAB®. Такий підхід обрано, оскільки блоки в бібліотеці Simscape фактично представляють фізичні компоненти, отже, складні багатодоменні моделі можна побудувати без необхідності виводити математичні рівняння на основі фізичних принципів.

3. Для визначення складних нелінійних рухів, що виникають у процесі буріння, модель бурового інструменту у свердловинній частині представлена у вигляді розподіленої сукупності зосереджених мас на валу, окремі частини якого можуть мати свої особливі характеристики: жорсткість на кручення; крутильна інерція; жорсткість на вигин; щільність; модуль зсуву; модуль Юнга; зовнішній та внутрішній діаметр.

4. Для зменшення тривалості та трудомісткості параметризації моделі процесу буріння свердловин її аналітична частина представлена у вигляді комбінації динамічних субмоделей робочих режимів, які визначають швидкість проходки та питомі енерговитрати в залежності від параметрів бурової установки та характеристик гірської породи, що буриться.

5. Механізм руйнування гірської породи в процесі буріння свердловин носить яскраво виражений динамічний характер енергоємної контактної взаємодії, впродовж якої кожен елемент долота є джерелом високоамплітудних віброакустичних коливань, які в сукупності характеризують цей процес і можуть бути використані як його інформативні характеристичні ознаки.

6. У цілому удосконалену математичну модель процесу буріння свердловин, представлено у вигляді гібридної структури, аналітична частина, якої включає динамічні субмоделі робочих режимів і симулює силові, кінематичні та енергетичні залежності, а для формалізації функції взаємодії бурового долота з гірською породою використовується нейро-нечітка система, при цьому блок приводу бурової установки і блок руйнування гірської породи представлено у вигляді структур із зосередженими параметрами, а блок бурового інструменту у свердловинній частині – структурою з розподіленими параметрами.

РОЗДІЛ 3

ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БАЗИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

3.1. Вібрації бурового інструменту – джерело характеристикних ознак процесу його взаємодії з гірською породою

При бурінні свердловин фізико-механічні властивості гірських порід змінюються випадковим чином. Для забезпечення оптимального режиму буріння необхідно адекватно регулювати осьове зусилля та частоту обертання бурового ставу за зміни міцності порід. Вирішити завдання оперативного визначення фізико-механічних властивостей гірських порід в процесі буріння свердловин пропонується шляхом аналізу вібрацій долота, що при цьому виникають.

На рис. 3.1, в якості прикладу, наведено текстуру та структуру залізорудних покладів Криворізького басейну [83].

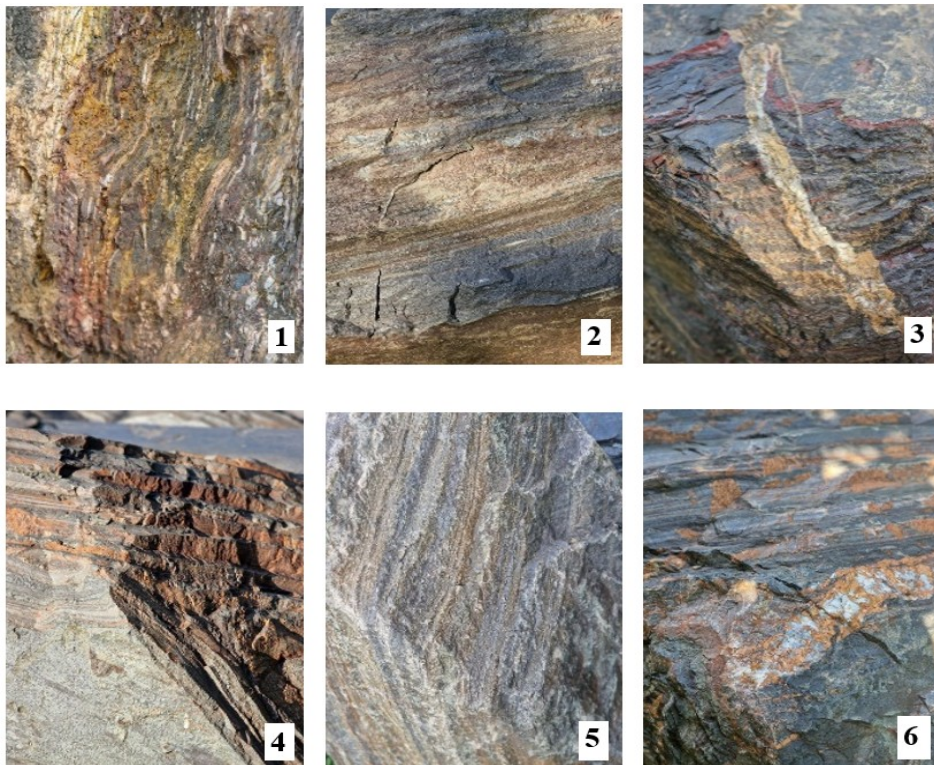


Рис. 3.1. Текстура та структура залізорудних покладів Криворізького басейну.

Наведені на рис. 3.1 приклади різновидів залізної руди мають таке походження та мінералогічні характеристики: 1 – Південний гірничозбагачувальний комбінат (ГЗК), шостий залізистий горизонт. Кварцити сидерит-лимоніт-гематит-мартитові, широкошарові; 2 – Інгулецький ГЗК, четвертий залізистий горизонт. Кварцити магнетитові, тонкошарчасті, сірополосчасті; 3 – Центральний ГЗК, Глієватський кар'єр, четвертий залізистий горизонт. Кварцити гематит-магнетитові, червоно-смугасті, широкошарові; 4 – Центральний ГЗК, Артемівський кар'єр, четвертий залізистий горизонт. Кварцити магнетитові тонкошарчасті, сірополосчасті; 5 – Інгулецький ГЗК, четвертий залізистий горизонт. Кварцити гематит-магнетитові, тонкошарчасті, червоносмугасті; 6 – Північний ГЗК, Первомайський кар'єр, шостий залізистий горизонт. Кварцити магнетитові середньшарові.

Отже, можна відмітити різноманіття мінералів та їх агрегацій у залізній руді, що мають свої особливі фізико-механічні характеристики. Відповідно, складний мінералогічний склад та текстурно-структурні особливості покладів залізної руди обумовлюють і особливі характеристичні ознаки супутнього вібраційного сигналу в процесі контактної взаємодії бурового долота з гірською породою [131].

Бурове долото є своєрідним механізмом, що в процесі взаємодії із вибоєм перетворює обертання бурової колони в поздовжні (осьові), крутильні, а в певних умовах і поперечні (бічні) коливання [132]. Сильні вібрації в процесі роботи інструменту можуть призвести до руйнування елементів бурової установки, збільшення діаметра свердловини, передчасного зношування долота, зниження механічної швидкості буріння. При посиленні вібрацій і за відсутності контролю над їх рівнем, може виникнути явище «резонансу», що у більшості випадків призводить до катастрофічних руйнацій елементів бурильних труб і долота [133].

Вібраційні коливання мають хвильову природу. Вони залежать від відповідної характеристики бурильної колони (штанги) і включених до її компонування пристроїв (калібраторів, центраторів, демпферів, амортизаторів),

типорозміру долота, властивостей порід, що розбурюються, параметрів режиму буріння [134].

Зазначені види вібрації призводять до специфічних рухів бурового інструменту. *Зворотне завихрення* - відбувається, коли обтяжена бурильна труба торкається стовбура свердловини, змушуючи її рухатися навколо стовбура у протилежному напрямку обертання муфти. Швидкість зворотного вихору залежить від різниці діаметра стовбура свердловини та діаметра стовбура. *Прихват-прослизання* - відбувається, коли частина обертової бурильної колони на мить захоплюється тертям об стовбур свердловини, а потім вивільняється. Уривчасте прослизання може бути досить серйозним, щоб зупинити обертання долота. Коли тертя припиняється, обертання частини колони різко прискорюється. Це створює великі відцентрові прискорення. Часто уривчасте ковзання та зворотний вихор відбуваються одночасно, збуджуючи один одного. *Стрибок долота* - виникає в результаті осьових вібрацій бурильної колони, викликаних неоднорідностями на долоті. Коли долото переміщається нагору і долає неоднорідності, бурильна колона реагує. Під час резонансу бурильної колони ці коливання стають сильними. *Бічна вібрація або биття* – виникає, коли секція бурильної колони між двома стабілізаторами чи опорами знаходиться у резонансі. Цей режим коливань самообмежується свердловиною, але може призвести до ударних пошкоджень контакту зі стінкою. Це також викликає втому обтяженої бурильної труби та з'єднань [135].

Взагалі коливальний рух викликається процесом міжмолекулярного зіткнення в середовищі, наприклад у повітрі або твердому тілі. Необхідними умовами коливального руху є пружність та інертність. Пружність - це здатність тіла повертатися в положення рівноваги після його зміщення. Інерція дозволяє передавати імпульс між сусідніми елементами середовища. Коливальний рух можна охарактеризувати в термінах поширення хвилі, яке, у свою чергу, формує моди. Отже, динаміку механічних коливань можна досліджувати з точки зору як розповсюдження хвилі, так і модального аналізу. Коливальний

рух викликає коливання тиску в повітрі, а в твердих тілах – зміщення. Таким чином, результуючі форми мод є шаблонами тиску та переміщення для повітря та твердих тіл відповідно [136].

У роботі [137] показано, що процес поширення у рудному матеріалі пружних коливань з довжиною хвилі λ та амплітудою ξ залежить від розміру та числа рудних включень. Дисперсія величини ξ визначиться виразом [83]

$$D_{\xi} = M\xi^2 - \langle \xi \rangle^2, \quad (3.1)$$

де

$$M\xi^2 = \sum_{k=0}^{\infty} M\left(\frac{\xi^2}{k}\right) F(k). \quad (3.2)$$

У (3.2) $M\xi$ означає математичне сподівання випадкової величини ξ , $M(\xi/k)$ - умовне математичне сподівання для фіксованого числа рудних включень k , а символ $\langle \rangle$ - усереднення за флуктуаціями їх розмірів та кількості.

Показано, що відносна величина

$$S = \frac{\sqrt{D\xi}}{\langle \xi \rangle}. \quad (3.3)$$

характеризує розмір неоднорідностей у гірській породі.

Отже параметри розповсюдження пружного (віброакустичного) сигналу у гірській породі можуть бути використані для оцінки її властивостей.

Супутній віброакустичний сигнал, що виникає при бурінні свердловин і розповсюджується як у гірському масиві, так і у буровому інструменті, є інтегруючим джерелом інформації щодо характеру і режиму роботи бурової установки [82, 138, 139]. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд або в частотній області його спектром. Інформація, що міститься в цьому сигналі, може бути виділена у формі певних характеристичних ознак у часовій, частотній або частотно-часовій області та використана для діагностики стану технологічного обладнання, визначення фізико-механічних характеристик гірської породи та ідентифікації технолого-мінералогічних різновидів руди в процесах розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин.

На рис. 3.2 наведена робоча схема процедури аналізу сигналу вібрації та акустичної емісії бурової установки для вирішення цієї задачі [46, 51, 138].

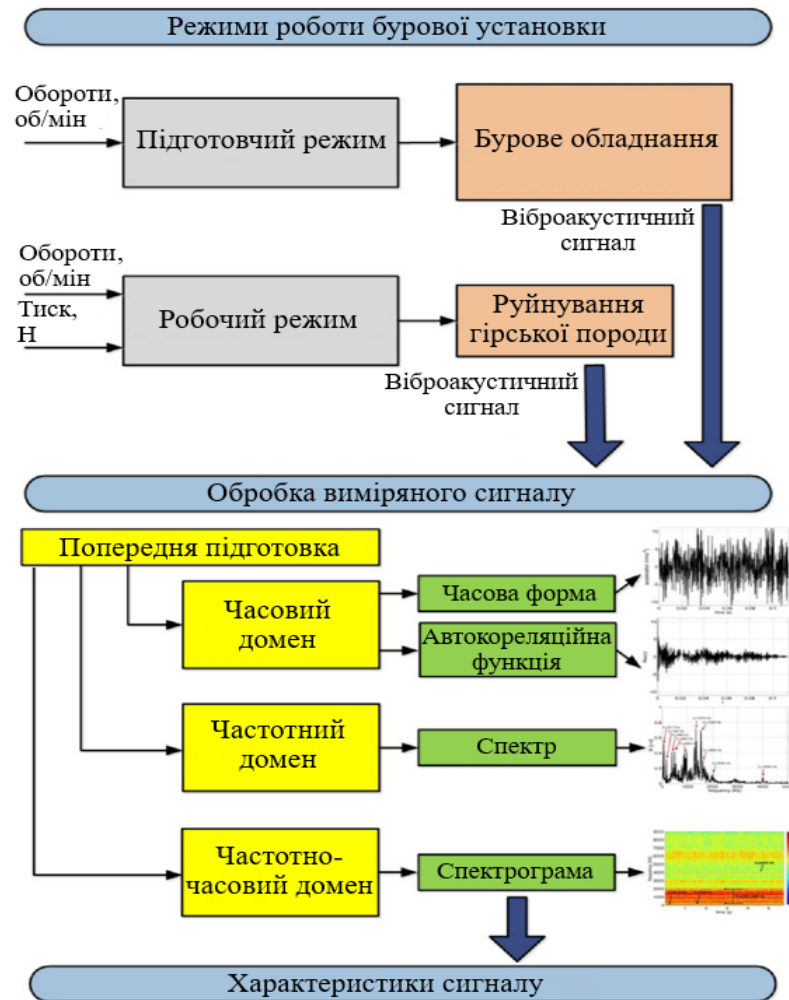


Рис. 3.2. Процедура аналізу сигналу вібрації та акустичної емісії бурової установки

В даний час найбільш поширеною моделлю віброакустичних сигналів є стаціонарні випадкові процеси з дискретним спектром, які можуть бути представлені в комплексній формі в наступному вигляді [140]

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k e^{i2\pi f_k t}, \quad (3.4)$$

де γ_k – незалежні однаково розподілені комплексні випадкові величини, які мають математичні очікування $M[\gamma_k] = 0$, а дисперсії $D[\gamma_k] = \sigma_k^2$.

В окремому випадку, коли випадкові величини γ_k і γ_{-k} утворюють комплексно пов'язані пари, а частоти задовольняють умові $f_k = f_{-k}$, $f_0 = 0$, процес є дійсним і формула (3.4) набувають вигляду

$$\xi(t) = \gamma_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_k \cos(2\pi f_k t - \varphi_k), \quad (3.5)$$

Якщо частоти f_k є кратними, $f_k = kf_1$ то кореляційна функція є періодичною функцією з періодом $T_0 = 1/f_1$, тобто $R(\tau) = R(\tau + T_0)$ і дисперсія σ_k^2 визначається виразом

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} R(\tau) e^{-i2\pi kf_1 \tau} d\tau. \quad (3.6)$$

В роботах [140, 141] зазначено, що основними діагностичними параметрами вібраційних сигналів є часові характеристики – кореляційна функція $R(\tau)$ та дисперсія $D[\xi(t)]$ процесу (3.4), а також його спектральні характеристики – частоти f_k гармонійних складових та дисперсії σ_k^2 їх випадкових амплітуд γ_k .

На додаток до зазначених характеристик, як діагностичні ознаки також використовуються огинаюча кореляційної функції, кепстральні характеристики, а в багатоканальних системах – взаємні кореляційні та спектральні характеристики [141, 142].

Як було зазначено вище, основними причинами виникнення вібрацій бурової установки є: стрибкоподібний характер руйнування гірських порід; вибістість вибою свердловини, яка в свою чергу залежить від впливу бурової колони на вибій при її поздовжніх і крутильних коливаннях, різких і частих змін параметрів режиму буріння, неоднорідності, тріщинуватості і різкої перемежності по твердості порід, що розбурюються, відмінності тиску під різними зубцями долота та ін.

Для виявлення характеристичних ознак взаємодії бурового долота з породою важлива ідентифікація джерел і параметрів віброакустичних сигналів, пов'язаних з цим процесом [51].

Практика показує, що високочастотні коливання бурового інструменту виникають при взаємодії долота з вибоєм свердловини. Низькочастотні коливання пов'язані із зусиллям притискання бурильної колони до стінок свердловини, носять релаксаційний характер і повністю пов'язані за частотою та амплітудою з крутильними коливаннями. Низькочастотні коливання з амплітуди в 1,3-2,6 рази перевищують статичні зусилля навантаження долота бурильним інструментом. Це навантаження здатне створювати зусилля для

об'ємного руйнування породи вибою свердловини. Отже, ефективність роботи бурового долота за умови збереження динамічних імпульсів, що виникають під впливом низькочастотних коливань бурильного інструменту, підвищується.

На рис. 3.3 наведена інформація стосовно частотних, а на рис. 3.4 – амплітудних (прискорення) характеристик сигналів, що генерують основні елементи бурової установки при бурінні свердловин [143].

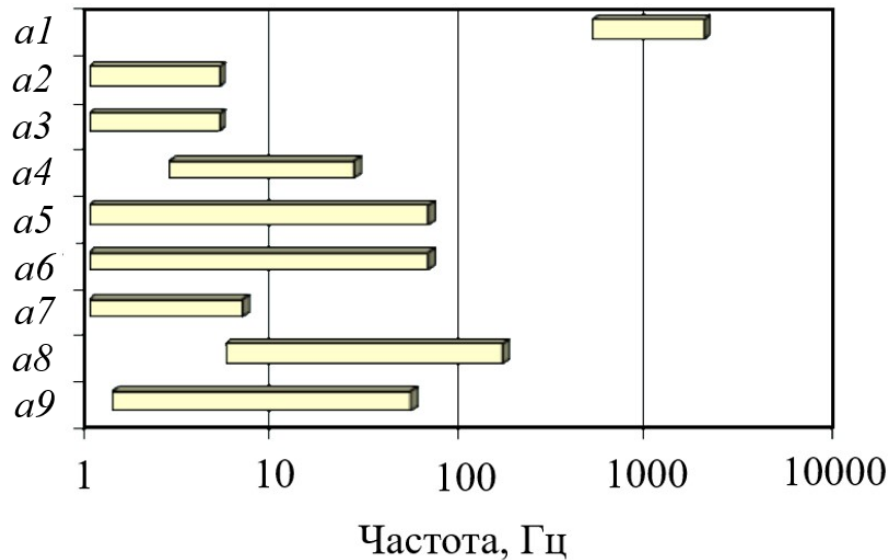


Рис. 3.3. Частотний діапазон сигналів, що генерують складові бурової установки: *a1* – відскок долота (удар); *a2* – відскок долота (зміщення); *a3* – прихват-прослизання; *a4* – стабілізатори; *a5* – вибійні двигуни; *a6* – пряме завихрення; *a7* – зворотне завихрення; *a8* – збудження долота (вставки); *a9* – збудження долота (конуси)

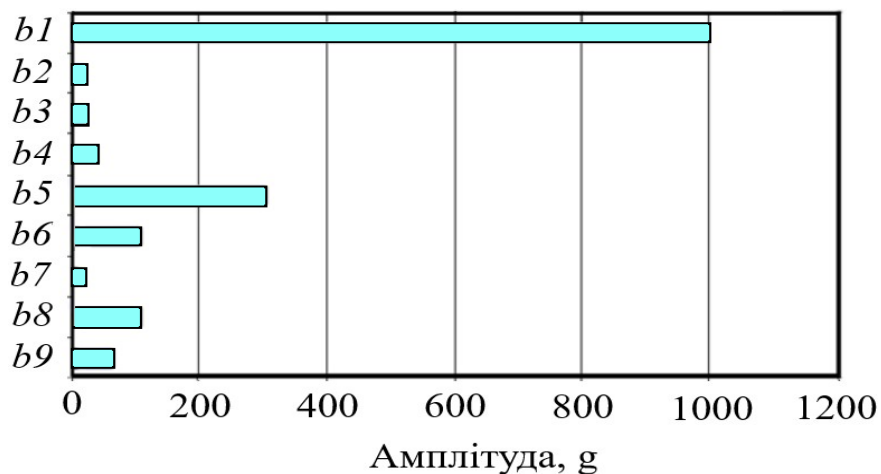


Рис. 3.4. Амплітудний діапазон сигналів, що генерують складові бурової установки: *b1* – відскок долота; *b2* – прихват-прослизання; *b3* – стабілізатори; *b4*

– вибійні двигуни; $b5$ – зворотне завихрення; $b6$ – пряме завихрення з контактом; $b7$ – пряме завихрення без контакту; $b8$ – збудження долота (вставки); $b9$ – збудження долота (конуси)

Вібрації, що виникають на долоті, представляють складний коливальний процес [83, 111]

$$X(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A(t) \cos[kw_0(t) + \varphi_k(t)] + \xi_w(t). \quad (3.7)$$

Він складається з накладання на квазіполігармонічний процес - в області низьких та середніх частот, випадкового широкосмугового стаціонарного процесу $\xi_w(t)$ - в області високих частот [144].

Інформація про процеси, що відбуваються при взаємодії долота з гірською породою в процесі буріння свердловин, міститься у високочастотній випадковій складовій вібраційного сигналу. Виділення цієї корисної інформації та визначення характеристичних ознак для ідентифікації фізико-механічних характеристик гірської породи здійснюється із використанням спектрального аналізу. Шляхом Фур'є-перетворення визначається спектральна щільність потужності цього сигналу [111, 141, 145]

$$S_T(w) = \frac{1}{T} [H_T(jw)]^2, \quad 0 < t < T, \quad (3.8)$$

де $H_T(jw) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(w) e^{-jwt}$ - частотне подання сигналу.

З цього сигналу виділялася вузькосмугова компонента $\xi_{\Delta}(t)$ з найбільшою потужністю [144, 145]

$$\xi_{\Delta}(t) = A[1 + mB(t)\cos(w_{\Delta}t + \varphi_0)], \quad (3.9)$$

де $0 < m < 1$ - глибина модуляції.

У свою чергу

$$B(t) = \sum_{k=1}^n C_k \cos(k\Omega t + \varphi), \quad (3.10)$$

тобто представляє амплітудномодульований процес виду

$$\xi(t) = A[1 + \sum_{k=1}^n m_k C_k \cos(k\Omega t + \varphi)] \cdot \cos(w_{\Delta}t + \varphi_0), \quad (3.11)$$

де m_k - парціальний коефіцієнт модуляції; Ω - кутова частота модуляції.

Головним питанням в цій процедурі є визначення ознак за якими виділяється $\xi_{\Delta}(t)$. Від цього залежить наскільки інформація щодо процесу взаємодії долота

з гірською породою захищена від впливу різноманітних завад (вібрації інших частин бурової установки, зовнішні процеси у гірському масиві і т. і.). Для вирішення цієї задачі виконується формування та аналіз карти порядку обертів обертових частин бурової установки.

3.2. Визначення параметрів вібрації бурового долота із застосуванням методу відстеження порядку

Ідея запропонованого методу полягає в тому, щоб застосувати формування та аналіз карти порядку обертів обертових частин бурової установки в процесі буріння свердловин для ідентифікації долота у частотній області вимірюваного супутнього інтегрованого вібраційного сигналу як джерела високоамплітудної вібрації. Вимірювання характеристичних параметрів коливань у часовій області на визначеній частоті, яка відповідає піковому значенню порядку на сформованій карті, дозволяє зменшити вплив на результати оцінки характеристик взаємодії долота бурової установки з гірською породою збурюючих факторів, що виникають в процесі буріння свердловин, і є потенційними джерелами небажаних для аналізу складових вимірюваного вібраційного сигналу. Виміряний у часовій області на зазначеній частоті модульований сигнал несе інформацію про фізико-механічні характеристики гірської породи, що буриться, та стан долота. Отримана вже на стадії видобутку інформація щодо характеристик руди дозволяє оптимізувати і подальші технологічні операції (дроблення, подрібнення, класифікація, збагачення та ін.) по її підготовці до металургійного переділу. Також вона корисна для покращення якості моделювання зазначених операцій [83].

Аналіз порядку - це дослідження вібрацій у обертових системах, які є результатом самого обертання. Частота цих коливань часто пропорційна швидкості обертання. Константами пропорційності є порядки [82].

Швидкість обертання зазвичай вимірюється незалежно і змінюється з часом у більшості експериментальних умов. Належний аналіз коливань, спричинених обертанням, вимагає повторної дискретизації та інтерполяції виміряного

сигналу для досягнення постійної кількості вибірок за цикл. Завдяки цьому процесу компоненти сигналу, частоти яких є постійними кратними частоті обертання, перетворюються на постійні тони. Перетворення зменшує розмиття спектральних компонентів, яке виникає, коли частота швидко змінюється з часом.

Існують різноманітні методи відстеження порядку оберткових машин. Наприклад, метод відстеження порядку з використанням аналогових приладів заснований на вимірюванні параметрів вібрації з одночасною генерацією сигналу, пропорційного швидкості валу обертової машини. Це дозволяє проводити селективний відбір інформації (вибірку кутового домену) з подальшим її аналізом за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), у результаті виходить спектр порядку. В даний час цей метод, зважаючи на невисоку точність і складність його апаратної реалізації, має обмежене застосування.

Широке поширення, головним чином для визначення несправностей машин і механізмів, знайшли: метод відстеження обчисленого порядку (COT), метод на основі фільтра Вольда-Калмана (VKF-OT) і метод з використанням перетворення Габора.

COT по суті полягає в перетворенні сигналу у часовій області, відібраного за теоремою про вибірку Шеннона-Найквіста, у сигнал кутової області. Обладнання збирає сигнал імпульсу швидкості осі з однаковим інтервалом часу для обчислення рівного кутового часу, потім алгоритм інтерполяції використовується для інтерполяції та підгонки часу повторної дискретизації для отримання остаточного сигналу кутової області [146].

Обмеженням застосування цього методу є кінцева роздільна здатність порядку. Це спричиняє проблеми, коли порядки не потрапляють на спектральні лінії.

Метод VKF-OT спирається на рівняння даних та структурне рівняння. Рівняння даних фільтра Вольда-Калмана другого покоління для фільтрації одного порядку визначається як [111, 147]

$$y(n) = x(n)e^{j\Theta(n)} + \eta(n), \quad (3.12)$$

де $y(n)$ - виміряні дані; $x(n)$ - комплексна огинаюча відфільтрованого сигналу; $e^{j\Theta(n)}$ - комплексна несуча хвиля; $\Theta(n) = \sum_{i=1}^n w(i) \Delta t$; $w(i)$ - дискретна кутова частота; $\eta(n)$ - випадковий шум та інші компоненти порядку, або помилка.

Структурне рівняння забезпечує гладкість послідовних цифрових точок відфільтрованих даних, підганяючи поліном низького порядку послідовності $x(n)$.

Цей метод дозволяє вилучати близькі порядки, та такі, що перетинаються, в системах з декількома валами і відрізняється більш високою роздільною здатністю по частоті і порядку, ніж звичайні методи. Однак, оскільки метод VKF-OT вимагає більшого часу розрахунку, він мало підходить для обробки у реальному часі.

При виділенні порядку сигналу на основі перетворення Габора центральна частота зазвичай визначається методом лінійної інтерполяції. На цій основі смугу пропускання фільтра визначається рівночастотним або рівнопорядковим методом. Якщо q -та центральна частота $f_q(t)$ і рівночастотна смуга частот Δf є константою, околиці фільтрації можуть бути представлені рівнянням [111, 148]

$$f_q(t) \pm \frac{\Delta f}{2} = \left[f_q(t) - \frac{\Delta t}{2}, f_q(t) + \frac{\Delta t}{2} \right]. \quad (3.13)$$

Потім за допомогою алгоритму маскування отримується коефіцієнт Габора відповідного порядку в сигналі.

Метод, заснований на перетворенні Габора, вимагає менше часу для реалізації в порівнянні з методом VKF-OT, але при цьому поступається йому в точності.

Відомі й інші методи відстеження порядку машин, що обертаються, кожен з яких має свої переваги і недоліки [149]. Очевидно, що вибір конкретного з них залежить від особливостей та умов розв'язуваного завдання.

На рис. 3.5 наведена блок-схема алгоритму аналізу порядку із застосуванням функцій Matlab [83, 150, 151].

Послідовно виконуються наступні операції:

1. Завантаження вібраційного сигналу, синхронізованого із даними швидкості приводу бурової установки.
2. Оцінка фазового кута, як часового інтегралу швидкості обертання із використанням функції *cumtrapz*

$$\phi(t) = \int_0^t \frac{\text{RPM}(\tau)}{60} d\tau. \quad (3.14)$$

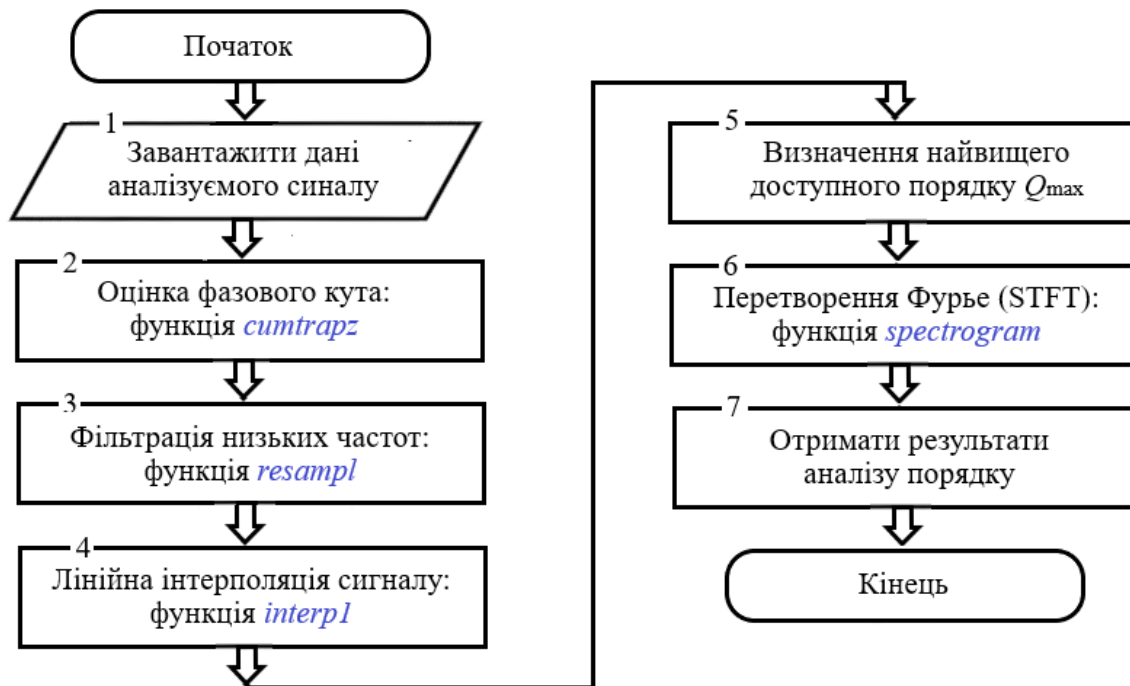


Рис. 3.5. Алгоритм аналізу порядку оберткових частин бурової установки із застосуванням функцій Matlab

3. Підвищення дискретизації та фільтрація низьких частот сигналу із використанням функції *resample*.
4. Лінійна інтерполяція сигналу на рівномірну сітку у фазовій області із використанням функції *interp1*.
5. Визначення найвищого доступного порядку у вимірюванні, що фіксується частотою дискретизації та найвищою швидкістю обертання, досягнутою системою

$$Q_{max} = \frac{f_s/2}{\max\left(\frac{\text{RPM}}{60}\right)}. \quad (3.15)$$

Для отримання кращих результатів виконується передискретизація на додатковий коефіцієнт 4. Отримана частота дискретизації у фазовій області f_p становить

$$f_p = 4 \times 20_{max} = 4 \times 2 \frac{f_s/2}{\max(\frac{RPM}{60})}. \quad (3.16)$$

6. Обчислення короткочасного перетворення Фур'є (STFT) інтерпольованого сигналу із використанням функції *spectrogram*. Функція ділить сигнал на L - сегменти вибірки та вікна кожного з них із плоским верхом

$$N_{overlap} = \min \left(\left[\frac{p_{overlap}}{100} \times L \right], L - 1 \right). \quad (3.17)$$

де $p_{overlap}$ - перекриття між суміжними сегментами (50%).

Роздільна здатність залежить від частоти дискретизації та довжини сегмента

$$r = \frac{f_p}{L} \times ENBW, \quad (3.18)$$

де ENBW - еквівалентна шумова смуга пропускання вікна, що обчислюється за допомогою функції *enbw*.

7. Результати аналізу порядку використовуються для виділення складової загального вібраційного сигналу у часовій області на частоті обертань долота впродовж усіх робочих режимів бурової установки.

Відповідно до наведеного алгоритму, сформовано карту частоти обертів за хвилину для даних вібрації в процесі зміни робочого режиму бурової установки (підвищення впродовж 40 секунд частоти обертів приводу з 500 до 2150 обертів за хвилину (рис. 3.6). Амплітуда карти представляє середньоквадратичне (RMS) значення вібраційного сигналу [83].

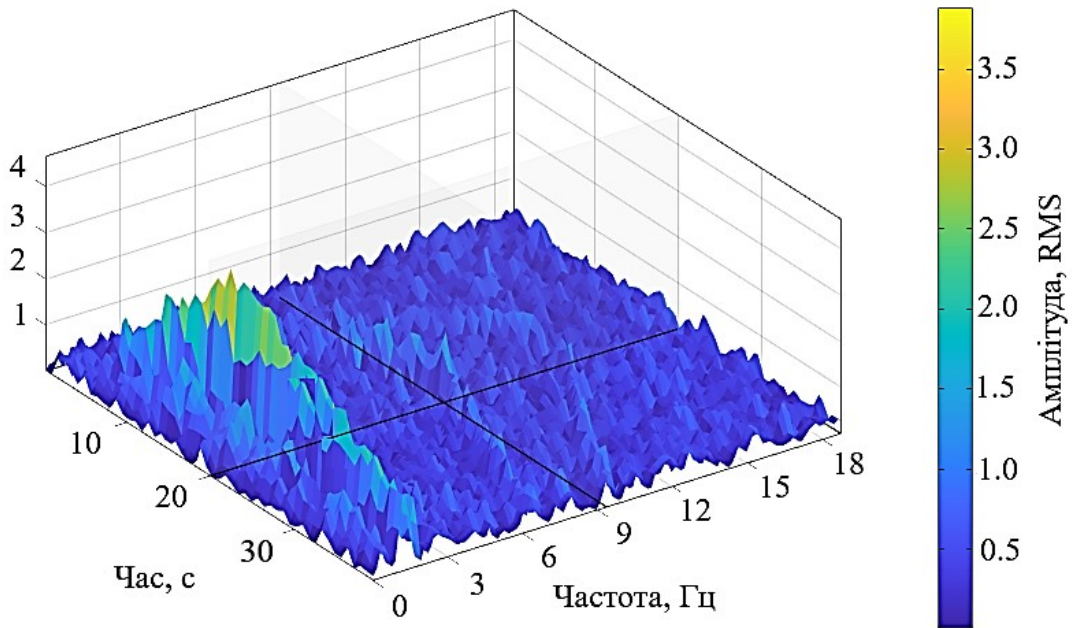


Рис. 3.6. Карта частоти обертів обертових частин бурової установки за даними вібрації

На рис. 3.7 наведено результати спектрального аналізу загального вібраційного сигналу (1) та виділеного порядкового сигналу безпосередньо на буровому долоті (2).

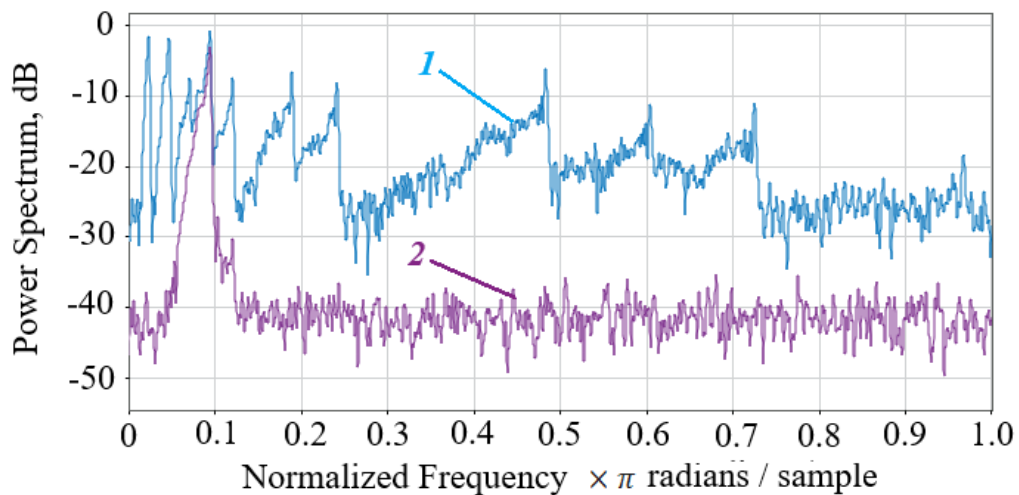


Рис. 3.7. Результати спектрального аналізу загального вібраційного сигналу (1) та виділеного порядкового сигналу безпосередньо на буровому долоті (2)

На рис. 3.8 та 3.9 наведено результати виділення у часовій області із загального вібраційного сигналу порядкової складової на долоті впродовж зміни робочого режиму бурової установки [83, 111].

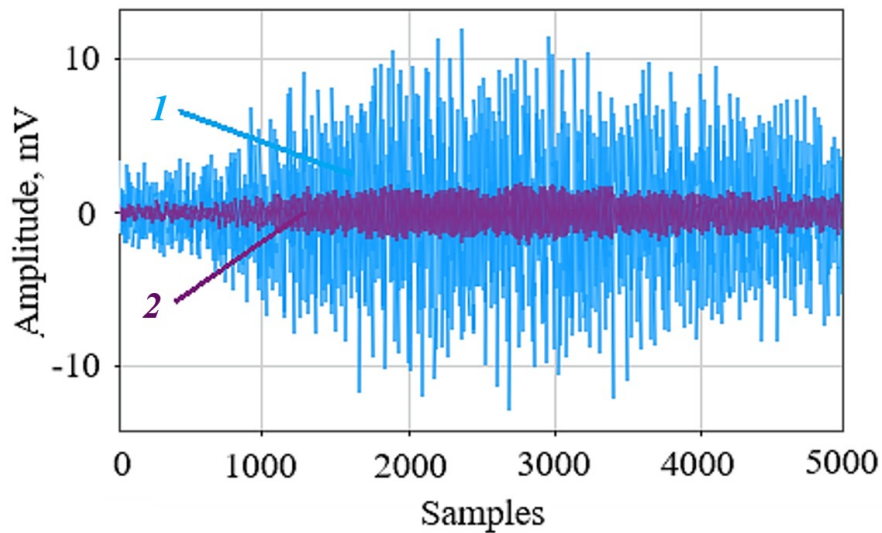


Рис. 3.8. Порядковий сигнал на долоті на фоні загального вібраційного сигналу: 1 - загальний вібраційний сигнал; 2 - порядковий сигнал на долоті

У Табл. 3.1. наведено статистичні характеристики порядкових сигналів на долоті, що відповідають трьом різновидам залізної руди Лавриківського родовища ПрАТ «Полтавський ГЗК»: Mean – середнє значення; Median – медіанне значення; RMS – середньоквадратичне значення; STD – стандартне відхилення; VAR – дисперсія).

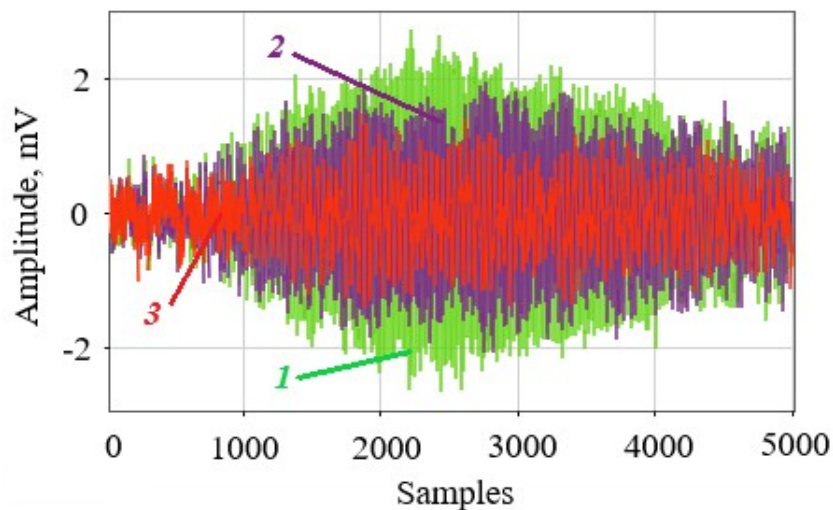


Рис. 3.9. Порядкові сигнали на долоті, що відповідають трьом різновидам залізної руди: 1- $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 42,2\%$; 2 - $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 23,5\%$; 3 - $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 16,5\%$

Табл. 3.1. Параметри аналізуемого сигналу вібрації бурової установки у часовій області [111]

Параметр	Mean	Median	RMS	STD	VAR
Сигнал 1	1.334	1.3701	1.4556	0.6072	0.3687
Сигнал 2	0.9736	0.9996	1.0716	0.4477	0.2004
Сигнал 3	0.6180	0.6155	0.6819	0.2881	0.0830

Слід відмітити виражену залежність характеристик отриманих вібраційних сигналів від вмісту оксидів ферума $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$. Так, наведені у табл. 3.1 дані відповідають залізній руді із вмістом $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 42,2, 23,5, 16,5 (%), а загальна кореляція RMS отриманих сигналів з цим показником становить 81-85 для руд з різним мінералогічним складом. Це можна пояснити переважною твердістю і міцністю зазначених складових над іншими.

Аналіз виконаних експериментальних досліджень та моделювання процесу взаємодії долота з гірською породою дозволяє зробити висновок про те, що отримані статистичні показники супутнього вібраційного сигналу дійсно адекватно характеризують процес буріння свердловин. Разом с тим, слід зазначити, що, за умов різноманіття мінерального складу та текстурно-структурних особливостей залізної руди, використання тільки наведених параметрів вібраційного сигналу недостатньо для надійного визначення її мінералого-технологічних різновидів.

3.3. Буріння свердловин, як процес енергоємної контактної взаємодії

Під час буріння свердловин існує динамічний процес взаємодії між буровим долотом і породою через обертання та силу стиснення, що прикладається до бурового інструменту. Порода поглинає енергію, джерелом якої є бурова установка [150,151]. Енергоємність процесу буріння є його інтегрованою характеристичною ознакою. Цей показник залежить від фізико-механічних властивостей і текстурно-структурних особливостей гірської породи,

кінематичних і режимних параметрів бурової установки та безпосередньо впливає на швидкість проходки та енергоефективність всього процесу [47, 152].

Дослідження бурового механізму показують, що кінетична енергія долота з урахуванням осьового зусилля і крутного моменту витрачається на руйнування породи, пружно-пластичні деформації, розвиток радіальних тріщин, тертя, тепло, вібрації, акустичну та електромагнітну емісію (рис. 3.10) [153-156].

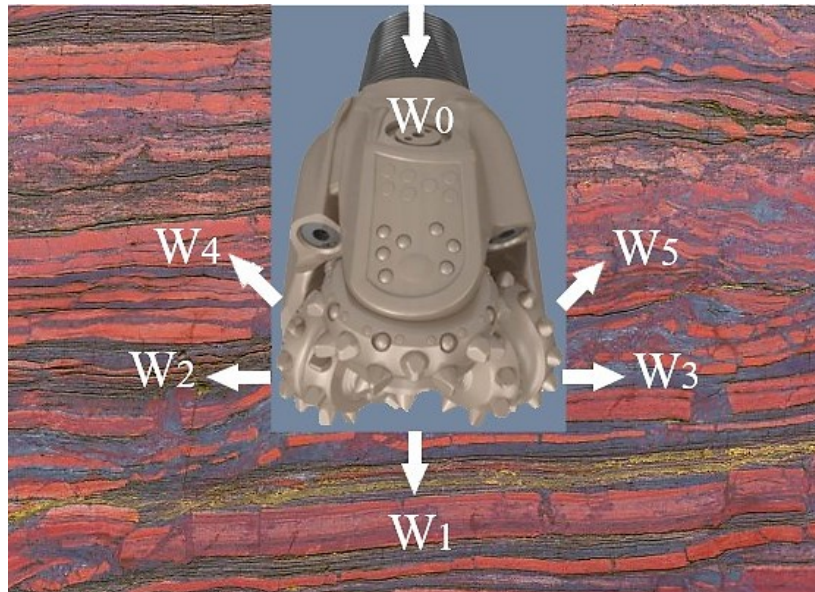


Рис. 3.10. Перетворення енергії під час буріння

Енергія, прикладена до бурового долота, перетворюється та розсіюється на різних етапах процесу і згідно із законом збереження енергії складає його енергетичний баланс

$$W_0 = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5, \quad (3.19)$$

де; W_0 - загальна робота, виконана долотом; W_2 - енергія, використана для формування зон тріщин; а W_3 - тепло, що виділяється під час буріння; W_4 - вібрація; W_5 - акустична та електромагнітна емісія

Складова W_1 відповідає енергії, необхідній для руйнування зразка породи [153, 155], і повністю визначається властивостями породи та експлуатаційними параметрами. Руйнування породи є бажаним результатом, інші супутні процеси можуть бути ефективно використані для визначення інформативних характеристичних властивостей гірської породи. Однак вирішення цієї

задачі ускладняється труднощами виявлення та виділення відповідних компонентів за різних умов буріння.

Однією із причин спотворення інформативних параметрів, що характеризують процес буріння, є вплив фрикційних втрат на енерговитрати, як функції від глибини та просторового розподілу взаємодії бурового інструменту з гірською породою [157].

У процесі буріння основне навантаження на долото визначається зусиллями, що розвиваються на породоруйнівній коронці. Навантаження з глибиною буріння зростає за рахунок фрикційних втрат в свердловині, що утворюється в процесі буріння - тертя інструменту об стінки свердловини. Зі зростанням глибини відбувається збільшення виробленої у процесі буріння маси дрібної гірської породи, що спричиняє зростання енерговитрат на її евакуацію з метою очищення свердловини.

Фрикційні втрати в свердловині, обумовлені тертям бурового інструменту об її стінки, можуть бути враховані за допомогою залежності у вигляді моменту тертя [157, 158]

$$M_s = M_{so} + k_s \int h w dt, \quad (3.20)$$

де; M_{so} , k_s , h , t – початкове значення моменту тертя, коефіцієнт пропорційності, питома подача інструменту та час буріння (як незалежна змінна).

Принцип Гамільтона в динамічному аналізі руху бурової колони можна виразити наступним чином: у всіх можливих її пересуваннях зі стану в момент часу t_1 до стану в момент t_2 за умови дотримання межі переміщення реальний рух бурової колони змушує функціонал Гамільтона до екстремуму. Коли бурова колона рухається в стовбурі свердловини, вона третяся та стикатися зі стовбуром свердловини. Сила в'язкого демпфування і сила динамічного тертя, що діє стовбуром свердловини на бурову колону, є неконсервативними силами. Тому, застосовуючи принцип Гамільтона до системи бурової установки, слід враховувати розсіювання енергії, викликане неконсервативними силами, що можна визначити таким чином [150]

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V) dt + \delta \int_{t_1}^{t_2} W dt = 0, \quad (3.21)$$

де; δ - варіаційний символ; T - кінетична енергія бурової колони, Дж; V - потенціальна енергія бурової колони, Дж; W - загальна робота, виконана консервативною та неконсервативною силами на буровій колоні, Дж.

У роботі [159] запропонований корисний параметр MSE (механічна робота, виконувана для видобутку одиниці об'єму гірської породи), заснований на принципі балансу роботи-енергії, що є сумою енергії, виробленої за 1 хв компонентами навантаження та обертання

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi \cdot RPM \cdot T}{A_b \cdot ROP}, \quad (3.22)$$

де; A_b - площа долота (m^2), WOB - навантаження на долото (Н), ROP - швидкість проходки (м/хв), T - крутний момент (Н·м), RPM - швидкість обертання (об/хв)).

У наведеній вище моделі, крутний момент на долоті є головною змінною. За відсутності можливості отримання надійних результатів вимірювань крутного моменту, розрахунок MSE на основі цієї моделі містить великі джерела помилок. Хоча крутний момент на долоті можна виміряти в лабораторії та за допомогою систем вимірювання під час буріння (MWD), більшість польових даних все ж доступна у формі поверхневого вимірювання.

У роботі [160] розглянуто простий метод розрахунку крутного моменту у вибої із застосуванням коефіцієнта тертя ковзання долота для вираження крутного моменту як функції WOB

$$T = \int_0^{D_b/2} \int_0^{2\pi} \rho^2 \frac{4\mu_b WOB}{\pi D_b^2} d\rho d\theta = \int_0^{D_b/2} \frac{8\mu_b WOB}{D_b^2} \rho^2 d\rho = \frac{\mu_b \cdot WOB \cdot D_b}{3}, \quad (3.23)$$

де; D_b - діаметр долота; μ_b - питомий коефіцієнт тертя-ковзання долота.

У рівнянні (3.23) WOB змінюється на WOB_b . Тоді модель крутного моменту нижнього отвору на долоті [161] буде мати наступний вигляд

$$T_b = \frac{\mu_b \cdot WOB_b \cdot D_b}{3} = \frac{\mu_b \cdot WOB \cdot e^{-\mu_{yb} \cdot D_b}}{3}, \quad (3.24)$$

Відповідно модель (3.22) перетворюється наступним чином

$$MSE = WOB \cdot \left(\frac{1}{A_b} + \frac{13.33 \cdot \mu_b \cdot RPM}{D_b \cdot ROP} \right), \quad (3.25)$$

У цій моделі крутний момент долота обчислюється за допомогою WOB. Однак WOB знов ж таки завжди зчитується на основі поверхневих вимірювань, що не є справжнім WOB нижнього отвору. Існує велика різниця між реальним WOB нижнього отвору та WOB поверхневого вимірювання [161]. Крім того кожне долото має певну механічну ефективність при бурінні навіть якщо воно зовсім нове, тому у моделі [160] також існує джерело певної похибки в розрахунку MSE.

Слід зазначити, що механічна ефективність є не тільки специфічною для долота, але й для конкретної формації, і вона може сильно відрізнятись для кожного долота та від пласта до формації, тому її слід визначати відповідно до реальних умов буріння [162]. Тому у ряді робіт MSE на основі моделі (3.22) визначається за формулою [163]

$$MSE = E_m \left(\frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi \cdot RPM \cdot T}{A_b \cdot ROP} \right), \quad (3.26)$$

де; E_m - механічна ефективність нового долота.

Властивості породи самі по собі можуть достатньо точно передбачити енергію буріння, дозволяючи у реальному часі регулювати параметри буріння та ідентифікувати неоптимальний режим буріння. Аналіз результатів випробувань зразків гірської маси із кар'єрів Північного ГЗК показує тісний зв'язок між питомою роботою руйнування a та коефіцієнтом міцності руди f (рис. 3.11) [90, 164]

$$a = 0,87f - 0,0035. \quad (3.27)$$

Природним підходом для оцінки міцності гірської породи, як однієї з характеристик її властивостей, за допомогою визначення енергії руйнування є використання для цих цілей енерговитрат на технологічну операцію, яка для цього використовується. У наведеному вище прикладі для цього використовувалася операція товчення, що виконується в лабораторних умовах [164].

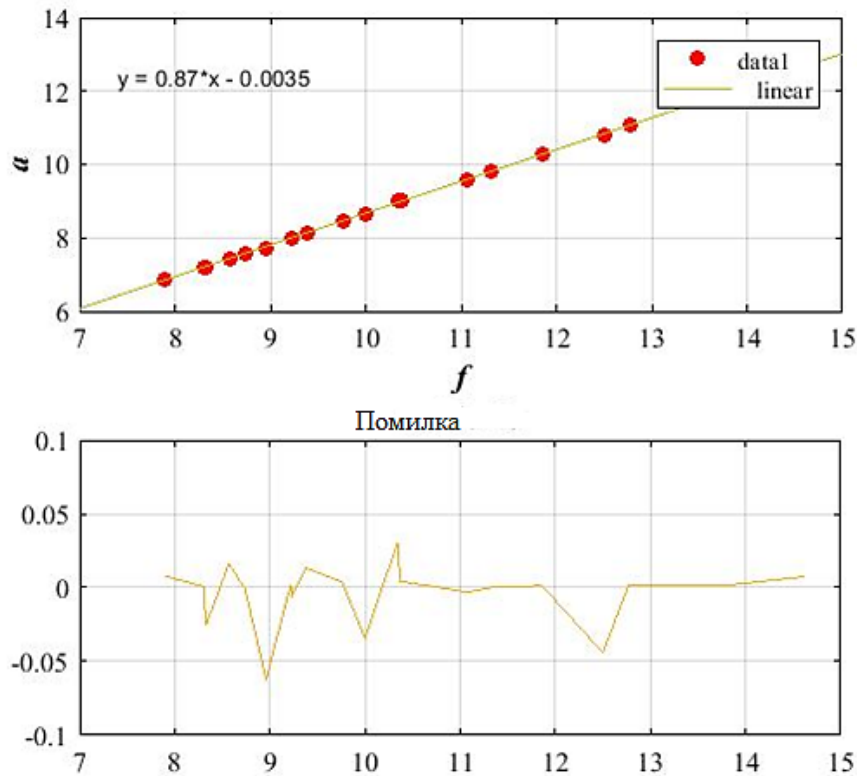


Рис. 3.11. Залежність між питомою роботою руйнування a та коефіцієнтом міцності руди f

Тісний зв'язок питомої енергії, витраченої на буріння, та властивостей породи також підтверджено у роботі [165]. Фізико-механічні властивості породи не може бути визначені одним параметром, оскільки на них впливають різні фактори: властивості міцності (UCS, міцність на розрив і міцність при точковому навантаженні), механічні властивості (крихкість породи, модуль Юнга, робота руйнування), геологічні параметри, твердість, енергетичні властивості [166]. UCS вважається найважливішою механічною властивістю гірських порід у геоінженерних та геотехнічних роботах [167].

Зв'язок між питомою енергією (y) та UCS (x) осадових гірських порід (сланці (UCS = 19.6), дрібнозернистий пісковик (UCS = 42.1 - 76.6), вапняк (UCS = 91.2-119.0)) відповідає залежності [168]

$$y = 0.029x + 6.955 \text{ (GJ)} \quad \text{з} \quad R^2 = 0.921. \quad (3.28)$$

Така ж залежність, але для формацій з більш міцними породами, визначається відповідно до результатів досліджень [168]:

- для гірської породи 1 (латерит, піщана глина, пісковик, граніт, кварцит)

$$y_1 = 0.0409x + 4.51 \text{ з } R^2 = 0.9629, \quad (3.29)$$

- для гірської породи 2 (латерит, латеритова глина, пісковик, граніт, кварцит)

$$y_2 = 0.031x + 6.76 \text{ з } R^2 = 0.6753, \quad (3.30)$$

- для гірської породи 3 (латерит, слюдяний сланець, мігматитовий гнейс, діорити, кварцит)

$$y_3 = 0.0316x + 5.437 \text{ з } R^2 = 0.8815. \quad (3.31)$$

Важливим фактом, є те, що наявність тріщин у гранітній породі впливає на швидкість буріння та питому енергію [166, 168]. Наприклад, тріщинувата структура гранітних утворень призводить до збільшення швидкості проникнення та зменшення необхідної питомої енергії. В ідеалі граніт і кварцит є надзвичайно міцними породами, які вимагають високої питомої енергії буріння та знижують швидкість проникнення. Однак наявність тріщин призводить до зниження когезії, тобто послаблення зв'язку у структурі матеріалу породи. Наслідком є зниження міцності гранітної формації, що і сприяє збільшенню швидкості проникнення, зниженню питомої енергії, а відповідно і підвищенню ефективності буріння. Щодо інформативних ознак цього явища, то це зменшення R^2 (0.6753 у порівнянні з 0.9629 району, в якому відсутня тріщинуватість), збільшення дисперсії амплітуди вібраційних коливань та підвищення їх пікових значень.

У цілому, з наведеного можна зробити висновок, що питома енергія SE-є одним з найважливіших параметрів для моніторингу та оптимізації буріння. Першим кроком до оптимізації продуктивності буріння за допомогою SE-є визначення енергії, яка використовується під час буріння. На рис. 3.12 наведено модель у розширенні Simscape® для Simulink® /MATLAB® [109], що імітує саме таку операцію.

У наведеній на рис. 3.12 моделі використано: 1 - блок DC Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 2 - блок Power Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 3 – блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 4 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities;

5 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 6 – блок Inductor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 7 – блок Rotational Electromechanical Converter із бібліотеки Simscape / Electrical Elements; 8 – блок Inertia із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 9 – блок Rotational Friction із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 10 – блок Ideal Torque Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 11,12,13 – блоки Mechanical Rotational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 14 – блок Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 15,16 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 17 – блок Integrator із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Continuous; 18 – блок Display із бібліотеки Simulink / Sinks; блоки 19,20 – блоки Gain із бібліотеки Simulink / Math Operations; 21 – блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 22 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks.

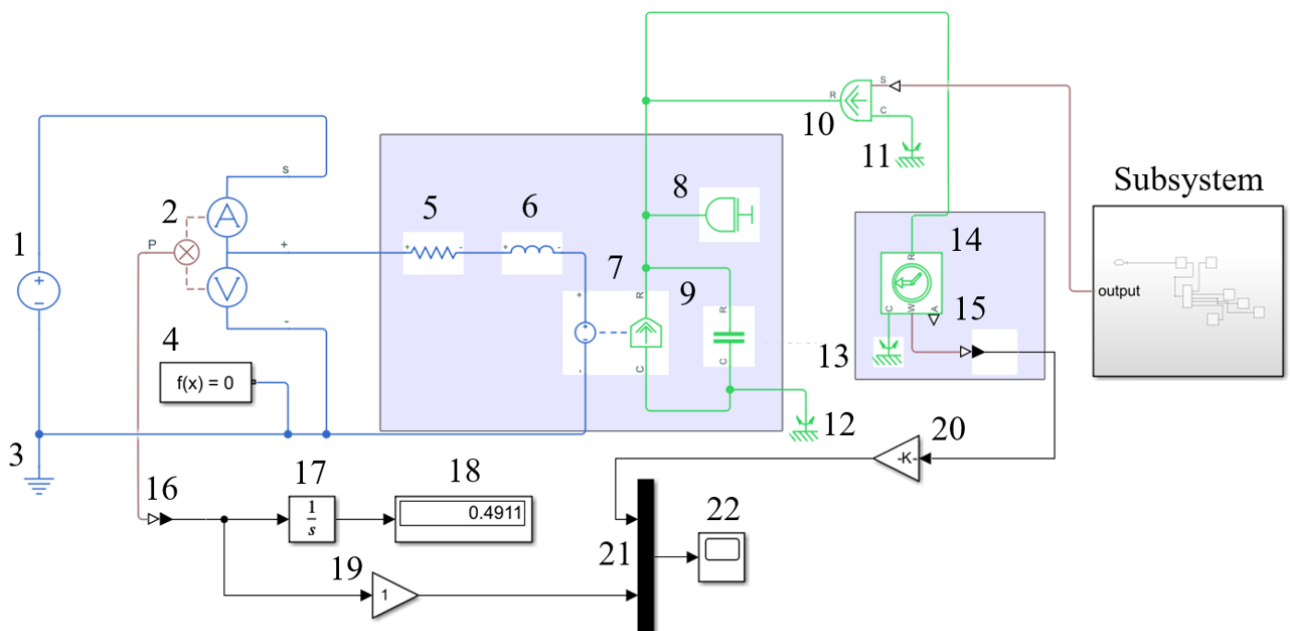


Рис. 3.12. Модель визначення енергетичних параметрів процесу буріння свердловин

Блок 1– є ідеальним джерелом напруги постійного струму, достатньо потужним, щоб підтримувати задану напругу на своїх клеммах незалежно від

струму, що протікає через джерело. Блок 2 – обчислює електричну потужність, яка споживається із зміною навантаження. Датчик визначає або миттєву потужність, або потужність, усереднену за фіксований період часу. Блоки 5-9 – відтворюють модель приводного двигуна бурової установки. Блок 10 – формує змінний прикладений крутний момент до валу двигуна, а блок 14 – вимірює його значення. Блок 17 – інтегрує виміряний параметр за часом і надає результат як вихідний сигнал. Блок 18 – показує значення вхідних даних у цифровій формі, а блок 22 – надає вид отриманого сигналу. Блок Subsystem моделює зміни прикладеного крутного моменту у часі і за величиною, та наявність збурень і перешкод у вимірюваному сигналі.

Для моделювання впливу характеристик породи на параметри буріння використано підхід, викладений у роботі [165], у якій досліджено модель множинної регресії для міцності породи на стиск UCS. У цій роботі з застосуванням підходу ANOVA здійснено загальну перевірку значущості 54 факторів на відповідь (UCS). Основними розглянутими робочими параметрами визначено діаметр (D) долота, швидкість обертання (S) і швидкість проникнення (PR), тяга (T), що створюється на буровому долоті, і крутний момент (TQ), що розвивається на межі долота з породою.

Зміна тяги під час буріння добре пов'язана з налаштуваннями роботи бурової установки та міцністю породи [169]. Для алмазного бурового долота у роботах [39] отримано таке співвідношення крутного моменту

$$\text{Torque} = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot T \cdot \frac{(r_0^3 - r_i^3)}{(r_0^2 - r_i^2)}, \quad (3.32)$$

де; T - тяга долота (N); r_0 - зовнішній радіус долота (м); r_i - внутрішній радіус долота (м); μ - коефіцієнт тертя між породою та алмазним буровим буром.

Значення μ , яке запропоновано Chugh [170] для гірських порід, становить 0,4.

Спостерігається лінійний зв'язок між середньою тягою та крутним моментом, що виникають під час буріння різних осадових порід. Наступна модель витягнута з набору робочих змінних процесу буріння для прогнозування UCS

$$UCS = 75.3 - 0.7201 \cdot S + 0.5168 \cdot T - 29.66 \cdot TQ + 0.000479 \cdot S \cdot S, \quad (3.33)$$

де; S - швидкість обертання долота; T – тяга; TQ – крутний момент.

Зазначається, що синтезована модель відповідає за $R^2 = 93,60\%$ усієї варіації UCS.

Залежність (3.33) використано у сформованій моделі (рис. 3.12) для моделювання впливу властивостей породи, зокрема UCS, на параметри буріння. Для цього у блоці Subsystem1 за допомогою субблоків Step формуються ступінчасті зміни TQ , що згідно рівнянню (3.33) відповідає змінам UCS. Зміни текстурно-структурних характеристик породи, що буриться, імітуються за допомогою субблоку Uniform Random Number у блоці Subsystem.

На рис. 3.13 наведено результати моделювання змін споживаної потужності у часі в залежності від прикладеного крутого моменту (змін UCS породи, що буриться) та результати вимірювань використаної енергії за визначений проміжок часу.

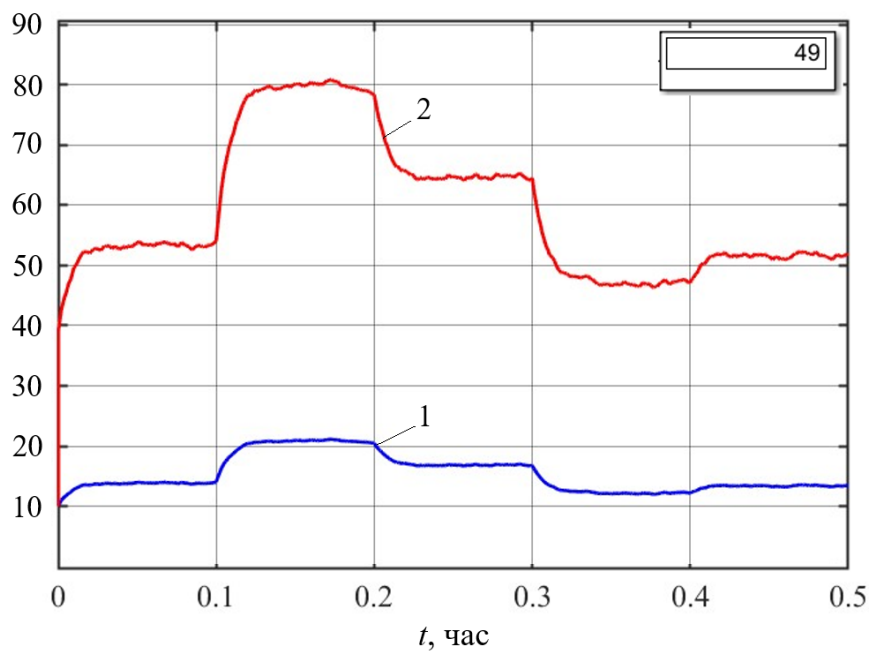


Рис. 3.13. Результати моделювання змін споживаної потужності у часі в залежності від прикладеного крутого моменту та результати вимірювань використаної енергії за визначений проміжок часу: 1 - крутний момент /10, Н · м; 2 – споживана потужність, кВт

У наведеному прикладі зміна крутного моменту на долоті відповідає зміні UCS гірської породи у діапазоні 75 – 125 МПа.

Як свідчать наведені залежності та результати моделювання, властивості породи мають високу кореляцію з питомою енергією буріння. А це, у свою чергу, дозволяє вважати, що оптимізація буріння із застосуванням зазначених залежностей є корисним, швидким і непрямим методом.

Нехай $N(t) = U_0 I(t)$ - потужності, які споживаються приводними двигунами установки (U_0 – прикладена напруга, $I(t)$ – електричний струм, що змінюється у часі t). Тоді завдання зіставлення функції $N(t)$ деякому шуканому параметру, який визначає міцність гірської породи на глибині $f(z)$, зводиться до вирішення двох завдань: за часом - визначення ефективних значень параметрів міцності f , питомої подачі інструменту $h(t)$ і глибини буріння $z(t)$; у просторі – відновлення реальних значень параметрів міцності за їх ефективними значеннями [157, 158].

Етапи розв'язання задачі інтерпретації непрямих експериментальних даних можна сформулювати наступним чином:

- пошук і побудова функціональних залежностей, що описують зв'язок між шуканими характеристиками міцності досліджуваного об'єкта і режимними (силовими і кінематичними параметрами), що розвиваються на робочому органі бурової установки;
- розв'язання другого завдання динаміки (при невідомих значеннях навантаження на робочому органі бурової установки);
- відновлення ефективних значень силових (M, F) та кінематичних (V, ω) параметрів, що розвиваються на робочому органі як функцій від часу;
- відновлення реальних значень силових (M, F) та кінематичних (V, ω) параметрів та відповідного їм енергоспоживання приводних двигунів за їх ефективними значеннями;
- вироблення управлінських рішень на компактні узагальнені дані.

Наведені вище залежності свідчать про те, що виражені в тому чи іншому вигляді енерговитрати є універсальною характеристикою енергоємної

контактної взаємодії, однак лише одного цього параметра недостатньо для ідентифікації такої складної гетерогенної структури, як гірська порода [158]. Ідентифікація геологічної структури свердловини буде успішною тільки в тому випадку, якщо буде використовуватися максимальна кількість даних про процес буріння, а навчальна множина включатиме повний обсяг інформації про всі мінеральні утворення, які можуть зустрітися в процесі проходження свердловини. Отримати додаткову інформацію для вирішення поставленого завдання пропонується шляхом оцінки характеристик вібрації бурової установки.

3.4. Кількісна оцінка нелінійності взаємодії бурового долота і породи в процесі буріння свердловин

У попередніх підрозділах було показано, що при контактній взаємодії долота з породою відбувається нелінійна зв'язана аксіально-крутильна вібрація бурової колони (штанги) і процес буріння свердловин доцільно представити у вигляді трьох робочих режимів. При цьому вихід бурової установки у третій режим неефективного буріння відбувається завдяки сукупності факторів, що супроводжується підвищенням амплітуди усіх видів вібрації, появою ефекту прихват-прослизання долота, зменшенням швидкості проходки та збільшенням питомих енерговитрат [47].

Явище прихват-прослизання долота можна дещо придушити, відповідним чином збільшивши кутову швидкість його обертання. Однак надмірна кутова швидкість обертання може призвести до збільшення амплітуди осьових коливань та викликати явище підстрибування долота. Зі збільшенням номінального тиску буріння, бурильні колони стають більш схильними до пошкодження в результаті збільшення відносного кутового зміщення, що означає велику деформацію кручення. Водночас, чим більший номінальний тиск буріння, тим довша тривалість прихвату. Збільшення жорсткості пласта призводить до меншої амплітуди осьових коливань та більшої кутової швидкості обертання, що

відповідає піку амплітуд. Однак, зміна жорсткості пласта має менший вплив на амплітуду крутильних коливань [101, 171].

Важливою умовою оптимізації буріння, недопущення неефективних режимів роботи бурової установки є визначення інформативних ознак, що їх засвідчують. Далі розглянуто метод визначення кількісної оцінки нелінійності процесу взаємодії бурового долота і породи, який дозволяє засвідчити перехід бурової установки у режим неефективного буріння.

Нелінійний часовий ряд генерується нелінійною функцією зворотного зв'язку, що формується при реалізації керування процесом.

$$x(n) = \varphi(x(n-1), x(n-2), \dots, u(n-1)) + w(n), \quad (3.34)$$

$$y(n) = h(x(n)) + v(n), \quad (3.35)$$

$$u(n) = g(y(n)), \quad (3.36)$$

де; $\varphi(x(n-1), x(n-2), \dots, u(n-1))$ – динаміка процесу; $x(n)$ – внутрішній стан; $y(n)$ – вимірювання процесу; $h(x(n))$ – функція вимірювання (лінійна або нелінійна); $g(x(n))$ – нелінійна функція зворотного зв'язку; $w(n)$ та $v(n)$ – шум процесу та вимірювання відповідно.

Контури керування, що мають елементи з нелінійними характеристиками (вібрації, тертя та/або нелінійними несправностями), призводять до подібної поведінки та описуються тією ж структурою моделі.

Оскільки контакт між буровим долотом і породою утворює профіль листової поверхні, який можна визначити за профілем із синусоїдальною зміною, вираження глибини різання s виглядає наступним чином [172]

$$s = s_0 \sin(n_b \phi), \quad (3.37)$$

де; s_0 - початкова глибина різання, $n_b = 1$ для біта PDC.

Зв'язок між осьовою вібрацією та крутильною вібрацією бурильної колони завершується взаємодією між долотом і пластом. При цьому зміна тяги на долоті W_b полягає в наступному [171]

$$W_b = \begin{cases} k_c \left(\frac{W_0}{k_c} + U - V_0 t - s_0 \sin(n_b \phi) \right) & \text{if } \left(\frac{W_0}{k_c} + U - V_0 t \right) \geq s_0 \sin(n_b \phi) \\ 0 & \text{if } \left(\frac{W_0}{k_c} + U - V_0 t \right) < s_0 \sin(n_b \phi) \end{cases}, \quad (3.38)$$

де; k_c - жорсткість утворення; W_0 – номінальна тяга на долоті.

Коли $\left(\frac{W_0}{k_c} + U - V_0 t \right) < s_0 \sin(n_b \phi)$, у цей час відбувається відскок бітів, значення W_b дорівнює 0.

Вираження крутного моменту на долоті T_b [173] складається з W_b , радіуса долота r_b , функції тертя $\mu(\phi)$, і глибини різання δ_c , а саме:

$$T_b = W_b \left(\frac{2}{3} r_b \mu(\phi) + \xi \sqrt{r_b \delta_c} \right), \quad (3.39)$$

де поведінка тертя між долотом і пластом $\mu(\phi)$ виражається як [174, 175]

$$\mu(\phi) = \frac{2}{\pi} \tanh^{-1}(\varepsilon \dot{\phi}) \left(\frac{f_1 - f_0}{1 + \delta_c |\dot{\phi}|} + f_0 \right), \quad (3.40)$$

$$\text{де; } \delta_c = \frac{2\pi R_p}{\Omega_0}, \quad (3.41)$$

де; R_p є функцією номінального тиску буріння W_0 і кутової швидкості руху Ω_0 , а C_1, C_2 - константи.

$$R_p = C_1 W_0 \sqrt{\Omega_0} + C_2. \quad (3.42)$$

Характеристика зазначеного процесу є періодичною, але несинусоїдальною, і тому містить гармоніки. Відмінною ознакою нелінійного часового ряду є наявність фазового зв'язку, який створює когерентність між частотними діапазонами. Наявність гармонік та фазового зв'язку, таким чином, є показниками наявності нелінійності у досліджуваному процесі [176].

Моделювання впливу спотворень, які вносяться досліджуваним середовищем, на параметри пакетного вібраційного сигналу, що розповсюджується в буровому інструменті, виконано у програмному середовищі Simulink® /MATLAB® [177].

У наведений на рис. 3.14 моделі використано наступні блоки Simulink® /MATLAB® [177]: 1 - блок Random Source із бібліотеки DSP System Toolbox / Sources; 2 - блок Signal Generator із бібліотеки Simulink / Sources; 3 - блок Gain

із бібліотеки Simulink / Math Operations; 4 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 5 - блок Polynomial із бібліотеки Simulink / Math Operations; 6 - блок Zero-Order Hold із бібліотеки Simulink / Discrete; 7 - блок Spectrum Analyzer із бібліотеки DSP System Toolbox / Sinks; 8 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks; 9 – блок THD із бібліотеки Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements; 10 - блок Display із бібліотеки Simulink / Sinks.

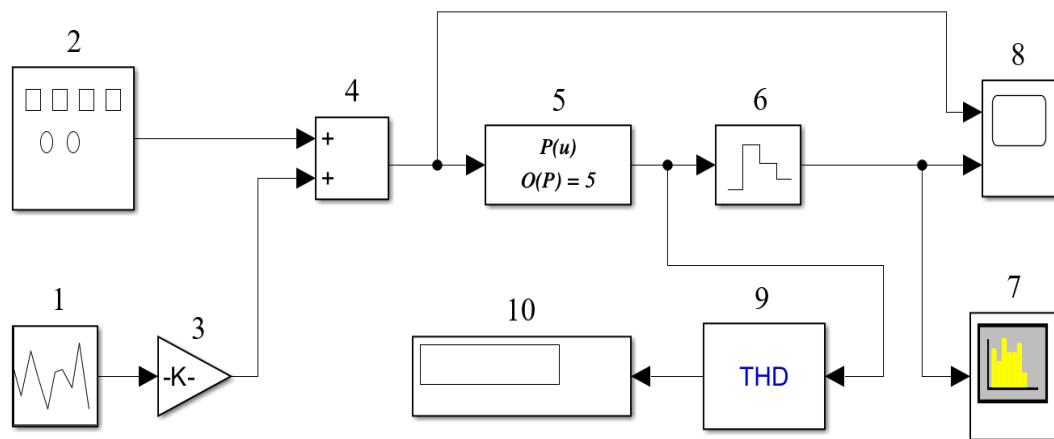


Рис. 3.14. Блок-схема структури для моделювання методу кількісної оцінки нелінійності взаємодії бурового долота і породи

Блок Random Source генерує кадр із M значень, взятих із рівномірного або гауссового псевдовипадкового розподілу. Блок Signal Generator формує аналоговий синусоїдний сигнал. Блок Sum виконує операції додавання зазначених сигналів на своїх входах.

Блок Polynomial обчислює $P(u)$ на кожному часовому кроці для вхідного значення u . Блок визначає набір поліноміальних коефіцієнтів у формі, яку приймає команда `polyval` MATLAB®.

Блок Zero-Order Hold реалізує період вибірки нульового порядку, тобто зберігає свої вхідні дані протягом указанного періоду вибірки.

Блок Spectrum Analyzer відображає сигнали в частотній області та частотний спектр сигналів у часовій області. Блок виконує спектральну оцінку за допомогою методу банку фільтрів і методу усереднених модифікованих періодограм Велча (Welch).

Блок THD обчислює загальний коефіцієнт гармонійних спотворень періодичного спотвореного сигналу. Коефіцієнт гармонійних спотворень (THD) визначається як середньоквадратичне (RMS) значення загальної гармонійної складової сигналу, поділене на середньоквадратичне значення його основного сигналу. Для випадку, коли вимірюваним параметром сигналу є напруга [178] THD визначається наступним чином [101]

$$THD = \frac{U_H}{U_F}, \quad (3.43)$$

$$U_H = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}, \quad (3.44)$$

U_H - середньоквадратичне значення напруги n гармонік;

U_F - середньоквадратичне значення (RMS) напруги основного сигналу.

Справжнє RMS значення вхідного сигналу обчислюється протягом вікна ковзного середнього одного циклу заданої основної частоти [179]

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t)^2 dt}, \quad (3.45)$$

де; $f(t)$ – вхідний сигнал, а $T = 1$ - (основна частота).

Сумарний сформований сигнал через блок моделювання нелінійності (блок Polynomial) та дискретизатор (блок Zero-Order Hold) подається на аналізатор спектру. Блок, що моделює нелінійність досліджуваного середовища, вносить паразитні тони на частотах гармонік, має передатну функцію у вигляді полінома та визначає значення полінома ступеня n , обчислене у точці x [180]

$$y = \text{polyval}(p, x). \quad (3.46)$$

Вхідний аргумент p являє собою вектор довжини $n+1$, елементами якого є коефіцієнти у спадних ступенях багаточлена, що використовується

$$y = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_n x + p^{n+1}, \quad (3.47)$$

де; x може бути матрицею чи вектором.

У наведеному прикладі для аналізу використовуються 2048 вибірок синусоїди частоти 2.20 кГц, виробленої на рівні 50 кГц. До сигналу додано

білий гаусівський шум таким чином, щоб відношення сигнал-шум (SNR) становило 20-80 дБ. Значення коефіцієнтів полінома p_n визначалися виразом

$$\text{amp} = [2\text{e-}3 \ 7\text{e-}4 \ -4\text{e-}1 \ 3\text{e-}3 \ 0.5 \ 2\text{e-}1] . \quad (3.48)$$

Для оцінки нелінійних спотворень досліджуваного сигналу визначаються характеристичні функції SNR (відношення сигнал/шум) та THD (повне гармонійне спотворення) [180].

Величина SNR, як і THD, обчислюється на основі даних швидкого перетворення Фур'є (FFT)

$$\text{SNR} = 20\log\left(\frac{S}{N}\right), \quad (3.49)$$

де; S – досліджуваний сигнал (Fundamental); N (Nois) – шумова складова.

Гармоніки сигналу виключаються з розрахунку, залишаючи лише шумові складові. На практиці необхідно лише виключити перші 5 гармонік, оскільки вони домінують (рис. 3.15) [101, 180, 181].

Функція THD характеризує повне гармонійне спотворення, обчислює відношення потужності гармонік до сигналу основної частоти та ігнорує постійну складову та шум.

На рис. 3.16 наведено результати обчислення THD для SNR 20-80 dB. Наведені результати свідчать про те, що наявність та значні зміни рівня шуму в процесі вимірювань практично не впливають на отримані значення THD [101].

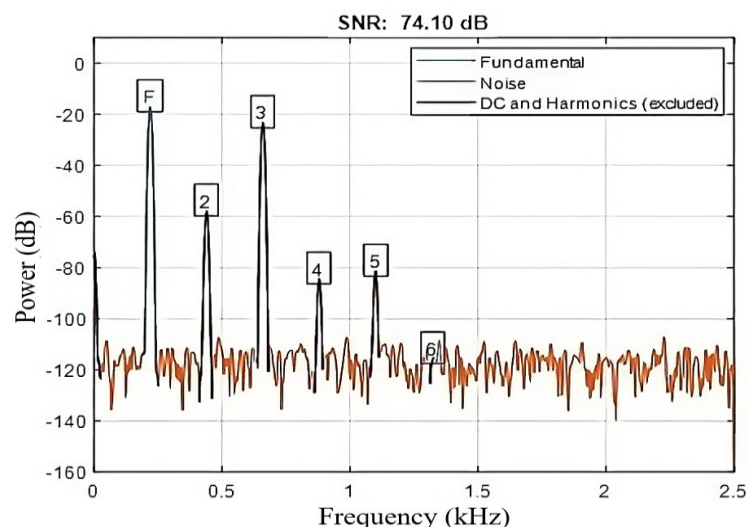


Рис. 3.15. Результати обчислення SNR

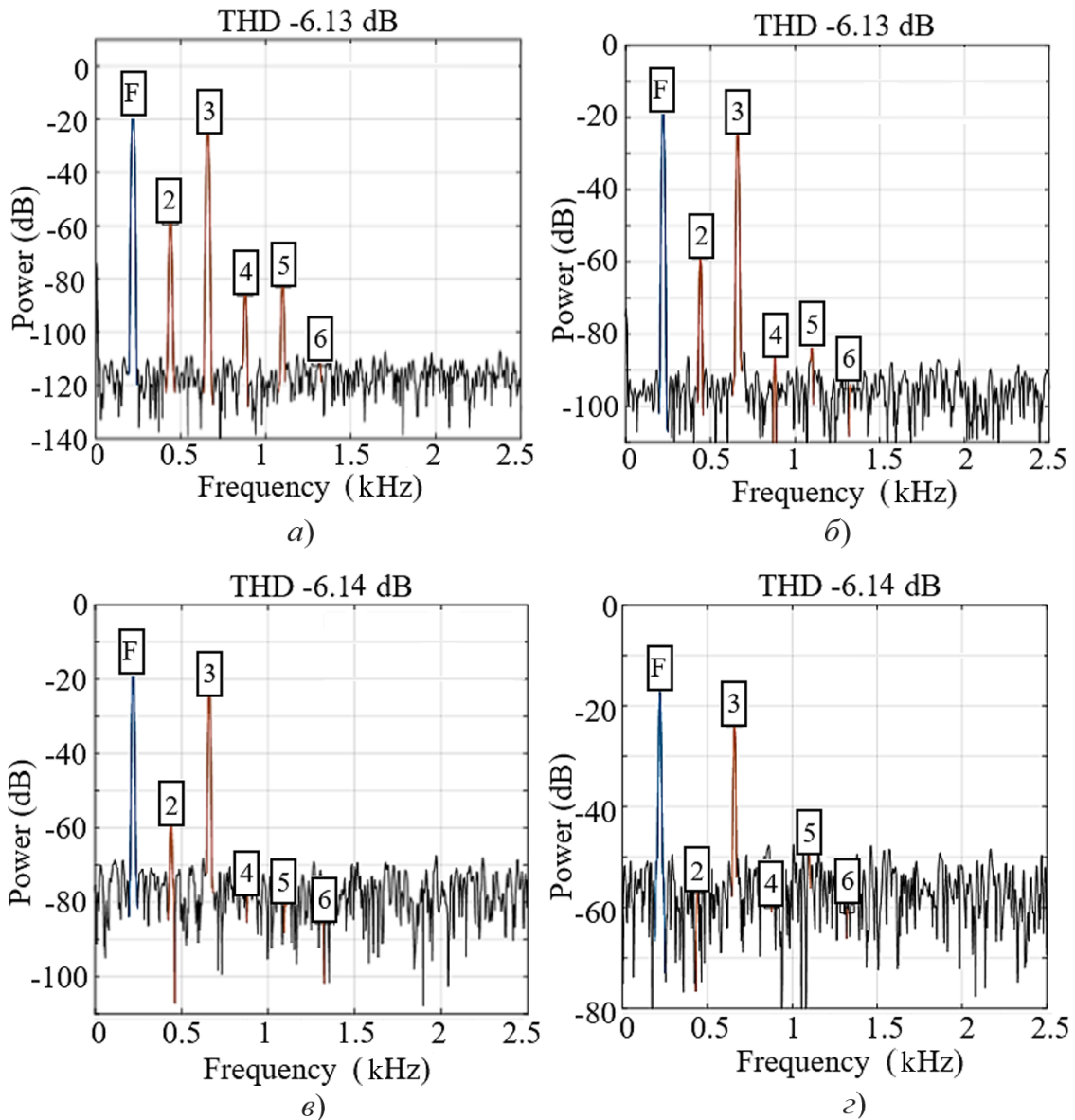


Рис. 3.16. Результати обчислення THD: а) - SNR = 80 dB; б) - SNR = 60 dB; в) - SNR = 40 dB; г) - SNR = 20 dB

Для вирішення поставленої задачі визначення кількісної оцінки нелінійності процесу взаємодії бурового долота з породою із використанням моделі, наведеної на рис. 2.20, досліджено нелінійні спотворення гармонічних складових вібраційного сигналу в процесі еволюції ефекту прихват-прослизання бурового долота при його взаємодії з породою. З цією метою отримані сигнали із зазначеної моделі (рис. 2.20) оброблялись за допомогою блоку Spectrum Analyzer та APPS Matlab Signal Analyzer. На рис. 3.17 наведено результат спектрального аналізу вібраційного сигналу, що спотворюється на тлі еволюції ефекту прихват-прослизання долота.

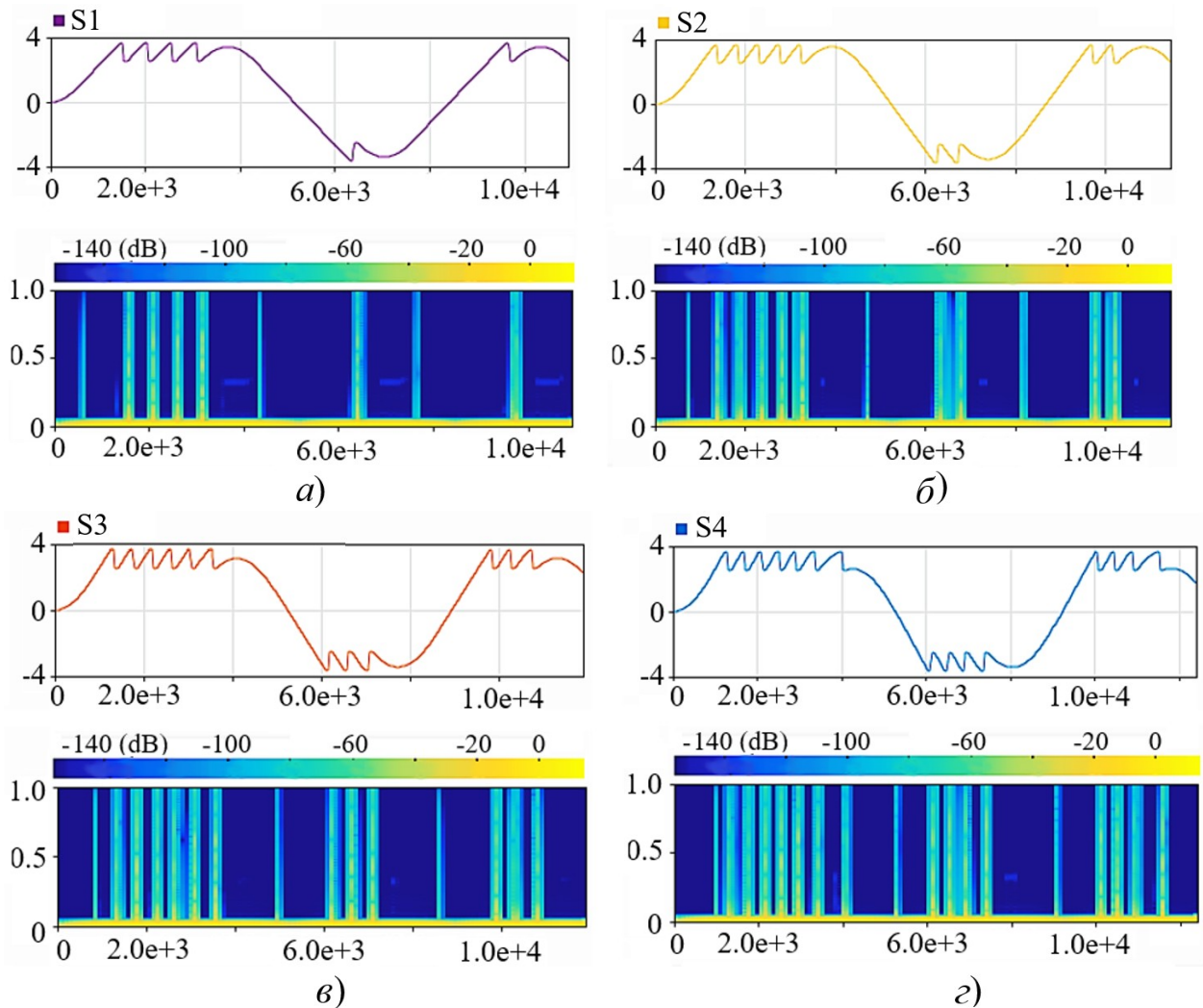


Рис. 3.17. Результат спектрального аналізу вібраційного сигналу, що спотворюється на тлі еволюції ефекту прихват-прослизання долота

Для наведених сигналів S1-S4 отримано значення THD, відповідно: -2,5533; -2,7926; -2,9751; -3,1109. Тобто визначені значення THD надають адекватну кількесну оцінку нелінійності процесу взаємодії бурового долота з гірською породою.

Таким чином, використання величини гармонійного спотворення вібраційного сигналу бурового долота THD, що визначається величиною відношення середньоквадратичного значення загальної гармонійної складової до середньоквадратичного значення основного сигналу, як інформативної ознаки ефективності буріння свердловин, дозволяє засвідчити перехід процесу до неефективного режиму, запобігти підвищенню амплітуди усіх видів вібрації, ефекту прилипання-ковзання долота, зменшенню швидкості проходки та збільшенню питомих енерговитрат. Отже, THD є важливою характеристичною

ознакою процесу взаємодії бурового долота з гірською породою, яку доцільно використовувати для визначення її властивостей.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Складний мінералогічний склад та текстурно-структурні особливості покладів залізної руди обумовлюють і певні особливі характеристичні ознаки супутнього вібраційного сигналу в процесі контактної взаємодії бурового долота з гірською породою.
2. Супутній віброакустичний сигнал, що виникає при бурінні свердловин і розповсюджується як у гірському масиві, так і у буровому інструменті, є інтегруючим джерелом інформації щодо характеру і режиму роботи бурової установки. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд, а в частотній області - його спектром.
3. Вібрації, що виникають на долоті, складаються з квазіполігармонічної складової в області низьких та середніх частот та випадкового широкосмугового стаціонарного процесу в області високих частот. Інформація про процеси, що відбуваються при взаємодії долота з гірською породою, міститься у його високочастотній випадковій складовій.
4. Для ідентифікації долота у частотній області вимірюваного супутнього інтегрованого вібраційного сигналу як джерела високоамплітудної вібрації застосовується формування та аналіз карти порядку обертів обертових частин бурової установки в процесі буріння свердловин. Вимірювання характеристичних параметрів коливань у часовій області на визначеній частоті, яка відповідає піковому значенню порядку на сформованій карті, дозволяє зменшити вплив на результати оцінки характеристик взаємодії долота бурової установки з гірською породою збурюючих факторів, що виникають в процесі буріння свердловин, і є потенційними джерелами небажаних для аналізу складових вимірюваного вібраційного сигналу. Виміряний у часовій області на зазначеній частоті модульований сигнал несе інформацію про фізико-механічні характеристики гірської породи, що буриться, та стан бурового інструменту.

5. Енергоемність є універсальною інтегрованою характеристичною ознакою процесу буріння. Цей показник залежить від фізико-механічних властивостей і текстурно-структурних особливостей гірської породи, силових, кінематичних і режимних параметрів бурової установки та безпосередньо впливає на швидкість проходки та енергоефективність всього процесу.
6. Часова характеристика процесу взаємодії бурового долота з гірською породою є періодичною, але несинусоїдальною, і тому містить гармоніки. Відмінною її ознакою є наявність фазового зв'язку, який створює когерентність між частотними діапазонами. Наявність гармонік та фазового зв'язку є показниками нелінійності енергоемної контактної взаємодії у процесі буріння.
7. Кількісна оцінка величини повного гармонійного спотворення (THD) вібраційного сигналу бурового долота визначається величиною відношення середньоквадратичного значення загальної гармонійної складової до середньоквадратичного значення основного сигналу. Аналіз обчислених значень THD показав, що вони надають адекватну кількісну оцінку нелінійності процесу взаємодії бурового долота з гірською породою і можуть бути використані для ідентифікації робочих режимів бурової установки та розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди але потребують при цьому виконання спектрального аналізу.

РОЗДІЛ 4

ФОРМУВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

4.1. Загальна структура комп'ютерно- інтегрованої технології буріння свердловин у залізорудному кар'єрі

Комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі реалізується таким чином:

1. Буріння розвідувальних свердловин

- 1.1. Вимірювання і фіксація силових, кінематичних і енергетичних характеристик приводу бурової установки.
- 1.2. Вимірювання і фіксація характеристик вібрації бурового долота.
- 1.3. Відбір і мінералогічний аналіз керна матеріалу.
- 1.4. Встановлення відповідності результатів аналізу керна матеріалу, силових, кінематичних і енергетичних характеристик приводу бурової установки та характеристик вібрації бурового долота.
- 1.5. Формування і навчання адаптивної нейро-нечіткої структури (ANFIS) для визначення різновидів залізної руди.
- 1.6. Формування банку даних мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища та їх ознак.

2. Формування алгоритму і параметрів автоматизованого керування бурінням свердловин.

- 2.1. Визначення параметрів робочих режимів бурової установки із застосуванням оцінки ступеня нелінійності супутнього вібраційного сигналу бурового долота.
- 2.2. Параметризація моделі процесу буріння свердловин із застосуванням силових, кінематичних і енергетичних характеристик приводу бурової установки, характеристик вібрації

бурового долота та результатів розпізнавання різновидів залізної руди.

- 2.3. Синтез модельного прогнозуючого керування (MPC) процесом буріння.

3. Буріння технологічних (вибухових) свердловин.

- 3.1. Вимірювання і фіксація силових, кінематичних і енергетичних характеристик приводу бурової установки.
- 3.2. Вимірювання і фіксація характеристик вібрації бурового долота.
- 3.3. Визначення різновидів залізної руди із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої структури (ANFIS).
- 3.4. Динамічна корекція параметрів систем бурової установки відповідно до застосованого алгоритму MPC.

4. Співставлення виміряних характеристик бурової установки з ознаками мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища із сформованого банку даних.

- 4.1. Формування мінералогічного опису пробуреної свердловини по її глибині.
- 4.2. Формування петрографічної карти родовища.

5. Передача отриманої інформації до центрального інформаційного банку даних.

На початку виконують буріння розвідувальних свердловин із фіксацією тестових параметрів силової установки та відбір кернів з наступним встановленням відповідності між тестовими параметрами бурової установки та характеристиками гірської породи з кернів. Одночасно проводять вібраційний аналіз бурового долота з подальшим встановленням відповідності між тестовими параметрами силової установки, результатами вібраційного аналізу з характеристиками гірської породи з кернів. На основі одержаної інформації синтезують та навчають адаптивну нейро-нечітку структуру (ANFIS) для визначення основних різновидів гірських порід [182].

Визначення фізико-механічних характеристик гірських порід чи їх мінералогічних різновидів є одним з невід'ємних аспектів технології видобутку та переробки корисних копалин. Розроблено багато систем класифікації для характеристики властивостей гірських порід. Зазвичай такі системи відносять кількісні значення вимірюваних сигналів попередньо визначеним класифікованим геотехнічним параметрам гірського масиву. Це призводить до суб'єктивної невизначеності та неправильного використання таких класифікацій у практичних застосуваннях [183]. Як показано у підрозділі 2.1, теорія нечітких множин та методи навчання попередньо сформованих моделей із застосуванням нейромережевих структур є ефективним інструментом для подолання таких невизначеностей.

Для реалізації запропонованої технології розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізної руди послідовно виконуються наступні кроки: формування бази вимірювань параметрів бурової установки; підготовка даних для подальшого аналізу, що включає частотну фільтрацію, часову селекцію виміряних сигналів та їх нормалізацію; визначення характеристичних ознак; розподіл даних на навчальний і тестовий набори (навчальний набір використовується для навчання запропонованої моделі, а тестовий – для оцінювання якості класифікації); класифікація характеристичних ознак із застосуванням модельної адаптивної нейро-нечіткої структури ANFIS.

Розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізняку відбувається за процедурою, загальна структура якої показана на рис. 4.1.

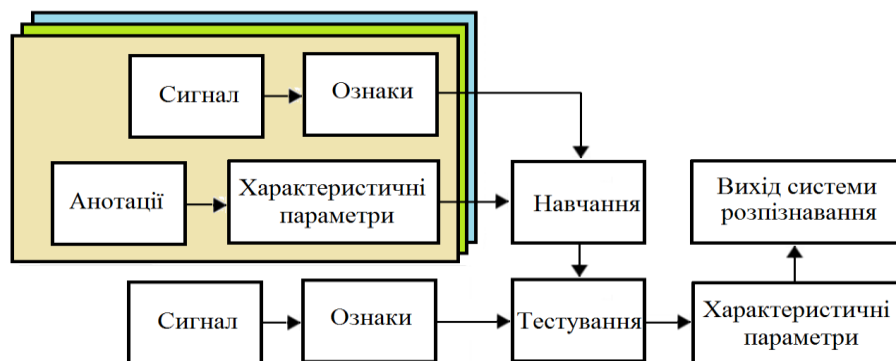


Рис. 4.1. Схема функціонування системи розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізняку

Процедура розпізнавання включає обробку вимірних сигналів і анотацій, а також навчання системи розпізнавання. Характеристичні ознаки витягуються з результатів вимірювань, а на етапі навчання знаходиться відповідність між ними та характеристиками зразків залізняку, зазначеними в анотаціях. Ланцюжок тестування включає обробку тестових сигналів, як і для навчання, тестування системи та, при необхідності, постобробку вихідної інформації для отримання подання, аналогічного анотаціям. Опис автоматизованої системи розпізнавання основних мінералого-технологічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища наведено у підрозділі 4.2.

4.2. Адаптивний нейро-нечіткий класифікатор характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди, оптимізований із застосуванням генетичного алгоритму

Із застосуванням одержаної нейро-нечіткої моделі виконують формування бази даних основних мінералогічних різновидів гірських порід досліджуваного родовища.

На наступному етапі виконують буріння технологічних свердловин та з урахуванням одержаної раніше інформації здійснюють визначення, встановлення та підтримування оптимальних параметрів бурової установки відповідно до визначених характеристик гірської породи. Виконують динамічну корекцію параметрів системи відповідно до сформованого алгоритму автоматизованого керування.

В умовах досить швидкозмінних показників процесу буріння свердловин доцільно використовувати стратегію дворівневого керування, яка полягає в одночасному дослідженні процесу буріння та управлінні цим процесом.

Запропонована структура дворівневого керування буровою установкою, відповідно до якій на нижньому рівні застосовуються пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) контролери для регулювання у замкнутах контурах основних змінних процесу, а на верхньому – модельно-прогнозуючий контролер (МРС) для динамічного корегування заданих значень регульованих змінних

контурів нижнього рівня. При цьому досліджено базову структуру керування на основі ПІД контролерів (1), систему з MPC контролером для безпосереднього керування процесом (2) та структуру дворівневого каскадного керування з MPC контролером (3)-[184].

На рис. 4.2 наведено схему моделювання перших двох варіантів (ПІД та MPC контролери у контурі безпосереднього керування процесом [185], а на рис. 4.3 – запропонована каскадна структура.

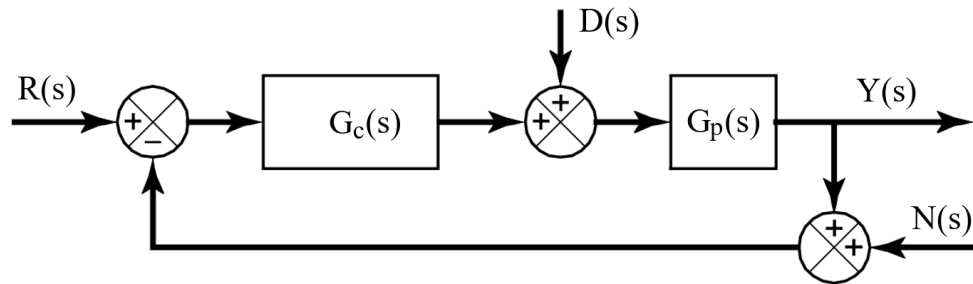


Рис. 4.2. Схема моделювання застосування ПІД та MPC контролерів у замкнутому контурі безпосереднього керування процесом буріння: $G_c(s)$ – передавальна функція контролерів; $G_p(s)$ - передавальна функція об'єкту керування; $R(s)$ – задане значення керованої величини; $D(s)$ – сигнал збурення; $N(s)$ – сигнал шуму у вимірюваному сигналі; $Y(s)$ – вихід системи

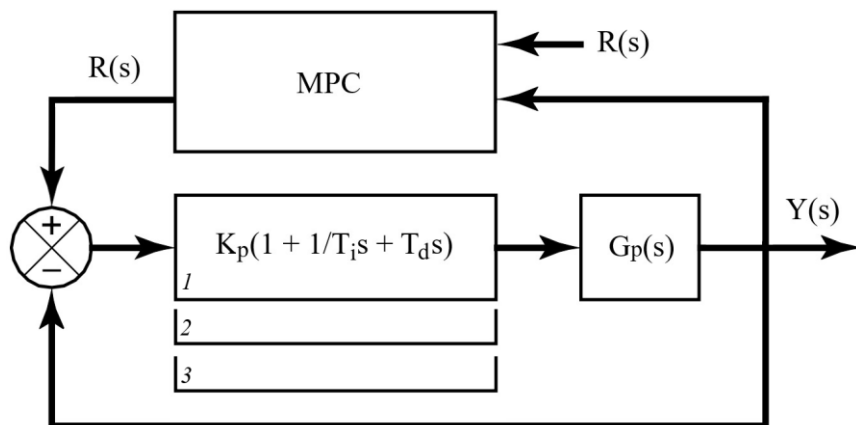


Рис. 4.3. Схема моделювання застосування MPC контролера у структурі каскадного керування процесом буріння: MPC – модельно-прогнозуючий контролер; $G_p(s)$ - передавальна функція об'єкту керування; $R(s)$ – задане значення керованої величини; $Y(s)$ – вихід системи; K_p , T_i , T_d – параметри ПІД контролера

Опис системи автоматизованого керування буровою установкою наведено у підрозділі 4.3.

Під час поточного процесу буріння технологічних свердловин виконують вібраційний аналіз і фіксацією відповідних експлуатаційних параметрів бурової установки. Із застосуванням тестових вимірювань здійснюють корекцію нейро-нечіткої моделі і поповнення бази даних основних різновидів гірських порід на основі отриманої інформації, у тому числі, при наявності кернів. На останньому етапі виконують передавання отриманої інформації до центрального банку даних для використання при бурінні інших свердловин.

4.2.1. Структура інтелектуальної системи розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізної руди

Для реалізації процедури розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди використовується адаптивна нейро-нечітка система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) пакету Matlab, оптимізована із застосуванням генетичного алгоритму (GA) з попередньою кластеризацією характеристичних ознак. ANFIS поєднує у своїй внутрішній структурі найбільш значущі властивості нечітких систем та нейронних мереж. У поставленій задачі вектор параметрів функцій приналежності термів вхідних змінних і вектор коефіцієнтів лінійних функцій у висновках правил формуються на підставі характеристик бурової установки, що вимірюються. ANFIS - редактор автоматично синтезує з експериментальних даних нейро-нечітку мережу, яку можна розглядати як один із різновидів нечіткого логічного висновку типу Такагі-Сугено [51].

На рис. 4.4 показана базова архітектура ANFIS, яка включає п'ять рівнів: рівень фазифікації (шар 1), рівень агрегації (шар 2), рівень нормалізації (шар 3), рівень дефазифікації (шар 4) і загальний вихідний рівень (шар 5) [186].

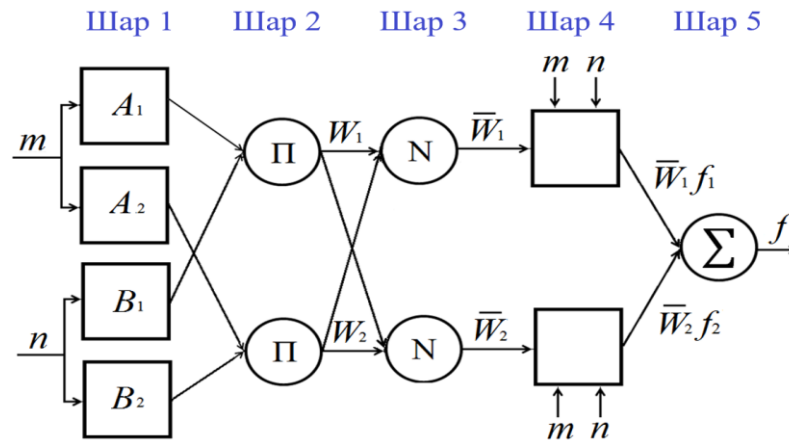


Рис. 4.4. Структура адаптивної мережевої системи нечіткого виведення

На вхід ANFIS надходять підготовлені дані, які є вимірними характеристиками ознак різновидів руди. *Перший рівень* - шар фазифікації зіставляє значенням ознак значення лексичних змінних та обчислює ступені належності до заданих нечітких множин. У цьому шарі m і n є вхідними даними вузлів A_1 і A_2 , вузлів B_1 і B_2 відповідно. Кожен вузол i в цьому шарі є квадратним вузлом (адаптивний вузол A_i і B_i , $i = 1, 2$). Гаусове відношення приналежності між вихідними та вхідними функціями цього шару можна виразити як

$$Q_{1,i} = \mu_{A_i}(m) = \exp \left[-\frac{(m - c_{A_i})^2}{a_{A_i}^2} \right], \quad i = 1, 2, \quad (4.1)$$

та

$$Q_{1,j} = \mu_{B_j}(n) = \exp \left[-\frac{(n - c_{B_j})^2}{a_{B_j}^2} \right], \quad j = 1, 2, \quad (4.2)$$

де; $Q_{1,i}$ та $Q_{1,j}$ - вихідні функції; $\mu_{A_i}(m)$ та $\mu_{B_j}(n)$ - гаусові функції приналежності; c_{A_i} , c_{B_j} , a_{A_i} , a_{B_j} представлені $\{a_{A_i}, a_{B_j}, c_{A_i}, c_{B_j}\}$ ($i = 1, 2; j = 1, 2$) - нелінійні параметри частини посилки, які є шириною гаусової функції приналежності i -ї імплікації вхідних змінних m і n відповідно.

Другий рівень складається з двох кругових вузлів, позначених Π , які множать вхідні сигнали. Цей шар здійснює агрегування окремих змінних та визначає передумови кожного з нечітких правил. Отриманий результат використовується

для подання сили спрацьовування правила. На цьому рівні оператор добутку, що виконує узагальнене **I**, може використовуватися як функція вузла. Виходи W_1 та W_2 – вагові функції наступного шару. Вихід цього шару є продуктом вхідного сигналу, що визначається наступним чином

$$Q_{2,i} = W_i = \mu_{A_i}(m)\mu_{B_i}(n), \quad i = 1,2, \quad (4.3)$$

де; $Q_{2,i}$ - вихід рівня 2.

Третій рівень - це рівень нормалізації. Шар обчислює нормовані рівні активації правил та дає можливість побудувати єдину систему оцінки важливості результатів нечітких правил та їхньої градації. Кожен вузол у цьому шарі є круговим вузлом, поміченим N. i -й вузол обчислює відношення сили спрацьовування i -го правила до суми сил спрацьовування всіх правил. Його функція полягає у нормалізації вагової функції шляхом застосування наступного процесу:

$$Q_{3,1} = \overline{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2}, \quad i = 1,2, \quad (4.4)$$

де; $Q_{3,1}$ - вихід рівня 3.

Четвертий рівень виконує дефазифікацію результатів та приведення їх до чіткості. Кожен вузол i в цьому шарі є квадратний вузол (адаптивний вузол, $i=1,2$). Відносини дефазифікації між входом і виходом цього шару можна виразити як результат i -го правила таким чином

$$Q_{4,1} = \overline{W}_i f_i = \overline{W}_i (p_i m + q_i n + r_i), \quad i=1,2, \quad (4.5)$$

де; $Q_{4,1}$ - вихід рівня 4; $p_i, q_i, r_i, \{p_i, q_i, r_i\}, (i = 1,2)$ - лінійні чи консеквентні параметри вузла.

П'ятий рівень призначений для виваженого підсумовування значень попереднього шару та формує єдиний результат – мітку класу. Єдиний вузол у цьому шарі - це круговий вузол з міткою Σ , який обчислює загальний вихідний сигнал шляхом підсумовування всіх вхідних сигналів. Вихідні дані цього шару - результат розв'язуваної задачі класифікації. Результати можна записати як

$$Q_{5,1} = \sum_i \overline{W}_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i}, \quad i = 1,2, \quad (4.6)$$

де; $Q_{5,1}$ – вихід рівня 5.

Формування функцій f_1 і f_2 (загалом - f_i), наведених на рис. 1, здійснюється з використанням типових правил «якщо-то» у нечіткій моделі Сугено першого порядку [187, 188]

$$\text{Rule1 : If } (m \text{ is } A_1) \text{ and } (n \text{ is } B_1), \text{ then } f_1 = p_1 m + q_1 n + r_1, \quad (4.7)$$

та

$$\text{Rule2 : If } (m \text{ is } A_2) \text{ and } (n \text{ is } B_2), \text{ then } f_2 = p_2 m + q_2 n + r_2, \quad (4.8)$$

У базовій архітектурі ANFIS нелінійні параметри $\{a_{A_i}, a_{B_j}, c_{A_i}, c_{B_j}\}$ вихідної частини та лінійні параметри $\{p_i, q_i, r_i\}$ консеквентної частини формуються за допомогою процедури навчання, що поєднує градієнтний спуск зворотного розповсюдження помилки з методом найменших квадратів. На рис. 4.5 представлено блок-схему базового алгоритму ANFIS, який реалізує вирішення поставленої задачі класифікації.

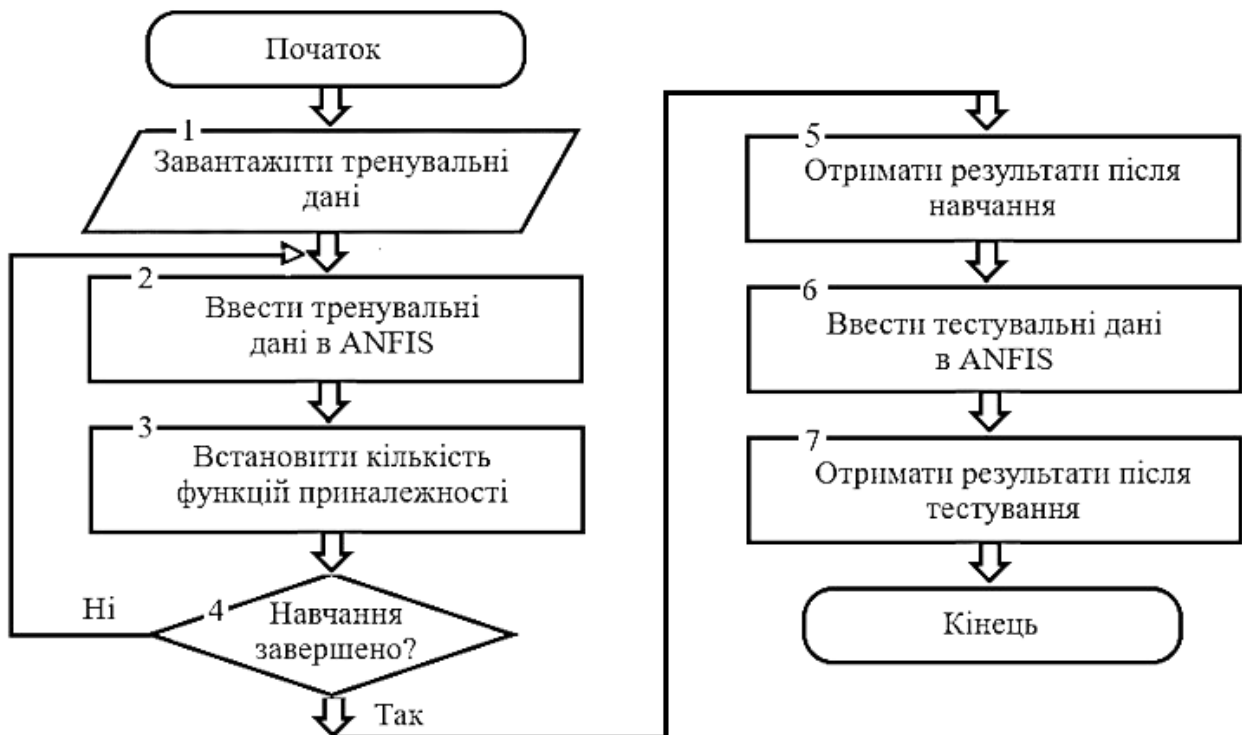


Рис. 4.5. Базова структура алгоритму класифікації на основі адаптивної нейро-нечіткої системи ANFIS

Тренувальні дані використовуються для формування в процесі навчання нелінійних параметрів $\{a_{A_i}, a_{B_j}, c_{A_i}, c_{B_j}\}$ вихідної частини та лінійних параметрів $\{p_i, q_i, r_i\}$ консеквентної частини. Кількість функцій приналежності встановлюється для кожного вхідного параметра доти, доки якість прогнозування стане задовільною. Після отримання результатів навчання, у навчену модель ANFIS вводяться дані тестування для отримання оцінки результатів всього процесу [186].

Навчання ANFIS – це процес визначення оптимальних значень її вхідних та вихідних параметрів. Для навчання ANFIS широко використовують алгоритми на основі похідних, такі як зворотне поширення помилки (BP), метод найменших квадратів (LS), градієнтний спуск (GD), Левенберга-Марквардта і фільтр Калмана [189]. Однак для алгоритмів, заснованих на похідних, обчислення градієнта на кожному етапі відносно складне, і необхідно використовувати ланцюгове правило, яке також може спричинити проблему локального мінімуму. Крім того, у градієнтному методі збіжність параметрів відбувається досить повільно [190]. Також продуктивність рішення багато в чому залежить від початкового значення параметрів. З цих причин навчання ANFIS за допомогою алгоритмів на основі похідних є однією із основних проблем. У цьому контексті доцільно використовувати методи оптимізації із застосуванням штучного інтелекту, такі як генетичний алгоритм (GA), оптимізація рою частинок (PSO), диференціальна еволюція (DE) та інші, які зазвичай відносять до метаевристичних алгоритмів [191].

GA має здатність давати оптимальні результати в просторах пошуку рішення задачі протягом розумного періоду часу в результаті використання можливості пробувати значення, які можуть бути кращими в порівнянні з пошуком по всьому просторі.

У GA рішення-кандидати, що становлять популяцію, відповідають хромосомам. Ці хромосоми перетворюються на кандидатів на рішення, які дають найкращі результати у різних еволюційних процесах. Цей процес триває

доти, доки буде досягнуто прийнятне значення придатності, заданий час обробки чи максимальну кількість поколінь.

Хромосоми (кандидати на рішення) - це рішення, що зберігають змінні у вигляді дискретних або безперервних значень рішення, що бере участь у ГА. Функція пристосованості це цільова функція, що вимірює якість хромосом. Блок-схема алгоритму ГА наведена на рис. 4.6.

Генетичний алгоритм ГА складається з наступної послідовності кроків [192,193]:

Крок 1. Ініціалізація - формування вихідної популяції хромосом на основі випадкової генерації заданої кількості хромосом (осіб), що представляють двійкові послідовності фіксованої довжини.

Крок 2. Оцінювання пристосованості хромосом – розрахунок функції пристосованості кожної хромосоми цієї популяції. Чим більше значення цієї функції, тим вища «якість» хромосоми.

Крок 3. Перевірка умови зупинення генетичного алгоритму. Існує кілька умов зупинки ГА: 1) в оптимізаційних задачах, якщо відомо максимальне (або мінімальне) значення функції пристосованості, то зупинення алгоритму здійснюється після очікуваного оптимального значення; 2) коли виконання ГА не призводить до покращення вже досягнутого значення; 3) алгоритм може бути зупинений або після закінчення певного часу виконання або після виконання заданої кількості ітерацій. Якщо умову зупинки виконано, алгоритм переходить до завершального кроку 7, в якому визначається «найкраща» хромосома. Якщо ж умови зупинки не дотримуються, здійснюється перехід до наступного кроку і виконується селекція.

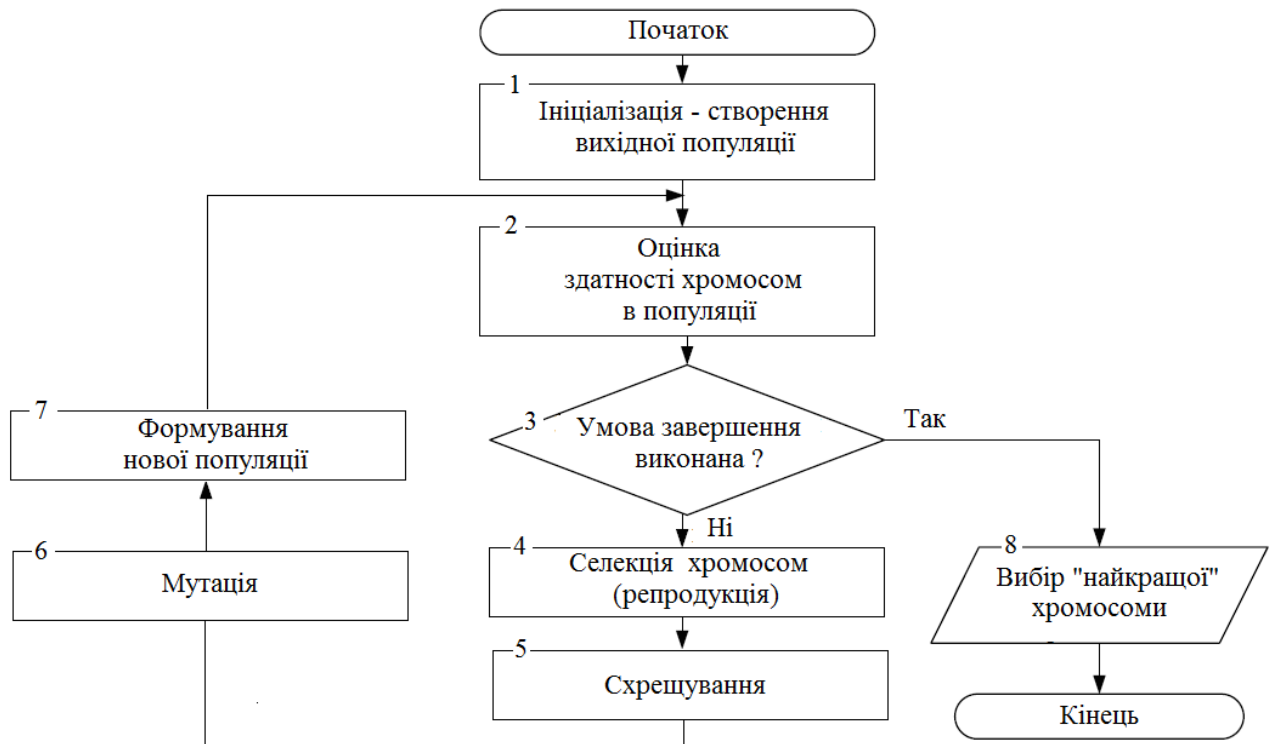


Рис. 4.6. Блок-схема генетичного алгоритму GA

Крок 4. Селекція хромосом - відбір хромосом, які братимуть участь у створенні нащадків для наступної популяції. В результаті процесу селекції створюється батьківська популяція, (батьківський пул) з чисельністю, що дорівнює чисельності поточної популяції. Існує кілька видів селекції, найбільш застосовуваним вважається метод рулетки.

Крок 5. Застосування генетичних операторів до хромосом батьківської популяції. Застосовуються два основні генетичні оператори: оператор схрещування (crossover) та оператор мутації (mutation). В результаті формується нова популяція нащадків: при схрещуванні пари батьківських хромосом створюється пара нащадків. Оператор мутації з ймовірністю, тобто випадковим чином, змінює значення деякого гена в деякій хромосомі на протилежне і формує нову, раніше не існуючу хромосому в популяції. Таким чином, з одного боку, мутації вводять у популяцію деяку різноманітність і розширюють область пошуку, а з іншого боку, вони попереджають втрати, які могли б статися внаслідок виключення якогось значущого гена внаслідок схрещування.

Крок 6. Формування нової популяції. Хромосоми, утворені внаслідок застосування генетичних операторів до хромосом батьківської популяції, формують нову популяцію. Далі алгоритм повертається на крок 2.

Крок 7. Вибір «найкращої» хромосоми. Якщо умова зупинки алгоритму виконано, слід вивести результат роботи, тобто представити розв'язане завдання. Найкращим рішенням вважається хромосома з найбільшим значенням функції пристосованості.

При вирішенні поставленої задачі розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізної руди використовується модифікований підхід до навчання моделі ANFIS за допомогою алгоритму GA [194]. Генетичний алгоритм використовується в цьому контексті для оптимізації параметрів ANFIS і усуває, таким чином, вищезгадані недоліки алгоритмів на основі похідних. Посилання та наступні параметри ANFIS, початкові значення яких генеруються методом кластеризації, є вихідною популяцією хромосом в генетичному алгоритмі. GA намагається знайти найкращу передумову та наступні параметри хромосоми з найбільш відповідним значенням пристосованості з урахуванням процесу навчання ANFIS. Блок-схема застосованого методу зображено на рис. 4.7. Функція середньоквадратичної помилки (RMSE) використовується для розрахунку значення придатності рішення.

Метою оптимізації передумови та наступних параметрів є мінімізація функції RMSE. Найбільш ефективним значенням RMSE є значення, набуте, коли фактичне та розрахункове значення найбільш близькі один до одного. GA намагається знайти найбільш ефективне значення RMSE доти, доки не буде виконано критерій зупинки. Кількість ітерацій використовується як критерій зупинки у цьому дослідженні.

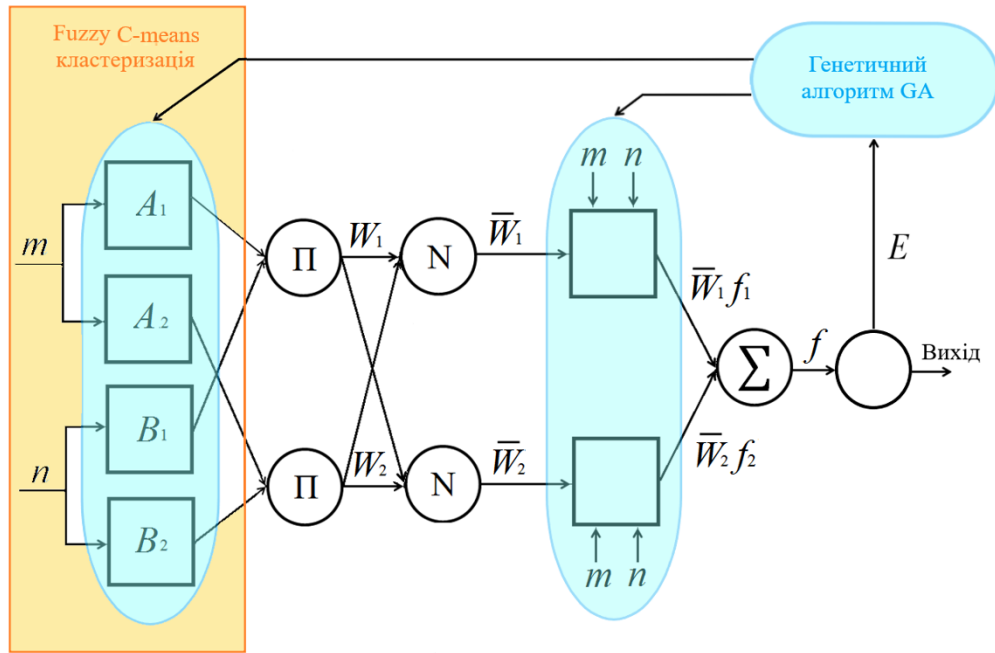


Рис. 4.7. Блок-схема застосованого методу оптимізації ANFIS

Для створення вихідної популяції хромосом у генетичному алгоритмі використано метод нечіткої кластеризації Fuzzy C-means (FCM) [195,196]. За цим методом набір інформативних ознак X розбивається на c нечітких підмножин, а структура матриці нечіткого розподілу $U = [\mu_{ik}]$ має наступний вигляд [50, 51]

$$U = \begin{bmatrix} \mu_{1,1} & \mu_{1,2} & \dots & \mu_{1,c} \\ \mu_{2,1} & \mu_{2,2} & \dots & \mu_{2,c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{N,1} & \mu_{N,2} & \dots & \mu_{N,c} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Алгоритм кластеризації FCM ґрунтується на мінімізації цільової функції

$$J(\mathbf{X}; \mathbf{U}; \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m \|x_k - v_i\|_A^2, \quad (4.10)$$

де $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_c]$, $v_i \in \mathbf{R}^n$

(4.11) є вектором прототипів (центрів) кластерів, які необхідно визначити, та

$$D_{ikA}^2 = \|x_k - v_i\|_A^2 = (x_k - v_i)^T A (x_k - v_i) \quad (4.11)$$

це квадрат скалярного добутку норми відстані.

Мінімізація цільової функції (4.10) можлива тільки якщо

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c (D_{ikA}/D_{jkA})^{2/(m-1)}}, \quad 1 \leq i \leq c, 1 \leq k \leq N \quad (4.12)$$

та

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^N x_k \mu_{ik}^m}{\sum_{k=1}^N \mu_{ik}^m}, \quad 1 \leq i \leq c. \quad (4.13)$$

Рівняння (4.13) визначає v_i як середньозважене значення елементів даних, що належать до кластеру, де ваги - це ступінь належності [197].

При реалізації алгоритму FCM для вирішення задачі розпізнавання мінералогічних різновидів руди на початку процедури вказується кількість кластерів c , що відповідає кількості відповідних різновидів у досліджуваному родовищі.

Загальна структура адаптивного нейро-нечіткого класифікатора мінералогічних різновидів залізної руди, оптимізованого із застосуванням генетичного алгоритму, наведена на рис. 4.8.

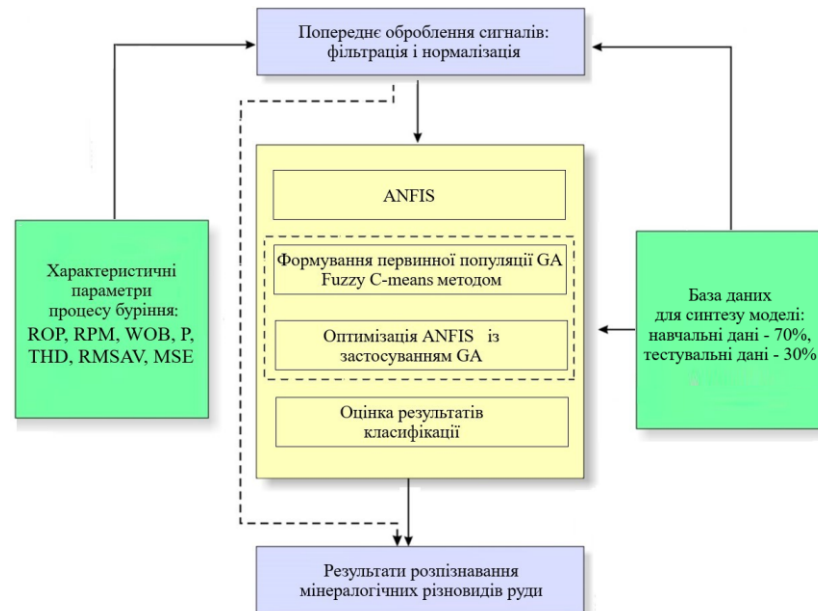


Рис. 4.8. Загальна структура адаптивного нейро-нечіткого класифікатора мінералогічних різновидів залізної руди.

4.2.2. Визначення мінералого-технологічних різновидів залізної руди із застосуванням вимірюваних параметрів бурової установки

Експериментальні дослідження щодо визначення мінералого-технологічних різновидів залізної руди та формування автоматизованого керування процесом буріння свердловин проводились з використанням експериментальної бази і виробничих можливостей підприємств «ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-

ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО» (м. Полтава) і «МЕТБЛАСТ» (м. Кривий Ріг). Зокрема, застосовувалась дослідно-промислова бурова установка на основі бурового станка СБШ-250МНА-32, який широко використовується для буріння вибухових та експлуатаційних свердловин при видобутку руди відкритим способом. Основними параметрами, що характеризують режим буріння, є: осьове зусилля подачі чи навантаження на долото WOB; частота обертання бурового ставу (долота) RPM; необхідна кількість стисненого повітря, що подається в забій для видалення продуктів руйнування Q, яка забезпечується відповідним тиском повітря P у системі очистки свердловини (Табл. 4.1)

Табл. 4.1. Основні технічні характеристики дослідно-промислової бурової установки

№	Параметри	Значення
1	Діаметр долота, мм	244,5; 269,9
2	Глибина свердловини, м, не більше	32
3	Довжина штанги/хід безперервної подачі, м	8/8
4	Осьове зусилля, кН, не більше	300
5	Частота обертання долота, с^{-1}	0,2-2,5
6	Крутний момент на обертачі, $\text{кН}\times\text{м}$	4,2
7	Продуктивність компресора, $\text{м}^3/\text{с}$	0,417
8	Тиск стисненого повітря, МПа	0,685
	Тип привода	Низьковольтний електропривод
9	Потужність електродвигунів, кВт:	
	- встановлена	400
	- обертача	68
	- компресора	200
	- пересування	44

Технічна база дослідно-промислової бурової установки дозволяє відтворювати різноманітні структури системи автоматизованого керування та проводити змістовний аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень.

У Табл. 4.2 наведено специфікації апаратного та програмного забезпечення, які використовувалися на цьому етапі дослідження.

Табл. 4.2. Специфікації апаратного та програмного забезпечення

№ п/п	Назва	Апаратне/програмне забезпечення
1	Процесор	Intel® Core i5-3337U
2	ОЗП	16 ГБ
3	Операційна система	64-бітна Windows 11
4	Мова програмування	MATLAB 64-bit
5	Програмні засоби	MATLAB (Signal Analyzer, ANFIS, Genetic Algorithm Tool)

Безпосередньо процедура класифікації сформованих наборів даних для визначення мінералого-технологічних різновидів залізної руди складалася з використання: ANFIS без будь-якої оптимізації; ANFIS, оптимізованої за допомогою генетичного алгоритму; ANFIS, оптимізованої за допомогою генетичного алгоритму з попередньою кластеризацією з використанням Fuzzy C-means методу.

На рис. 4.9 наведена структура нечіткої моделі TS77, що використана для розпізнавання різновидів залізної руди у складі ANFIS.

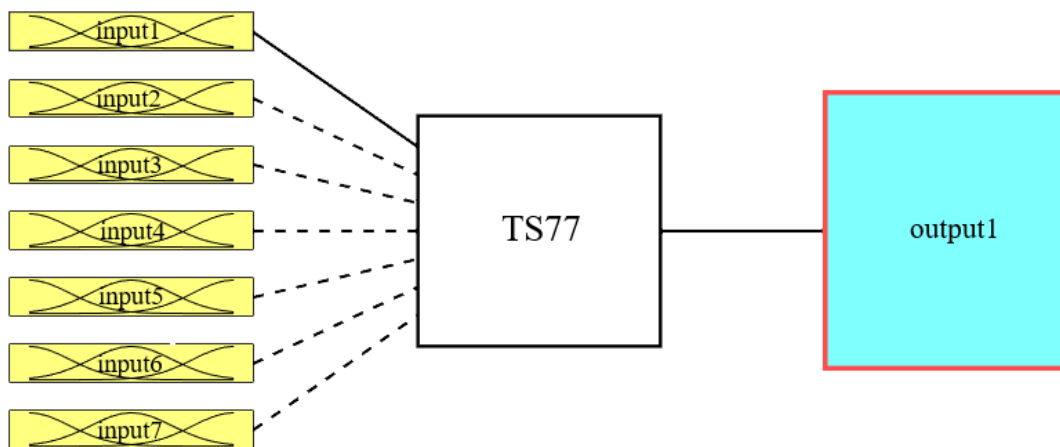


Рис. 4.9. Структура моделі TS77

У моделі TS77 використані функції належності *gaussmf*. Вхідні змінні розподілені наступним чином: Input1 – ROP (швидкість проходки); Input2 – RPM (швидкість обертання долота); Input3 – WOB (навантаження на долото); Input4 – P (тиск у системі очистки свердловин від шламу); Input5 – RMSAV (середньоквадратичне значення амплітуди сигналу вібрації долота); Input6 – THD (гармонійне спотворення сигналу вібрації долота); Input7 – MSE

(споживана питома механічна енергія). Навчальні дані складаються з 700 зразків з 7 ознаками, що відповідають 7 різновидам залізної руди досліджуваного родовища. 300 зразків застосовані для тестування моделі.

У наборі даних виділено наступні 7 мінералогічних різновидів залізної руди (рис. 4.10): 1 – магнетитові роговики (n1); 2 – силікат-карбонат-магнетитові роговики (n2); 3 – червоносмугасті магнетитові та гематит-магнетитові роговики (n3); 4 – напівокислені та окислені роговики (n4); 5 – силікатні сланці, безрудні роговики та кварці (n5); 6 – магнетит-силікат-карбонатні (бідні) роговики (n6); 7 – гематит-магнетитові роговики (n7) [50, 51] .

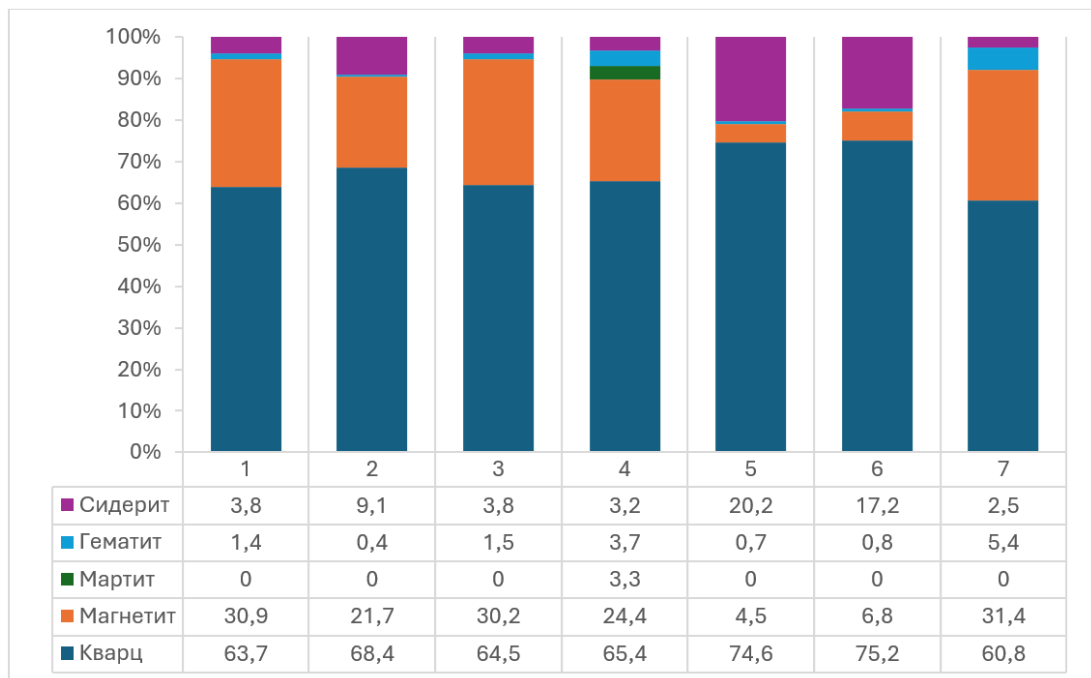


Рис. 4.10. Мінералогічний склад досліджуваних різновидів залізної руди

На рис. 4.11 наведена щільність досліджуваних різновидів залізної руди.

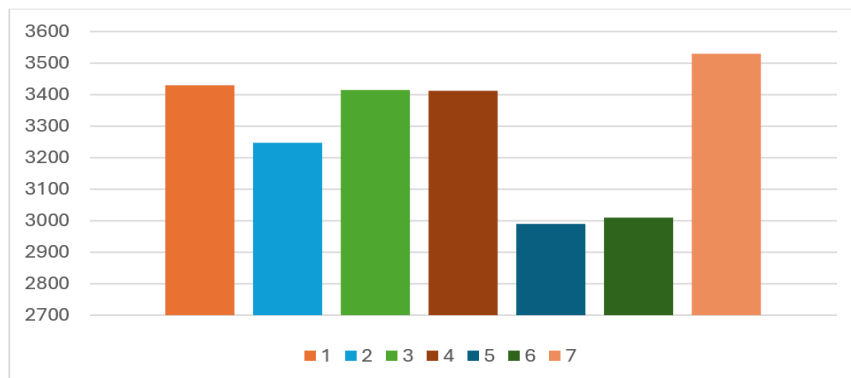


Рис. 4.11. Щільність досліджуваних різновидів залізної руди

На рис. 4.12 наведено запис використаних даних у відповідності до різновидів руди (n1-n7).

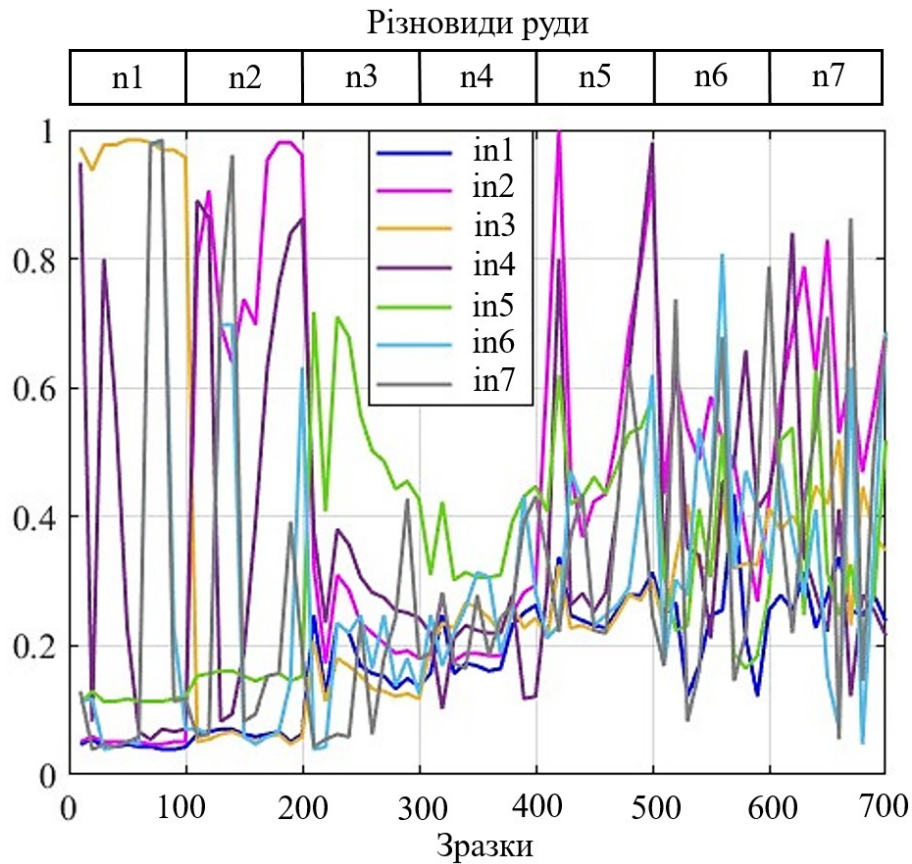


Рис. 4.12. Параметри бурової установки, що використані для навчання ANFIS (нормалізовані значення)

Кожне спостереження з набору даних складається з n вимірних змінних, згрупованих у n -вимірний вектор-рядок

$$x_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}]^T, x_k \in R^n, \quad (4.15)$$

Набір N спостережень становить

$$X = \{x_k | k = 1, 2, \dots, N\}, \quad (4.16)$$

і представлено у вигляді матриці $N \times n$:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & \dots & x_{Nn} \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

Попередня обробка результатів вимірювань є важливою передумовою якості подальшого аналізу. Зазначена процедура складається з двох частин: очищення даних і виділення ознак (рис. 4.1). Для виділення результатів вимірювання із шумів виконується частотна фільтрація та часова селекція результатів

вимірювань. Для очищення вимірних сигналів за умов збереження їх характеристикних ознак використаний метод фільтрації, що пригнічує високочастотні складові на рівні 15 дБ.

На рис. 4.13 наведено результати часової селекції та частотної фільтрації вимірних сигналів вібрації бурового долота. Виділення цих сигналів відбувалось із застосуванням методу, дослідженого у розділі 3.

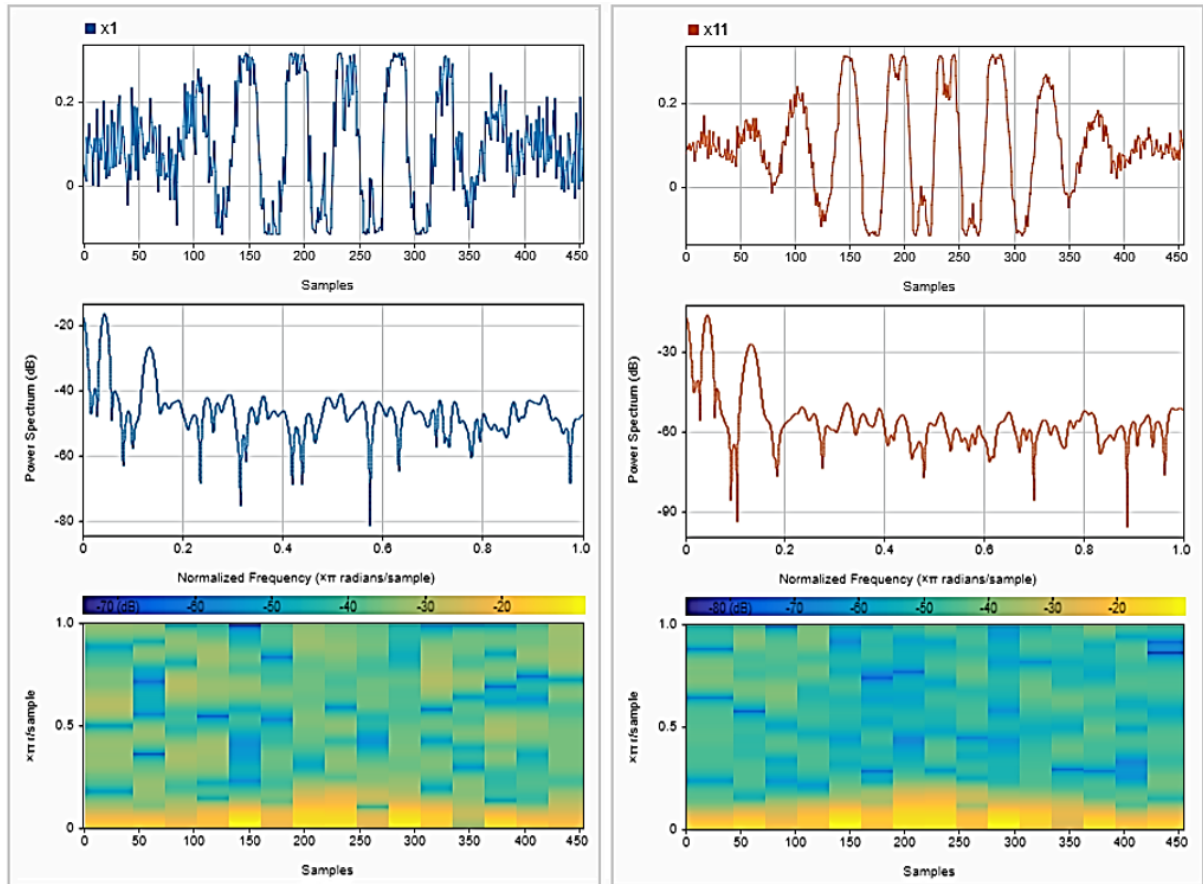


Рис. 4.13. Результати часової селекції та частотної фільтрації виміряного сигналу x_1 , що відповідає різновиду залізної руди n1: а) – вихідний сигнал; б) – сигнал після високочастотної фільтрації з пригніченням шумів на рівні 15 дБ.

На рис. 4.14 показано спектри та спектрограми сигналів x_2 – x_7 , що відповідають 6 різновидам залізної руди з позначками n2-n7 (для x_1 теж саме показано на рис. 4.13).

У табл. 4.3. наведено результати спектрального аналізу сигналів вібрації бурового долота x_1 – x_7 , що відповідають 7-и різновидам залізної руди n1-n7.

Табл. 4.3. Результати спектрального аналізу сигналів вібрації бурового долота $x_1 - x_7$, що відповідають 7-и різновидам залізної руди

Різнovid	Fundamental				Harmonics				THD
	std	min	max	median	std	min	max	median	
1	20,45	-87,84	-16,76	-27,8	3,839	-53,59	-48,37	-51,76	-6,82
2	16,65	-58,52	-10,31	-28,38	1,575	-48,5	-43,79	-45,94	-12,40
3	13,13	-51,35	-15,56	-23,4	4,062	-48,61	-36,51	-38,75	-6,93
4	9,77	-49,27	-18,14	-31,99	10,11	-64,86	-32,93	-38,20	-13,67
5	15,6	-54,49	-11,48	-31,44	3,721	-50,8	-40,07	-42,49	-21,07
6	15,28	-63,19	-18,39	-48,13	4,838	-63,19	-49,93	-54,88	-25,56
7	10,09	-51,04	-20,02	-34,33	4,901	-50,29	-39,95	-45,05	-4,32

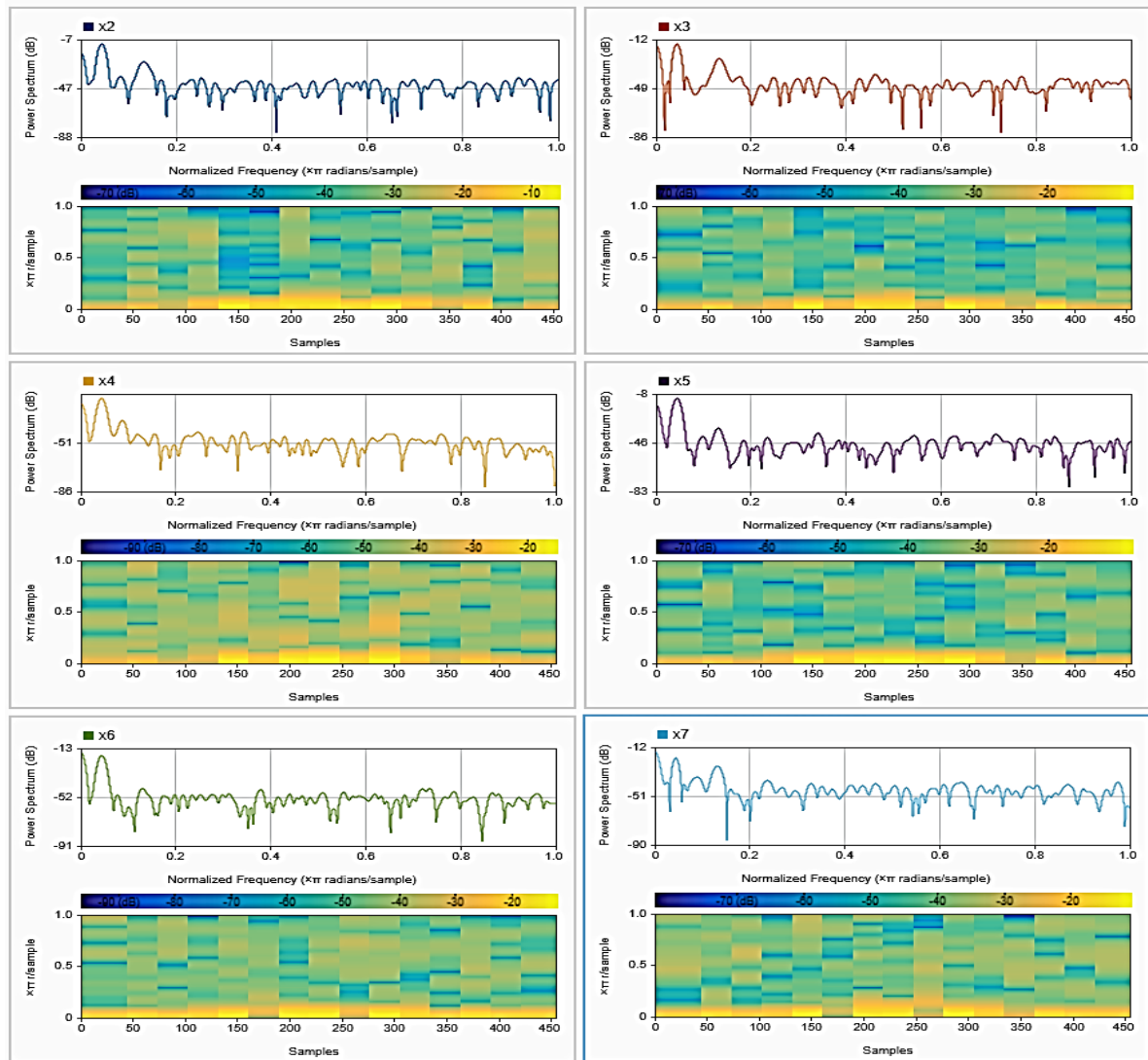


Рис. 4.14. Спектри та спектрограми сигналів $x_2 - x_7$, що відповідають різновидам п2-п7 залізної руди

При аналізі результатів виконаного спектрального аналізу сигналів, що відповідають різновидам залізної руди, прийнято до уваги інформативність та завадостійкість відповідних параметрів. З урахуванням цих їх властивостей для подальшого застосування використано середньоквадратичні значення амплітуди вібрації бурового долота RMSAV та гармонійне спотворення сигналу THD.

У результаті процедури навчання сформована ANFIS із наступними параметрами: кількість вузлів – 266; кількість лінійних параметрів – 128; кількість нелінійних параметрів – 224; загальна кількість параметрів – 352; кількість нечітких правил – 16. Мінімальне середнє відхилення результатів навчання становило 0.00045. Для оптимізації ANFIS із застосуванням генетичного алгоритму було використано 16 епох.

На рис. 4.15, у якості прикладу, показано вид функції приналежності $mf1$ для змінної $in1$, структура сформованої ANFIS наведена на рис. 4.16.

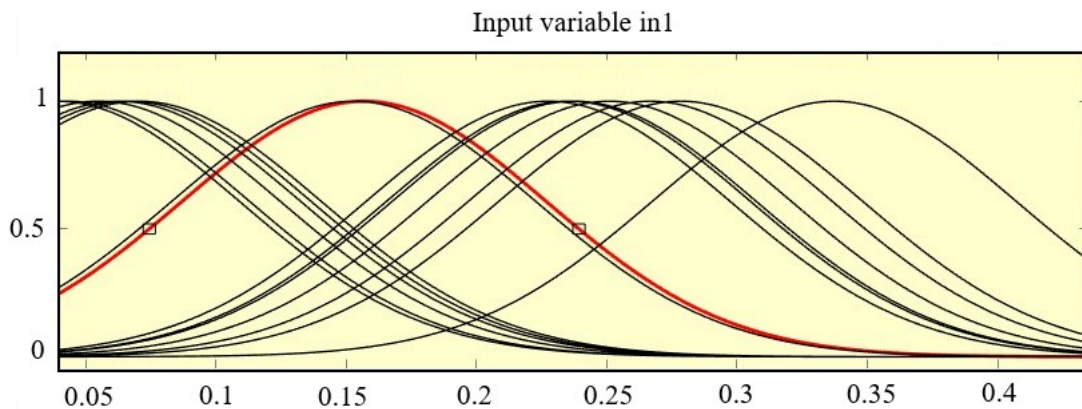


Рис. 4.15. Вид функції приналежності $mf1$ для змінної $in1$

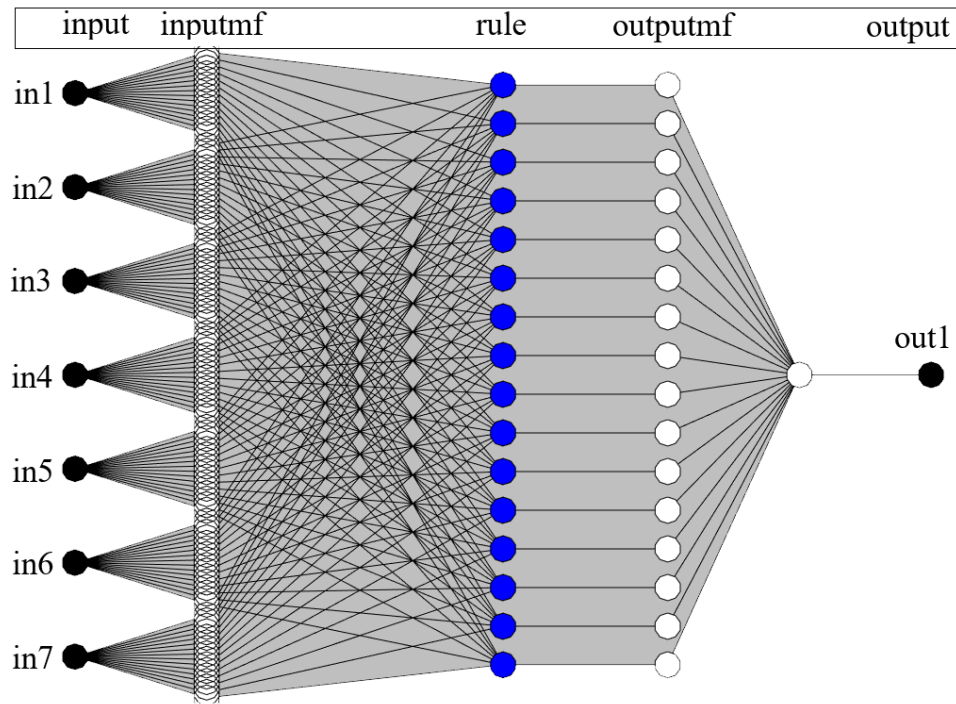


Рис. 4.16. Структура ANFIS

На рис. 4.17 наведено вигляд бази правил сформованої ANFIS.

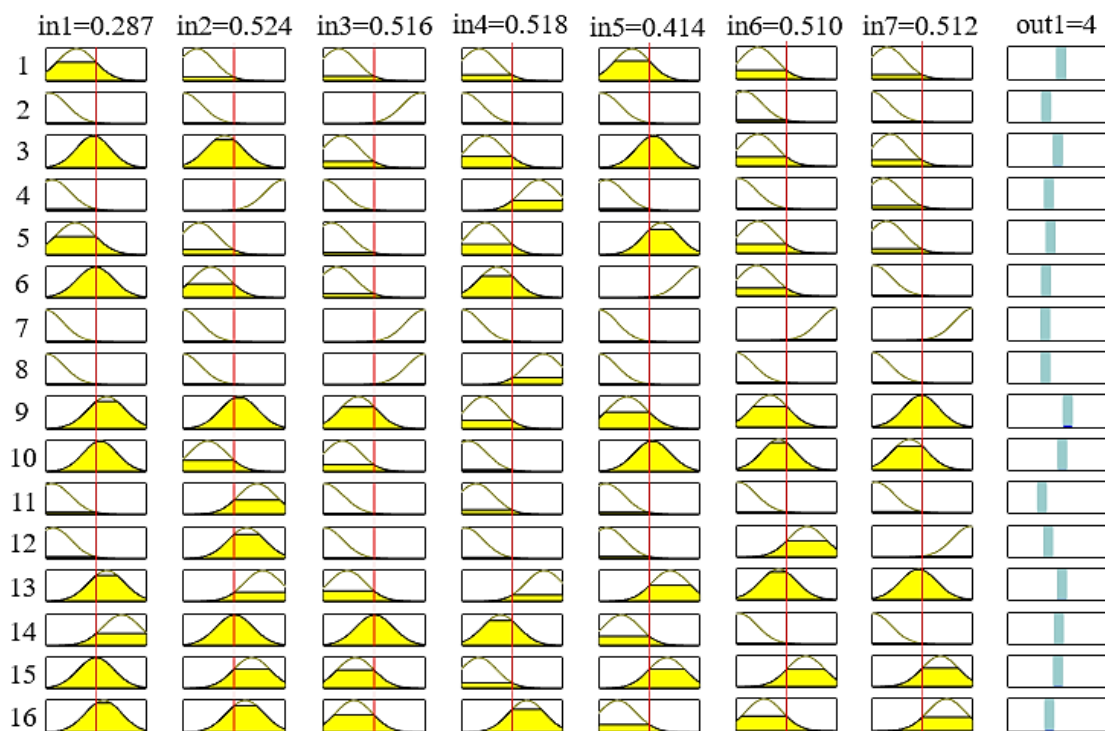


Рис. 4.17. Вигляд бази правил ANFIS

Оцінка точності розпізнавання визначалась відношенням кількості наборів даних, правильно класифікованих у процесі навчання, до кількості наборів даних, які брали участь у тестуванні. У Табл. 4.4 наведена інформація щодо

точності сформованої моделі, тобто відсоток правильно визначених результатів розпізнавання.

Табл. 4.4. Оцінка результатів розпізнавання різновидів залізної руди n1 – n7

Алгоритм	Різнovid залізної руди						
	1	2	3	4	5	6	7
ANFIS	86	87	85	85	84	86	83
ANFIS+GA	93	94	93	92	91	93	91

Відповідно до отриманих результатів зроблено висновок, що середня точність розпізнавання технолого-мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища із застосуванням алгоритму ANFIS становить 85,1%, а модифікованого ANFIS+GA, відповідно – 92,4%. Застосування попередньої кластеризації даних в алгоритмі ANFIS+GA за допомогою методу Fuzzy C-means покращує точність на 0,2-0,3% та зменшує час на отримання результатів на 7-8% (Додаток А).

Таким чином, у результаті виконаних досліджень удосконалено ітераційний метод нечіткої ідентифікації мінералого-технологічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин, заснований на аналізі характеристичних параметрів у векторному просторі ознак, в якості яких використані результати вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки, а саме швидкості проходки, навантаження на долото та швидкості його обертання, тиску у системі очистки свердловин від шламу, споживаної питомої механічної енергії, середньоквадратичного значення амплітуди та гармонійного спотворення сигналу вібрації долота, а для реалізації процедури розпізнавання застосовується адаптивна нейро-нечітка система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), оптимізована із застосуванням генетичного алгоритму (GA) з попередньою кластеризацією ознак методом C-means, що дозволяє шляхом мінімізації суми зважених відстаней між аналізованими та зразковими результатами вимірювань характеристичних параметрів віднести

предмет розпізнавання до основних технологічних типів руд експлуатованого родовища з похибкою 7-9%.

4.3. Система автоматизованого керування процесом буріння свердловин

Систему автоматизованого керування (САК) процесом буріння свердловин доцільно будувати у вигляді ієрархічної структури з використанням на нижньому рівні локальних підсистем для регулювання окремих змінних процесу. Такі децентралізовані САК на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів залишаються найпоширенішим рішенням для керування промисловими процесами з кількома входами та виходами (МІМО) [198,199]. Це пов'язано з їхньою гнучкістю, простотою та властивою стійкістю до відмов порівняно з централізованими структурами керування. Навіть коли застосовуються більш досконалі стратегії, наприклад, модельно-прогнозуючого керування (МРК), ПІД контролери зазвичай використовуються на нижчих рівнях керування відповідних систем [200].

4.3.1. Базова структура регулювання взаємопов'язаних змінних процесу буріння свердловин

У досліджуваних САК на її нижньому рівні використана структура, що включає три контури на основі ПІД контролерів, які забезпечують регулювання швидкості обертання долота RPM, навантаження на долото WOB та параметрів системи очистки свердловини (перш за все, її продуктивності). Результати моделювання процесу буріння, наведені у розділі 2, засвідчують тісний зв'язок між зазначеними параметрами [82].

У загальному випадку, маючи на увазі багатоконтурну структуру системи автоматичного керування (САК), стабільний багатозмінний процес G з n входами та n виходами у відкритому контурі та n -багатоконтурними діагональними контролерами G_c може бути представлений у вигляді [201]

$$G_c(s) = \text{diag}[G_{c1}, G_{c2}, \dots, G_{cn}]. \quad (4.18)$$

Зазначена багатоконтурна система зворотного зв'язку представлена блок-схемою на рис. 4.18.

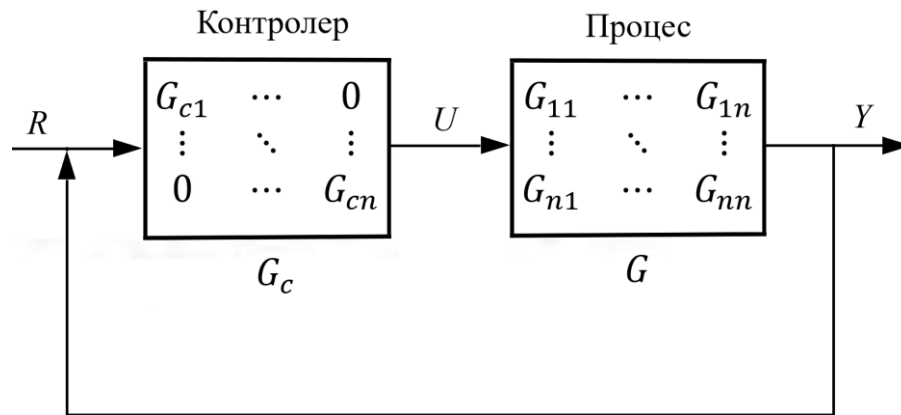


Рис. 4.18. Блок-схема багатоконтурної системи керування

Контролер i -го циклу виглядає наступним чином

$$U_i = G_{ci}(Y_i - R_i). \quad (4.19)$$

У рівнянні (4.19) входи, виходи та задані значення керованих змінних представлені як $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$, $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ та $R = (R_1, R_2, \dots, R_n)$ відповідно.

Щоб імітувати структуру керування з трьома контурами для регулювання основних змінних процесу буріння, досліджена модель Simulink® /MATLAB®, яка показана на рис. 4.19 [61, 202].

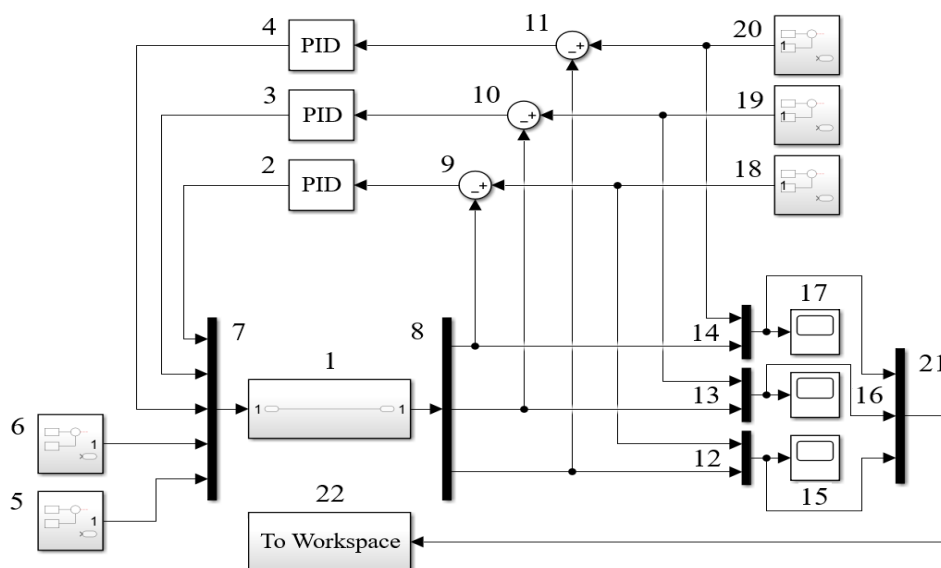


Рис. 4.19. Модель Simulink децентралізованого ПІД керування процесом буріння свердловин

У наведений на рис. 4.2 схемі використано наступні блоки: 1,5,6,18,19,20 - блоки Subsystem із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Ports & Subsystems; 2,3,4 - блоки PID Controller із бібліотеки Simulink / Continuous; 7,12,13,14,21 - блоки Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 8 - блок Demux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 9,10,11 - блоки Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 15, 16,17 – блоки Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks; 22 - блок To Workspace із бібліотеки Simulink / Sinks.

Ця модель має в якості вхідних даних три змінні, що регулюються ПІД контролерами (блоки 2,3,4) і дві основні змінні збурювання: фізико-механічні властивості породи, що буриться, та робочий режим буріння. У блоці 1 представлена модель процесу буріння, блоки 5,6,18,19,20 генерують збурювання та завади у сформованому сигналі [101].

В реальних виробничих умовах визначені фізико-механічні властивості гірської породи та робочі режими буріння використовуються для корегування заданих значень змінних, що регулюються ПІД контролерами. Для формування сигналу, що відповідає фізико-механічним властивостям гірської породи, застосовується процедура, наведена у підрозділі 4.2. Визначення робочих режимів бурової установки відбувається із застосуванням нечіткої кластеризації FCM (підрозділ 4.2.1) основних змінних процесу та методу, викладеного у підрозділі 3.4. Для реалізації зазначеної процедури кластеризації обрано наступні змінні: x_1 - швидкість проходки (ROP); x_2 - швидкість обертання долота (RPM); x_3 - вага на долоті (WOB); x_4 - амплітуда вібрації долота (A); x_5 - похідна від ROP (dROP); та параметр нелінійності вібрації x_6 - (THD). Задачею кластеризації є виділення трьох робочих режимів: R1- початкова фаза; R2 - фаза ефективного буріння; R3 - фаза неефективного буріння (рис. 2.3). Параметри x_1 - x_4 є вимірюваними змінними, x_5 та x_6 обчислюються за результатами вимірювань [101]. Проведений аналіз результатів кластеризації доводить, що застосований підхід та обраний набір параметрів дозволяють з довірчою ймовірністю 0,94 визначити фази процесу буріння (Додаток Б).

На рис. 4.20 наведено схему моделі одного з контурів ПІД керування у середовищі Simulink® /MATLAB® [203,204]. Модель симулює регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму при наявності збурювання, що впливає на крутний момент, за наявності завад у вимірюваному сигналі [61].

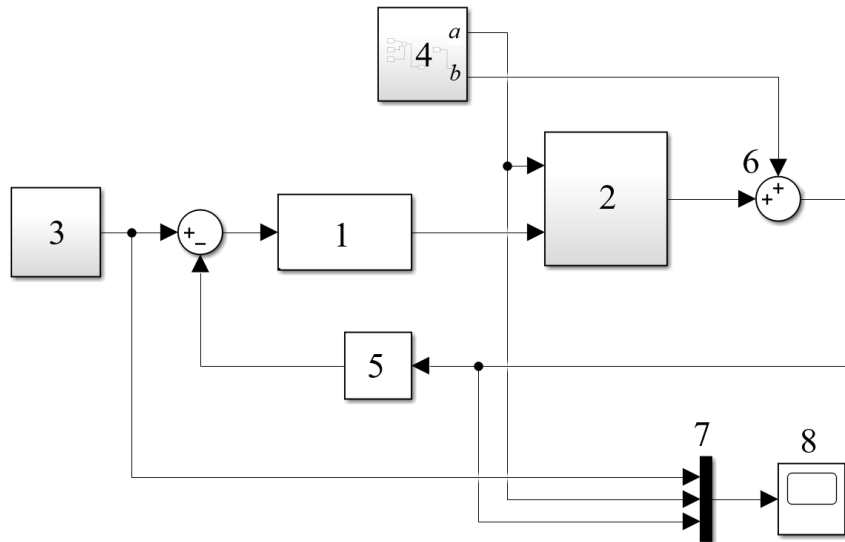


Рис. 4.20. Схема моделі замкненої системи ПІД керування

У наведений на рис. 4.20 схемі використано наступні блоки: 1 - блок Discrete PID Controller із бібліотеки Simulink / Discrete; 2,3,4 - блок Subsystem із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Ports & Subsystems; 5 - блок Zero-Order Hold із бібліотеки Simulink / Discrete; 6 - блок Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 7 - блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 8 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks.

Блок 1 (Subsystem) реалізує дискретний ПІД-контролер. Вихід блоку є зваженою сумою вхідного сигналу, інтеграла вхідного сигналу та похідної вхідного сигналу

$$W(z) = P + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} + D \frac{N}{1+N \cdot T_s \frac{1}{z-1}}, \quad (4.20)$$

де; P, I, D, N - коефіцієнти пропорційної, інтегральної, диференціальної складових та фільтрації відповідно.

Ваговими коефіцієнтами є пропорційні, інтегральні та похідні параметри посилення. Поліус першого порядку фільтрує похідну дію.

Блок 2 (Subsystem) містить модель двигуна постійного струму (рис. 4.21), блок 3 (Subsystem) генерує сигнал уставки (задана швидкість) у САК, а блок 4 – збурення (вихід a - вплив через прикладений крутний момент, вихід b – завади у вимірюваному сигналі).

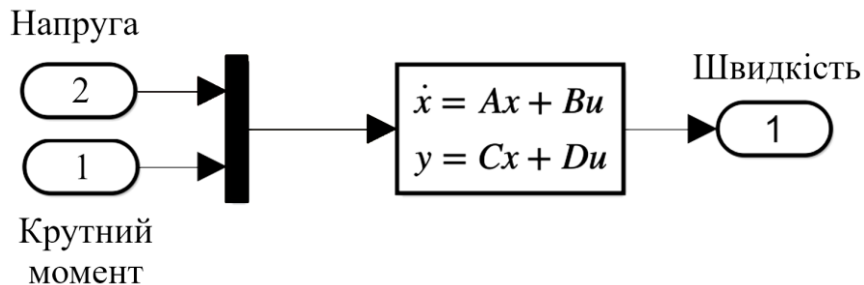


Рис. 4.21. Модель двигуна постійного струму у блоці Subsystem

Блок Zero-Order Hold зберігає свої вхідні дані протягом указанного періоду вибірки. У наведеному прикладі цей блок виконує функції перетворення аналогового сигналу у дискретну форму.

Для налаштування ПІД контролера використано інструментарій Identification Toolbox MATLAB. У наведеному прикладі після налаштування отримано такі значення: $P = 15.35$, $I = 39.74$, $D = -0.713$, $N = 4.54$.

На рис. 4.22 наведено графіки перехідних процесів у замкнутій системі регулювання [61].

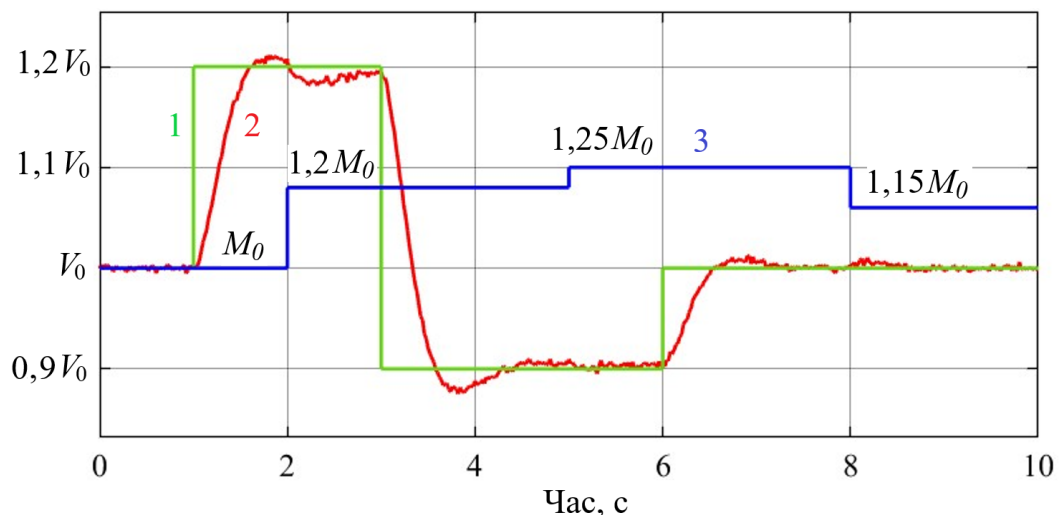


Рис. 4.22. Графіки перехідних процесів у замкнутій системі регулювання (V_0 – швидкість обертання долота RPM; M_0 – прикладений крутний момент)

Як видно з результатів моделювання ПІД - контролер непогано справляється із задачею стабілізації регульованої величини при наявності збурень і завад у

вимірюваному сигналі. Це дозволяє розглядати замкнену САК на основі ПІД контролера у якості структурного елемента на базовому рівні керування буровою установкою.

Разом з тим, слід відмітити, що результати моделювання чітко показують сильний зв'язок у цій системі між змінними, що регулюються. Це свідчить про те, що для цього прикладу параметри ПІД - контролерів не слід визначати незалежно. Для наведеної структури керування з трьома децентралізованими ПІД - контролерами слід застосовувати процедуру багатоконтурного налаштування із застосуванням відповідних методів [205].

Більшість методів налаштування ПІД-регуляторів у багатоконтурних САК [16,17], доступних на даний момент, схожі тим, що вони використовують правила налаштування одного контуру для отримання початкових значень щодо окремих контролерів, а потім розлаштовують окремі контури для збереження стабільності всієї системи. В умовах реального виробничого процесу такий підхід на завжди дозволяє досягнути бажаних показників продуктивності та надійності керування.

Для вирішення поставленої задачі використаний метод налаштування ПІД контролерів у багатоконтурних САК, який узагальнює методику налаштування із використанням внутрішньої моделі (ІМС) [206] на багатоконтурні структури [201].

Розширити структуру ІМС для системи SISO до багатоконтурної структури можливо застосуванням матриці передавальної функції, яка включає лише діагональні елементи $G(s)$ [206,207]

$$\tilde{G}(s) = \text{diag}[G_{11}, G_{22}, \dots, G_{nn}]. \quad (4.21)$$

Багатоконтурні контролери в класичній структурі зворотного зв'язку тоді будуть визначені як

$$G_c(s) = [1 - Q(s)\tilde{G}(s)]^{-1}Q(s). \quad (4.22)$$

де Q - діагональна матриця, що представляє контролер ІМС.

Для налаштування багатоканальних контролерів, застосовується критерій, що базується на частотній характеристиці замкнутого контуру, яка отримується

в результаті розрахунку вихідного сигналу системи у відповідь на синусоїдальний вхід [201].

У системах МІМО передавальна функція замкнутого контуру може бути представлена як [61]

$$H(s) = G(s)G_c(s)[I + G(s)G_c(s)]^{-1}. \quad (4.23)$$

Передавальна функція замкнутого контуру може бути виражена наступною матричною формою

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11} & \cdots & H_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

або

$$H = \{H_{ij}\}, \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n, \quad (4.25)$$

де; H_{ij} - реакція замкнутого i -го контуру на зміну заданого значення в j -му контурі.

Частотну характеристику замкнутого контуру можна знайти, встановивши $s = j\omega$ у рівнянні (4.23), і її можна представити через ω та λ наступним чином [201, 207]

$$H(j\omega, \lambda) = G(j\omega)G_c(j\omega, \lambda)[1 + G(j\omega)G_c(j\omega, \lambda)]^{-1}. \quad (4.26)$$

Величина частотної характеристики визначається як амплітудний коефіцієнт замкнутого контуру AR , а його максимальна величина в діапазоні частот визначається як Mr .

Крива AR діагональних елементів повинна дорівнювати одиниці на якомога вищій частоті, щоб забезпечити відсутність зміщення та швидке наближення до нового стаціонарного стану, тоді як крива недіагональних елементів повинна бути якомога меншою [208].

Параметр Mr тісно пов'язаний зі стабільністю та продуктивністю замкнутої системи, і відповідну реакцію в часовій області можна вивести з його значення. Отже задачею процедури налаштування є визначення набору λ , що робить реакцію замкнутої системи достатньо швидкою та стабільною. Зазначеної мети

в часовій області можна досягти, розв'язавши наступну задачу оптимізації в частотній області [201]

$$\min[\sum_i \sum_{j \neq i} Mp_{ij} + \sum_i Mp_{ij}], \quad (4.27)$$

$$Mp_{ij} \geq Mp_{low},$$

де; $Mp_{ij} = \max_w H_{ij}$; Mp_{ij} - функція λ ; Mp_{low} - нижня межа діагоналі Mp ; w - ваговий коефіцієнт для діагоналі Mp .

Оскільки задача оптимізації складається лише з одного вектора змінних, можна легко знайти оптимальне значення λ для мінімізації взаємодії та перерегулювання в циклах, поки всі Mp_{ij} відповідають обмеженням.

Результати налаштування ПД контролерів триконтурної САК (рис. 4.19) процесом буріння свердловин із застосуванням наведеного алгоритму показано на рис. 4.23, 4.24. Відповідні розрахунки виконувались у середовищі MATLAB®. На рис. 4.23 наведена реакція ПД контролерів САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням поширеного традиційного методу налаштування за найбільшим логарифмічним модулем (BLT) [61, 199].

Відповідно до методу BLT налаштування Цильгера-Ніколса (Ziegler-Nichols) використовується для початкових налаштувань окремих контролерів, потім контролери розлаштовуються таким чином, щоб задовольнити критерій логарифмічного модуля.

На рис. 4.24 наведена реакція ПД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням дослідженого алгоритму [61, 201].

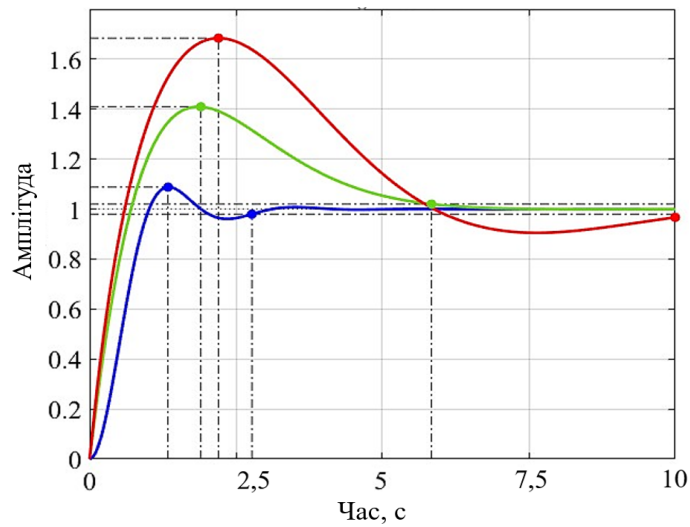


Рис. 4.23. Реакція ПІД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням традиційного методу налаштування BLT

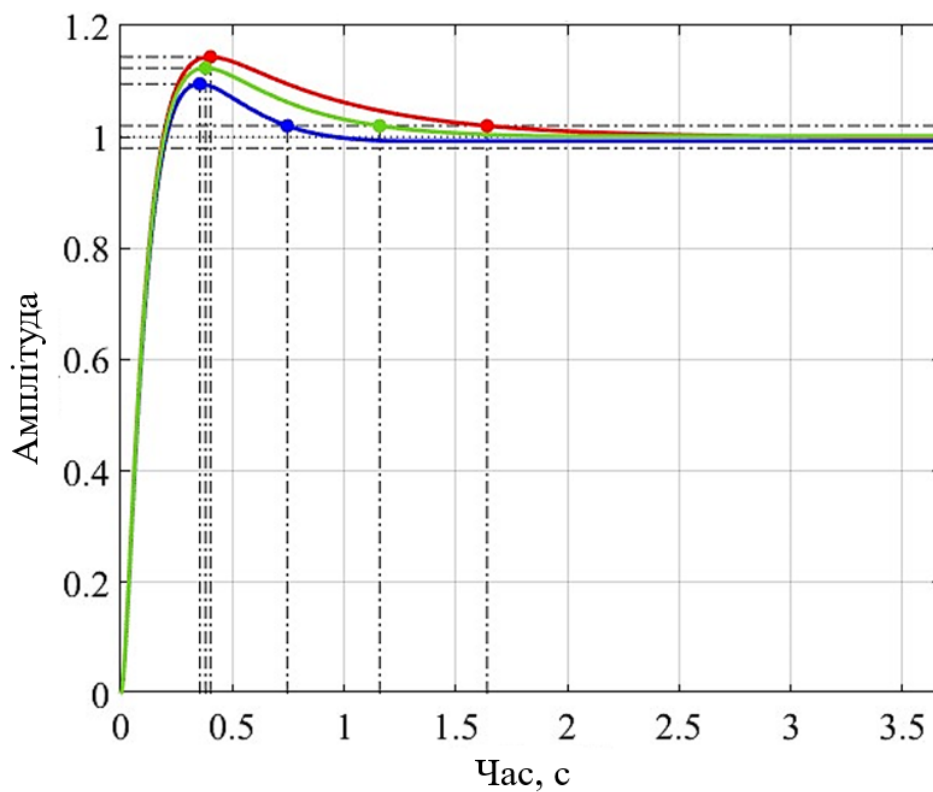


Рис. 4.24. Реакція ПІД контролерів триконтурної САК на стрибкоподібне збурення із застосуванням дослідженого частотного методу налаштування

Нижня межа діагоналі Mp обрана рівною 1,3. Мінімізація цільової функції, що відповідає рівнянню (4.27), робить реакцію системи стабільною, а обрані обмеження сприяють достатній її швидкості.

Таким чином, результати моделювання показують, що досліджуванний метод перевершує традиційні методи, такі як, наприклад, метод налаштування BLT [201] як за параметром часу перехідних процесів у замкнутих контурах, так і за величиною перерегулювання.

4.3.2. Система автоматизованого керування з МРС контролером для безпосереднього керування процесом буріння свердловин

Модельно-прогнозуюче керування (МПК) - це підхід до керування зі зворотним зв'язком, який використовує оптимізацію на основі моделі для обчислення вхідних даних керування. У МПК модель системи разом із поточним станом (виміряним або оціненим) використовується для прогнозування майбутньої поведінки (станів) системи для вхідної послідовності керування протягом короткого періоду. Прогнозована поведінка характеризується функцією вартості, яка є функцією прогнозованого стану та послідовності керування. Потім алгоритм оптимізації використовується для пошуку керуючої послідовності, яка оптимізує прогнозовану поведінку або функцію витрат. Перший елемент керуючої послідовності застосовується до системи, яка дає наступний стан, і алгоритм повторюється в наступний момент часу, що призводить до схеми горизонту, що відступає [47, 64, 184].

У загальному випадку прогнозуючий алгоритм керування вирішує завдання оптимального керування у режимі реального часу з урахуванням динаміки системи та змінних обмежень.

Модель системи може бути представлена у такому вигляді [209, 210]

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gd_p(k), \quad (4.28)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + Hd_m(k), \quad (4.29)$$

де; $x(k) \in \mathbb{R}^{n_x}$ - стан; $u(k) \in \mathbb{R}^{n_u}$ - керовані входи; $y(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ - вимірювані виходи.

Вектори $d_p(k)$ та $d_m(k)$ - невимірювані збурення динаміки стану (шум процесу) та виходів (шум вимірювання) відповідно. Контролер прогнозує майбутню поведінку фактичної системи протягом часового інтервалу, що

визначається нижнім і верхнім горизонтом прогнозування, які позначаються N_w та N_p відповідно.

Оптимальний вхід для установки обчислюється шляхом мінімізації функції вартості, визначеної вздовж горизонту прогнозування, яка задається як сума квадратичних майбутніх помилок між опорною траєкторією і прогнозованим виходом установки та прогнозованим корегуванням керування [29]

$$J(k) = \sum_{i=N_w}^{N_p} \|\hat{y}(k + i/k) - r(k + i)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{N_u-1} \|\Delta u(k + i/k)\|_{R(i)}^2. \quad (4.30)$$

З урахуванням обмежень, заданих для входів, виходів та прирощень входів

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max}, \quad (4.31)$$

$$y_{min} \leq y(k) \leq y_{max}, \quad (4.32)$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{max}, \quad (4.33)$$

де; $Q(i)$ – позитивно визначена матриця вагових коефіцієнтів помилок; $R(i)$ – позитивно напіввизначена матриця вагових коефіцієнтів керування; $\hat{y}(k + i/k)$ – вектор прогнозованих вихідних сигналів; $r(k + i)$ – вектор майбутньої уставки; $\Delta u(k + i/k)$ – вектор майбутніх керуючих впливів.

Наявність перешкод і невідповідність установки/моделі враховуються шляхом реалізації вимірювання зворотного зв'язку та стратегії горизонту, що відступає. Це означає, що до установки застосовується тільки перший елемент обчисленої послідовності управління. На наступному інтервалі вибірки як горизонт керування, так і горизонт прогнозування переміщуються на один крок уперед, і весь цикл оцінки стану, прогнозування вихідних даних та оптимізації повторюється з використанням нового вимірювання.

Для моделювання структури, представлені виразами (4.28), (4.29) використані можливості платформи Simulink® /MATLAB® та Model Predictive Control Toolbox MATLAB® [209].

Модель системи керування буровою установкою на основі MPC контролера наведена на рис. 4.25. У моделі вхідні дані розташовані у векторі $u(t)$ і є маніпульованими змінними (mv):

u_1 – навантаження (вага) на долото (WOB);

u_2 – тиск у системі очищення свердловин (P);

u_3 - швидкість обертання долота (RPM).

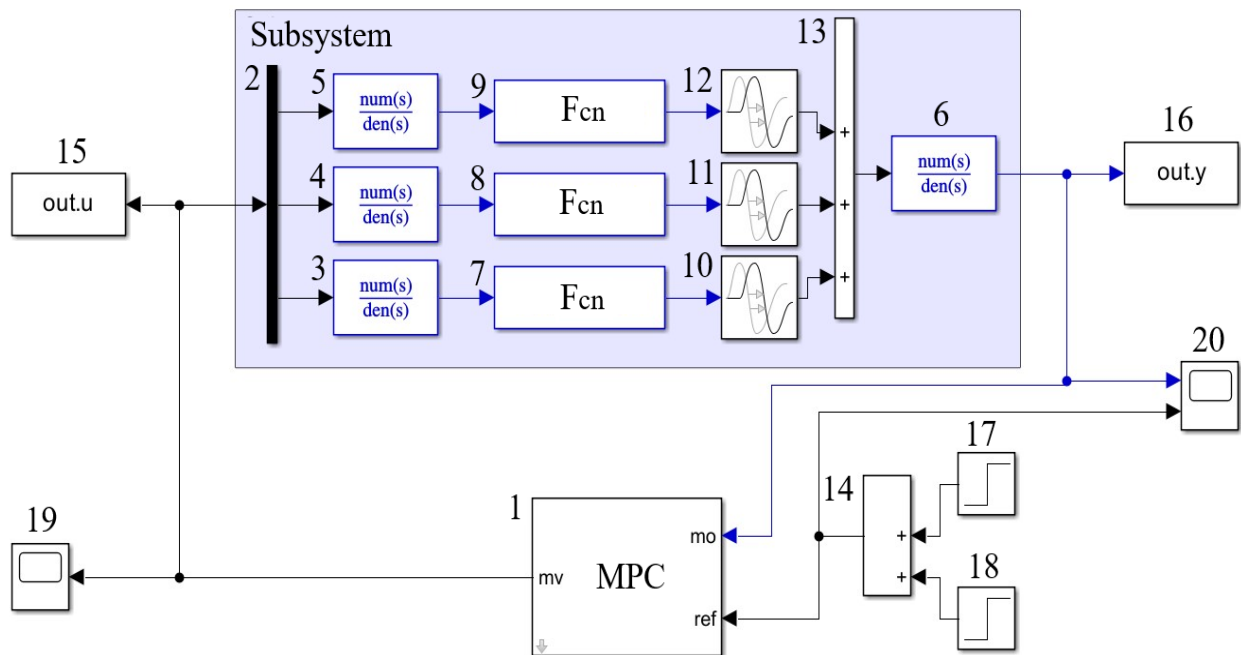


Рис. 4.25. Модель системи керування буровою установкою на основі МРК контролера

Зазначені змінні, а також швидкість проходки (ROP) формують стан моделі і розташовані у векторі $x(t)$.

Метою керування є підтримка швидкості проходки (ROP) на номінальному заданому значенні, що відповідає сформованій оцінці фізико-механічних властивостей гірської породи (PMP), що буриться. Зазначена оцінка визначається відповідно до процедури, що наведена підрозділі 4.2.

У наведених на рис. 4.25 моделі використані наступні блоки: 1- блок MPC Controller із бібліотеки Simulink Model Predictive Control Toolbox™; блок моделі об'єкту керування (Subsystem), що включає 2 - блок Demux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 3,4,5,6 – блоки Transfer Fcn із бібліотеки Simulink / Continuous; 7,8,9 – блоки Fcns із бібліотеки Simulink / User-Defined Functions; 10,11,12 – блоки Transport Delay із бібліотеки Simulink / Continuous; 13,14 - блоки Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations; 15,16 - блоки To Workspace виводу інформації у робочу область МАТЛАБ (out.y та out.u) із бібліотеки

Simulink / Sinks; 17,18 - блоки Step із бібліотеки Simulink / Sources; 19,20 – блоки Scope із бібліотеки Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks.

Блок Transfer Fcn моделює лінійну структуру за допомогою передавальної функції змінної s в області Лапласа. Блок Fcn застосовує заданий математичний вираз до своїх вхідних даних і використовується для моделювання нелінійності у певному контурі керування. Блок Transport Delay затримує вхідний сигнал на заданий час.

Блок контролера MPC отримує поточний вимірний вихідний сигнал (mo) та опорний сигнал (ref). Блок обчислює оптимальну керувану змінну (mv), розв'язуючи задачу квадратичного програмування за допомогою стандартного розв'язувача KWIK [209].

Коли контролер працює, він використовує свій поточний стан x_c , як основу для прогнозів. За визначенням, вектор стану такий [209, 211]

$$x_c^T = [x_p^T \ x_{id}^T \ x_{od}^T \ x_n^T], \quad (4.34)$$

де; x_c – стан контролера, що містить $n_{xp} + n_{xid} + n_{xod} + n_{xn}$ змінних стану; x_p – вектор стану моделі об'єкту довжиною n_{xp} ; x_{id} – вектор стану моделі вхідних збурень довжиною n_{xid} ; x_{od} – вектор стану моделі вихідного збурення довжиною n_{xod} ; x_n – вектор стану моделі шуму вимірювання довжиною n_{xn} .

Комбінація наведених моделей дає спостерігач стану [211]

$$x_c(k+1) = Ax_c(k) + Bu_o(k), \quad (4.35)$$

$$y(k) = Cx_c(k) + Du_o(k). \quad (4.36)$$

Контролер MPC використовує спостерігач для оцінки значень невимірних станів, як основи для прогнозів, та щоб передбачити, як запропоновані контролером коригування регульованої змінної (MV) вплинуть на майбутні значення вихідної змінної.

Вхідними сигналами спостерігача є безрозмірні вхідні дані маніпульованих та вимірних змінних, а також вхідні дані білого шуму для моделей збурень та шуму

$$u_o^T(k) = [u^T(k) \ v^T(k) \ w_{id}^T(k) \ w_{od}^T(k) \ w_n^T(k)]. \quad (4.37)$$

Виходи спостерігача є n безрозмірними виходами моделі об'єкту.

Параметри спостерігача визначаються наступним чином [211]

$$A = \begin{bmatrix} A_p & B_{pd}C_{id} & 0 & 0 \\ 0 & A_{id} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{od} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_{pu} & B_{pv} & B_{pd}D_{id} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{id} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{od} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_n \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} C_p & D_{pd}C_{id} & C_{od} & \begin{bmatrix} C_n \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & D_{pv} & D_{pd}D_{id} & D_{od} & \begin{bmatrix} D_n \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}. \quad (4.38)$$

Моделі збурень об'єкту керування і вихідних збурень змінюються таким чином, щоб виміряні виходи передували невиміряним виходам.

Блок формування уставок контролера використовується для генерації ступінчастого сигналу, амплітуда якого змінюється з часом, для вивчення відповідної реакції MPC контролера з урахуванням характеристик моделі об'єкту керування.

Сигнали заданих значень об'єднуються та підключаються до входу «ref» контролера MPC. Виходи mv контролера MPC разом із змінними перешкод утворюють входи моделі об'єкту керування. Виходи моделі повертаються на вхід «mo» контролера MPC. Задані та фактичні значення контрольованих змінних відображаються блоками Scope і експортуються в основну пам'ять MATLAB за допомогою блоків «To Workspace». Особливістю моделі Simulink є те, що модель лінійної передавальної функції керованої системи з кількома змінними обробляє або генерує відхилення від робочої точки. Однак значення фізичної робочої точки попередньо визначаються в контролері MPC програмою MPC Designer.

Таким чином, значення робочої точки керованих змінних і змінних збурень віднімаються з вихідних сигналів контролера MPC перед обробкою в програмному модулі «LTI System» [209]. Аналогічно, значення робочої точки контрольованих змінних додаються до виходів моделі об'єкту перед їх обробкою в модулі контролера MPC.

Наведена на рис. 4.25 структура моделі системи керування буровою установкою дозволяє відтворити усі її робочі режими. Параметрична

ідентифікація моделі відбувалась на основі експлуатаційних характеристик дослідно-промислової бурової установки (табл. 4.1) з урахуванням відповідних обмежень та отриманих експериментальних даних [101].

Програмна реалізація дослідженої системи прогнозного керування буровою установкою включає два основних етапи: визначення моделі об'єкту та синтез контролера МРК (рис. 4.26) [64].

Для визначення моделі зв'язку змінних RPM, WOB та P з ROP використовуються безперервні функції передачі від кожного входу до виходу *plant TF*.

Функція *Linearize (model,io)* виконує лінійну апроксимацію нелінійної моделі Simulink® з використанням точок аналізу, зазначених у *io*.

Оскільки динамічна модель системи має внутрішню динаміку або пам'ять про минулі стани, такі як інтегратори, лінії затримки, функції передачі, виконується перетворення у просторі станів з використанням функції *ss*. Час вибірки T_s обраний 0,3 с.

Перетворення моделі з безперервного часу на дискретний здійснюється методом утримання нульового порядку *ZOH* на входах і часом вибірки T_s .

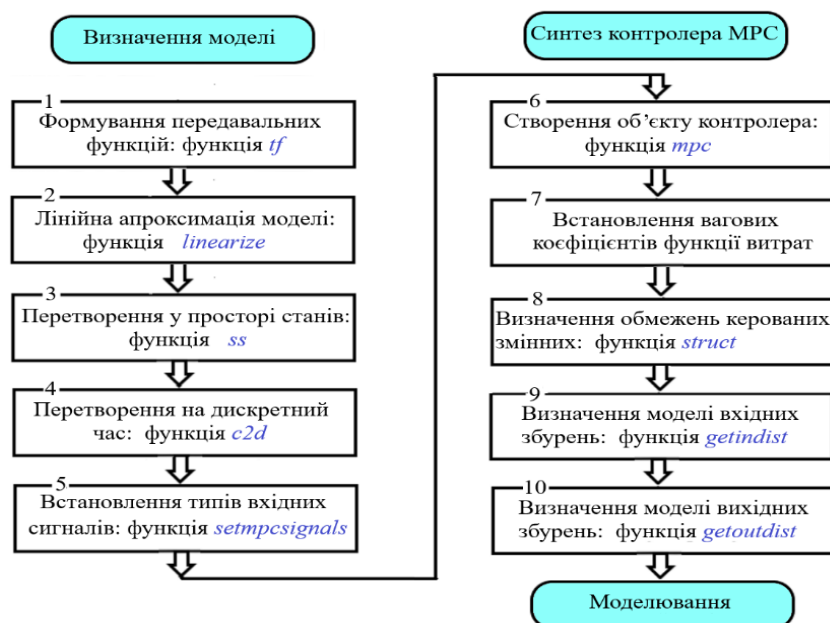


Рис. 4.26. Основні операції програмної реалізації системи модельно-прогнозного керування буровою установкою

Для визначення типів вхідних сигналів LTI моделі об'єкту, як маніпуляційних змінних, використовується функція *setmpcsignals* (регульовані змінні, виміряні та невиміряні збурення).

При синтезі контролера МРК обрано горизонт прогнозу 7 кроків та горизонт керування 3 кроки.

Жорсткі обмеження для керованих змінних та вагові коефіцієнти квадратичної функції витрат обирались на основі нормалізованих значень відповідних параметрів бурової установки (табл. 4.1).

Щоб визначити динамічні характеристики адитивних вхідних і вихідних невиміряних збурень використовувався інтегратор як модель збурень для кожного невиміряного входу завад і кожної невиміряної перешкоди, що діє на кожен виміряний вихід.

Для оцінки стану системи застосовано фільтр Калмана.

Результати моделювання формування керуючих впливів у САК швидкістю проходки ROP при відпрацюванні контролером МРК заданих значень показано на рис. 4.27 [64].

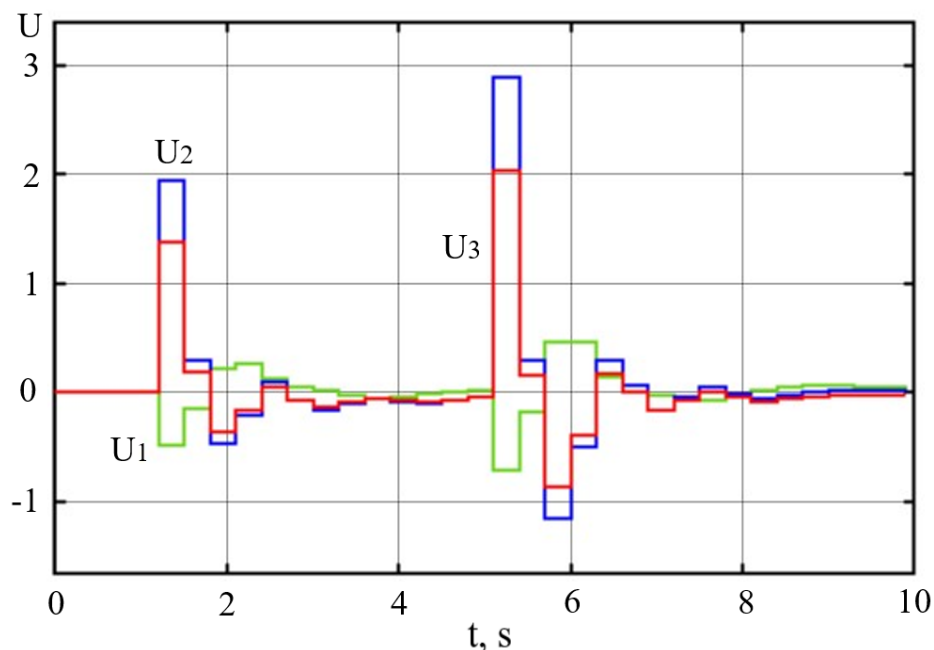


Рис. 4.27. Результати моделювання формування керуючих впливів у системі керування буровою установкою за схемою безпосереднього регулювання (нормалізовані значення)

На рис. 4.28 наведено графіки перехідних процесів у системі при відпрацюванні контролером MPC заданих значень ROP (Y), що відповідають отриманим оцінкам фізико-механічних характеристик гірських порід чи їх мінералого-технологічним різновидам [64].

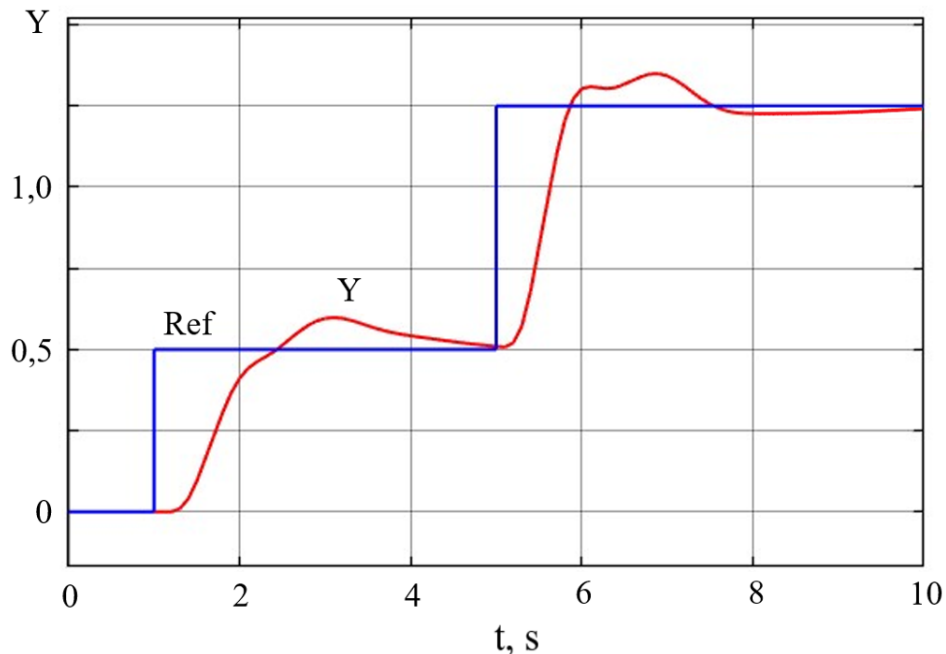


Рис. 4.28. Графіки перехідних процесів у системі керування при відпрацюванні контролером MPC заданих значень (Ref) швидкості проходки свердловин ROP (Y) (нормалізовані значення)

Результати Simulink моделювання ідентичні тим, що отримані в програмі MPC Designer.

Аналіз результатів моделювання та експериментальних досліджень показує, що використання МРК контролера безпосередньо у контурі керування буровою установкою у порівнянні з базовою структурою на основі ПД регуляторів дозволяє зменшити у середньому на 17 % час перехідних процесів в системі та підвищити якість регулювання швидкості проходки свердловин (Додаток Б).

4.3.3. Система каскадного керування процесом буріння свердловин з МРК контролером на надзорному рівні

Існуючі традиційні системи керування буровою установкою мають у своїй основі ПД контролери, яким притаманні зазначені вище недоліки. Перехід на

більш якісний рівень керування із застосуванням МРК стратегії краще виконувати за каскадною схемою [51]. У цьому випадку вихідні або керовані змінні контролера МРК діють на задані значення існуючих підлеглих ПІД структур. Така каскадна структура має дві переваги: з одного боку, вона дозволяє обслуговуючому персоналу керувати системою в аварійних ситуаціях лише за допомогою звичайних засобів керування і, таким чином, полегшує впровадження МРК стратегії на практиці. З іншого боку, це має ефект лінеаризації – зв'язки між заданими значеннями підпорядкованих ПІД контролерів і керованими змінними МРК мають тенденцію вести себе більш «лінійно» [202, 210, 212].

Загальні рівняння простору станів, що описують установку та контролер, такі [210]

$$x_p(k+1) = A_p x_p(k) + B_p u(k) + G d_p(k), \quad (4.39)$$

$$y_p(k) = C_p x_p(k) + D_p u(k) + H d_m(k), \quad (4.40)$$

$$x_c(k+1) = A_c x_c(k) + B_c e(k), \quad (4.41)$$

$$u(k) = C_c x_c(k) + D_c e(k) + w(k), \quad (4.42)$$

де; $x_p(k)$ та $x_c(k)$ - стан установки та ПІД контролера відповідно; $u(k)$ - вхідні дані для установки, що генеруються контролером низького рівня; $d_p(k)$ та $d_m(k)$ - шум процесу та шум вимірювання; $w(k)$ - шум у сигналі керування; сигнал помилки $e(k) = r(k) - y(k)$.

Наведені рівняння стану МРС моделі у термінах стану $x_p(k)$ та $x_c(k)$ і незалежних змінних $r(k)$, $d_p(k)$, $d_m(k)$, $w(k)$ можна представити наступним чином [210]

$$\mathcal{X}(k+1) = \mathcal{A} \cdot \mathcal{X}(k) + \mathcal{B} \cdot \mathcal{U}(k) + \mathcal{G} \cdot \mathcal{W}(k), \quad (4.43)$$

$$\mathcal{Y}(k) = \mathcal{C} \cdot \mathcal{X}(k) + \mathcal{D} \cdot \mathcal{U}(k) + \mathcal{H} \cdot \mathcal{W}(k), \quad (4.44)$$

$$\text{де; } \mathcal{X}(k) = \begin{bmatrix} x_p(k) \\ x_c(k) \end{bmatrix}; \quad \mathcal{U}(k) = r(k); \quad \mathcal{W}(k) = \begin{bmatrix} d_p(k) \\ d_m(k) \\ w(k) \end{bmatrix}; \quad \mathcal{Y}(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k) \end{bmatrix};$$

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} A_p - B_p M D_c C_p & B_p M C_c \\ B_c M D_p D_c C_p & B_c C_p \end{bmatrix}; \quad \mathcal{B} = \begin{bmatrix} B_p M D_c \\ B_c - B_c M D_p C_c \end{bmatrix};$$

Маючи на увазі взаємозв'язки між змінними RPM, WOB та P, для моделювання їх комплексного впливу на ROP використана Model 1, структура якої наведена на рис. 4.30 [64].

У наведеній на рис. 4.30 моделі використані наступні блоки: 1,2,3 - блоки Slider Gain із бібліотеки Simulink / Math Operations; 4,5,6 - блоки Sum із бібліотеки Simulink / Math Operations.

У якості Model 2 використана структура, задіяна у підрозділі 4.3.2.

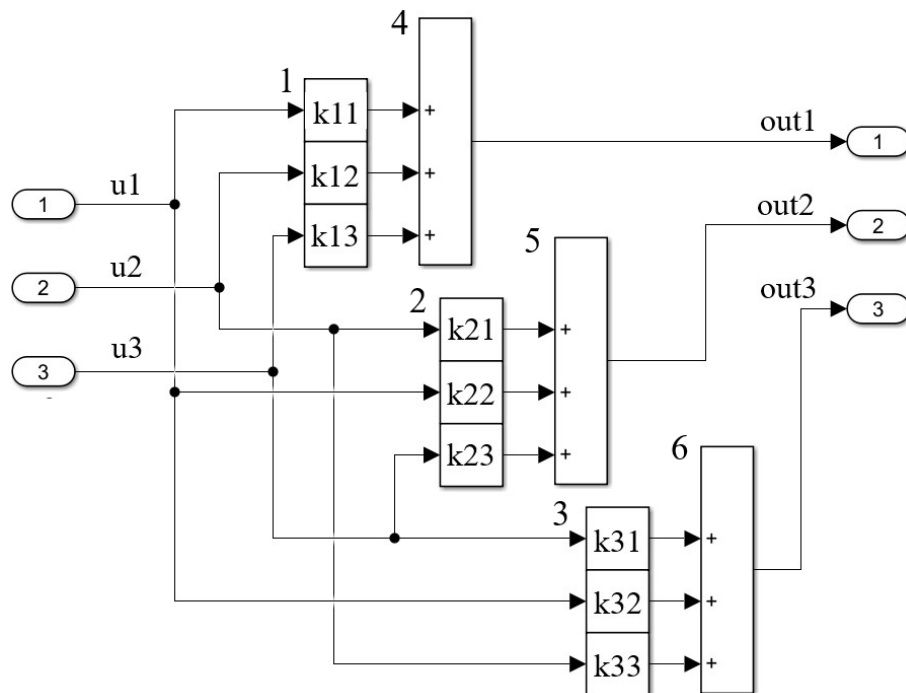


Рис. 4.30. Схема моделювання взаємозв'язку змінних каналів керування

Налаштування МРК контролера відбувалось із застосуванням програми MPC Designer. Конкретні значення коефіцієнтів k_{1n} , k_{2n} , k_{3n} визначаються за результатами кореляційного аналізу відповідних змінних дослідно-промислової бурової установки.

Результати моделювання формування керуючих впливів у САК буровою установкою за каскадною схемою керування при відпрацюванні змін заданих значень WOB (U_1), P(U_2) та RPM(U_3) показано на рис. 4.31 [64].

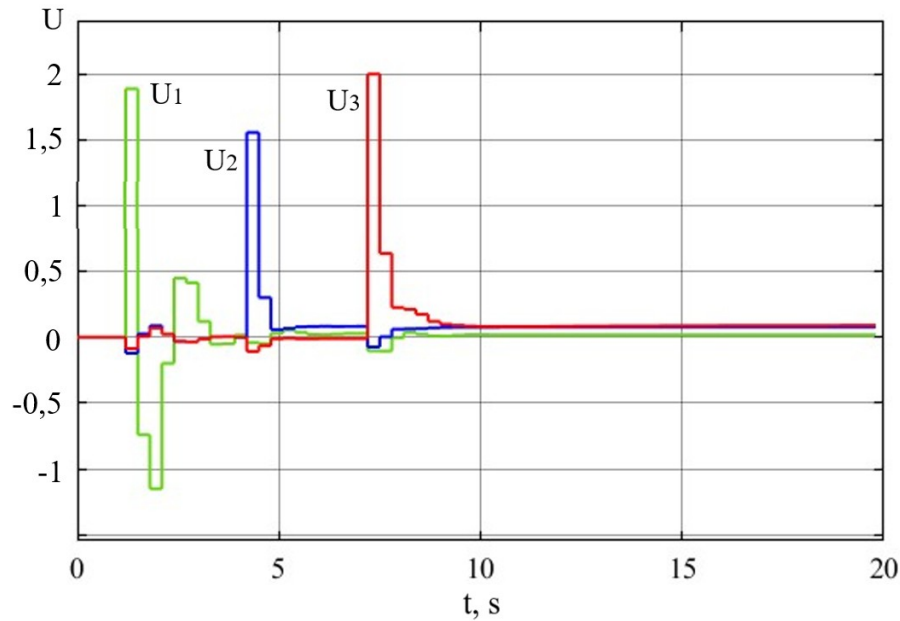


Рис. 4.31. Результати моделювання формування керуючих впливів (U) за каскадною схемою керування (нормалізовані значення)

На рис. 4.32 наведено графіки перехідних процесів у САК при відпрацюванні контролером МРК заданих значень по кожному контуру керування [64].

Наведені результати комп'ютерного моделювання використані для налаштування САК дослідно-промисловою буровою установкою. Експериментальна експлуатація установки відбувалась на ділянці родовища, що складається з 7 мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Отримані результати свідчать про те, що застосування каскадної схеми керування на базі МРК контролера (у порівнянні з використанням МРК контролера для безпосереднього керування) зменшило час перехідних процесів в системі у середньому на 12-15% при величині перерегулювання, яке не перевищувало 1,2 значення ROP, визначеного оптимальним щодо отриманій оцінці мінералого-технологічних різновидів залізної руди (Додаток А).

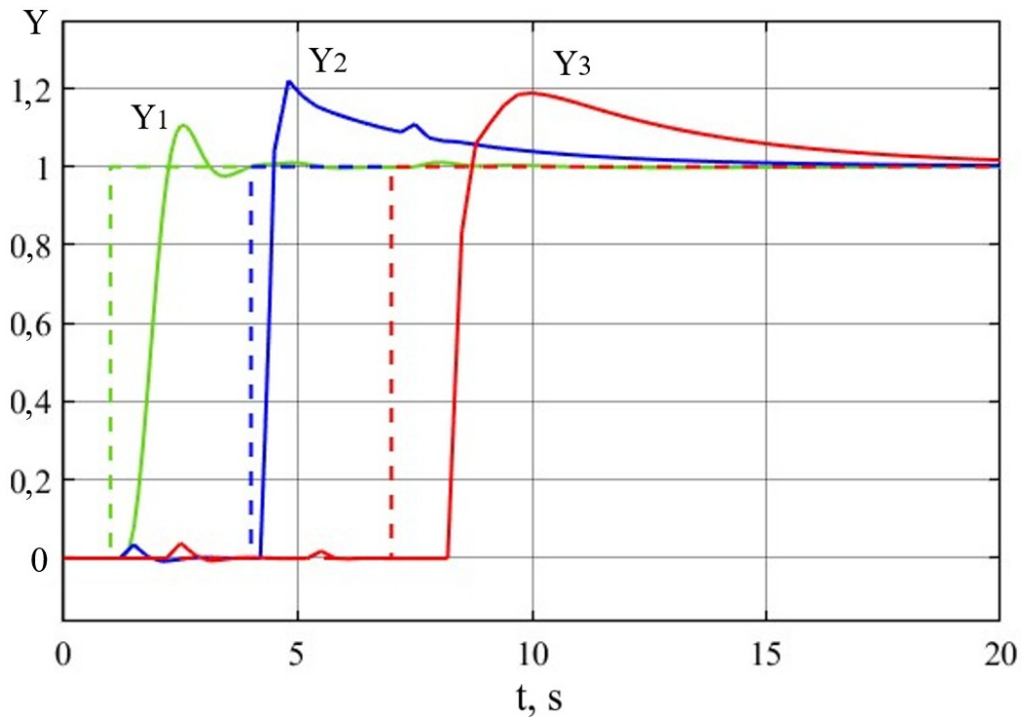


Рис. 4.32. Графіки перехідних процесів у САК при відпрацюванні контролером МРК заданих значень за каскадною схемою (нормалізовані значення)

Своєчасна оцінка фізико-механічних властивостей гірської породи та оперативне налаштування за допомогою МРС керування робочих режимів бурової установки дозволило зменшити її питоме енергоспоживання на 8-11%. Зазначені результати відображено у довідці щодо експериментальної апробації результатів дисертаційної роботи при виконанні бурових робіт із застосуванням дослідно-промислової установки ТОВ «ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО» (Додаток А).

Також результати дисертаційної роботи апробовано у виробничому процесі ТОВ «МЕТБЛАСТ» (Додаток В):

- запропонована комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт в залізорудному кар'єрі використана для визначення мінералогічних різновидів залізної руди;
- результати розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди використані при реалізації процедури формування заряду вибухової речовини та технології його підривання у вибухових свердловинах.

За результатами апробації встановлено, що запропонована комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі дозволяє:

- 1) сформувати банк даних мінералогічних різновидів залізної руди родовища, що розробляється, із застосуванням результатів вимірювань кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки та адаптивної нейро-нечіткої системи для їх класифікації;
- 2) виконати мінералогічний опис пробуреної свердловини по її глибині за результатами співставлення вимірюваних під час буріння технологічних (вибухових) свердловин експлуатаційних параметрів бурової установки з ознаками мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища із сформованого банку даних;
- 3) використати інформацію про мінералогічний опис пробуреної свердловини по її глибині при визначення конструкції і параметрів заряду вибухової речовини, та технології його підривання.

Зазначається, що запропонована у дисертаційній роботі комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі завдяки оперативному визначенню мінералогічного складу гірської породи по глибині пробуреної свердловини дозволяє:

- 1) зменшити на 5-7% масу вибухової речовини при виконанні вибухових робіт;
- 2) керувати гранулометричним складом підірваної гірської маси шляхом корегування конструкції вибухового заряду та технології його підривання у відповідності до визначеного мінералогічного складу гірської породи.

Розроблені в дисертації принципи, структура та системи автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин на базі гібридної нейро-нечіткої моделі використовуються у навчальному процесі для здобувачів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Східноукраїнського національного університету імені Володимира

Даля (Додаток Д), для студентів технічних спеціальностей Львівського національного університету імені Івана Франка (Додаток Е), а також для здобувачів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Криворізького національного університету (Додаток Г).

4.4 Висновки до розділу 4

1. Розроблена комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі, основними складовими, якої є синтез і навчання адаптивної нейро-нечіткої системи (ANFIS) для визначення та формування банку даних мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища під час буріння розвідувальних свердловин; синтез алгоритму і параметрів модельно-прогнозуючого керування буровою установкою; регулювання основних змінних та динамічна корекція параметрів систем бурової установки відповідно до застосованого алгоритму каскадного модельно-прогнозуючого керування в процесі буріння технологічних (вибухових) свердловин; формування мінералогічного опису пробуреної свердловини по її глибині за результатами співставлення вимірювань під час буріння технологічних (вибухових) свердловин характеристик бурової установки з ознаками мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища із сформованого банку даних; передача отриманої інформації до центрального інформаційного банку даних.

2. Для реалізації процедури розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди використана адаптивна нейро-нечітка система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), оптимізована із застосуванням генетичного алгоритму (GA). Для створення початкової популяції хромосом у генетичному алгоритмі використано метод нечіткої кластеризації Fuzzy C-means (FCM). У поставленій задачі вектор параметрів функцій приналежності термів вхідних змінних і вектор коефіцієнтів лінійних функцій у висновках правил системи ANFIS формуються на підставі характеристик бурової установки, що вимірюються.

3. У наборі експериментальних даних, що використані для тренування та навчання запропонованої системи розпізнавання виділено 7 мінералогічних різновидів залізної руди: 1 – магнетитові роговики; 2 – силікат-карбонат-магнетитові роговики; 3 – червоносмугасті магнетитові та гематит-магнетитові роговики; 4 – напівокислені та окислені роговики; 5 – силікатні сланці, безрудні роговики та кварці; 6 – магнетит-силікат-карбонатні (бідні) роговики; 7 – гематит-магнетитові роговики. Відповідно до отриманих результатів зроблено висновок, що середня точність розпізнавання технолого-мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища із застосуванням алгоритму ANFIS становить 85,1%, а модифікованого ANFIS+GA, відповідно – 92,4%. Застосування попередньої кластеризації даних в алгоритмі ANFIS+GA за допомогою методу Fuzzy C-means покращує точність на 0,2-0,3% та зменшує час на отримання результатів на 7-8%.

4. Експериментально апробований метод визначення робочих режимів процесу буріння свердловин на основі нечіткої кластеризації вимірюваних параметрів бурової установки. Метод нечітких середніх FCM застосований для виділення трьох робочих режимів процесу буріння: R1- початкова фаза; R2 - фаза ефективного буріння; R3 - фаза неефективного буріння. Для реалізації зазначеної процедури кластеризації обрано наступні змінні: x_1 - швидкість проходки (ROP); x_2 - швидкість обертання долота (RPM); x_3 - вага на долоті (WOB); x_4 - амплітуда вібрації долота (A); x_5 - похідна від ROP (dROP); та параметр нелінійності вібрації x_6 - (THD). Проведений аналіз результатів кластеризації доводить, що застосований підхід та обраний набір параметрів дозволяють з довірчою ймовірністю 0,95 визначити робочі режими процесу буріння.

5. Досліджена базова структура керування буровою установкою на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів для регулювання у замкнутих контурах основних змінних процесу, система з модельно-прогнозуючим контролером (MPC) для безпосереднього керування процесом та

структура дворівневого каскадного керування з МРС контролером на надзорному рівні.

6. Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що використання МРК контролера безпосередньо у контурі керування буровою установкою у порівнянні з базовою структурою на основі ПІД регуляторів дозволяє зменшити у середньому на 17 % час перехідних процесів в системі та підвищити якість регулювання швидкості проходки свердловин.

7. За результатами комп'ютерного моделювання зроблено висновок щодо доцільності використання структури дворівневого керування буровою установкою, відповідно до якій на нижньому рівні застосовуються ПІД контролери, а на верхньому – модельно-прогнозуючий контролер (МРС) для динамічного корегування заданих значень регульованих змінних контурів нижнього рівня. Результати комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень використані для налаштування САК дослідно-промисловою буровою установкою. Експериментальна експлуатація установки відбувалась на ділянці родовища, що складається з 7 мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Отримані результати свідчать про те, що застосування каскадної схеми керування на базі МРС контролера зменшило час перехідних процесів в системі у середньому на 12-15% при величині перерегулювання, яке не перевищувало 1,2 значення ROP, визначеного оптимальним щодо отриманій оцінці мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Своєчасна оцінка фізико-механічних властивостей гірської породи та модельно-прогнозуюче керування робочими режимами бурової установки дозволило зменшити її питоме енергоспоживання на 8-11%.

8. Результати дисертаційної роботи апробовані при виконанні бурових робіт із застосуванням дослідно-промислової установки ТОВ «ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО» (м. Полтава) та у виробничому процесі ТОВ «МЕТБЛАСТ» (м. Кривий Ріг). Розроблені в дисертації принципи, структура та системи автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин на базі гібридної нейро-нечіткої моделі

використовуються у навчальному процесі для студентів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, для студентів технічних спеціальностей Львівського національного університету імені Івана Франка, а також для здобувачів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Криворізького національного університету .

9. Приорітет науково-технічних рішень, запропонованих у дисертаційній роботі, стосовно визначення характеристик гірських порід та керування процесом буріння свердловин підтверджено 9 патентами України на корисну модель [48, 52, 74-76, 213-216].

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальне наукове завдання, яке полягає в розробці принципів, структури і системи автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин з використанням вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки та результатів оперативного розпізнавання характеристик гірської породи, що забезпечує формування і підтримання оптимальної швидкості проходки в умовах неповної і нечіткої інформації про характеристики об'єкту керування, які істотно змінюються в часі, мінімальну тривалість перехідних процесів і енергоефективність.

Основні наукові і практичні результати роботи можна узагальнити в наступних висновках:

1. Процес буріння свердловин у залізорудному кар'єрі, є нелінійним динамічним нестаціонарним об'єктом керування, який функціонує в умовах неповного і нечіткого інформаційного забезпечення. Існуючі системи автоматизованого керування (САК) процесом буріння не забезпечують якісне формування і підтримання оптимальної швидкості проходки свердловин, відповідно до поточних фізико-механічних характеристик та текстурно-структурних особливостей гірської породи, що буриться. Це негативно позначається на продуктивності та енергоефективності технологічного процесу буріння.

2. Удосконалено математичну модель процесу буріння свердловин, яка включає блок приводу бурової установки у наземній частині, блок бурового інструменту у свердловинній частині та блок руйнування гірської породи, шляхом подання її у вигляді гібридної структури, аналітична частина, якої включає динамічні субмоделі робочих режимів і симулює силові, кінематичні та енергетичні залежності, а для формалізації функції взаємодії бурового долота з гірською породою використовується нейро-нечітка система, при цьому блок приводу бурової установки і блок руйнування гірської породи представлено у

вигляді структур із зосередженими параметрами, а блок бурового інструменту у свердловинній частині – структурою з розподіленими параметрами, що дозволило підвищити точність та надійність прогнозування результатів буріння в умовах змінних характеристик руди та стану технологічного обладнання, а також якість управління технологічним процесом та його енергоефективність.

3. Для зменшення тривалості та трудомісткості параметризації гібридної моделі процесу буріння свердловин вона представлена у вигляді комбінації динамічних субмоделей робочих режимів, для ідентифікації яких, вперше запропоновано фіксувати ступень повного гармонійного спотворення вібраційного сигналу бурового долота, який виділяється методом аналізу порядку обертових частин приводу бурової установки в процесі зміни його робочого режиму, що дозволяє засвідчити перехід процесу до неефективного буріння та запобігти підвищенню амплітуди усіх видів вібрації, формуванню режиму прихват-прослизання долота, зменшенню швидкості проходки і збільшенню питомих енерговитрат.

4. Вперше розроблений метод визначення характеристичних ознак взаємодії долота бурової установки з гірською породою в процесі буріння свердловин на основі вимірювання параметрів супутнього вібраційного сигналу, який відрізняється від відомих тим, що в процесі зміни робочого режиму приводу обертових частин бурової установки формують карту порядку в усьому діапазоні його обертів, визначають частоту високоамплітудної вібрації долота, що відповідає визначеному піковому порядку обертів на сформованій карті, на цій частоті вимірюють параметри та обчислюють середньоквадратичне значення амплітуди та гармонійне спотворення вібраційного сигналу бурового долота, що дозволяє за рахунок зменшення впливу збурюючих факторів підвищити якість оцінки фізико-механічних характеристик гірських порід та визначити робочі режими процесу буріння.

5. Удосконалено ітераційний метод оперативного розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин, заснований на аналізі характеристичних параметрів у векторному просторі

ознак, в якості яких використані результати вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки, а саме швидкості проходки, навантаження на долото та швидкості його обертання, продуктивності системи очищення свердловин від шламу, споживаної питомої механічної енергії, середньоквадратичного значення амплітуди та гармонійного спотворення сигналу вібрації долота, а для реалізації процедури розпізнавання застосовується адаптивна нейро-нечітка система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), оптимізована із застосуванням генетичного алгоритму (GA) з попередньою кластеризацією ознак методом нечітких середніх (Fuzzy C-means), що дозволяє шляхом мінімізації суми зважених відстаней між аналізованими та зразковими результатами вимірювань характеристичних параметрів віднести предмет розпізнавання до основних мінералогічних різновидів залізної руди експлуатованого родовища з похибкою 7-9%.

6. Удосконалено автоматизовану систему керування буровою установкою шляхом використання в її структурі двох рівнів, з яких нижній представлено замкнутими контурами пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання навантаження на долото, швидкості його обертання та продуктивності системи очищення свердловини, а на верхньому рівні використовується модельно-прогнозуюче керування для динамічного корегування заданих значень зазначених регульованих змінних, величина яких визначається оперативними оцінками мінералого-технологічних різновидів руди, що дозволяє зменшити час перехідних процесів в системі у середньому на 12-15% та понизити питоме енергоспоживання на 8-11%.

7. Розроблена комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі, основними складовими, якої є синтез і навчання адаптивної нейро-нечіткої системи (ANFIS) для визначення та формування банку даних мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища під час буріння розвідувальних свердловин; синтез алгоритму і параметрів модельно-прогнозуючого керування буровою установкою; регулювання основних змінних та динамічна корекція параметрів систем бурової установки

відповідно до застосованого алгоритму каскадного модельно-прогнозуючого керування в процесі буріння технологічних (вибухових) свердловин.

8. Результати дисертаційної роботи апробовані при виконанні бурових робіт із застосуванням дослідно-промислової установки ТОВ «ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО» (м. Полтава) та у виробничому процесі ТОВ «МЕТБЛАСТ» (м. Кривий Ріг). Дисертаційна робота є складовою держбюджетних НДР № 30-117-24 «Ресурсозберігаючий неруйнівний оперативний контроль та енергоефективне розподілене керування рудопотоками гірничозбагачувального комбінату» (номер держреєстрації 0124U000610) та НДР № 30-119-24 «Визначення закономірностей електромагнітного ультразвукового та вихрострумowego перетворень у залізорудній сировині для розпізнавання її мінералогічних різновидів» (номер держреєстрації 0124U000714).

9. Розроблена комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі забезпечує формування і підтримання оптимальної швидкості проходки свердловин шляхом модельно-прогнозуючого формування регулюючих дій за результатами вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки та оперативного визначення основних мінералогічних різновидів гірської породи, що буриться, а також зменшення часу, впродовж якого бурова установка працює поза своїх оптимальних характеристик і тим самим забезпечує досягнення заданих показників продуктивності і енергоефективності. Результати моделювання, випробувань та апробації запропонованої технології свідчать про високу ефективність розроблених науково-технічних рішень, що дозволяє рекомендувати їх для широкого промислового використання на гірничих підприємствах.

10. Розроблені в дисертації принципи, структура та системи автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин на базі гібридної нейро-нечіткої моделі використовуються у навчальному процесі для здобувачів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Східноукраїнського національного

університету імені Володимира Даля, для студентів технічних спеціальностей Львівського національного університету імені Івана Франка, а також для здобувачів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Криворізького національного університету.

Список використаних джерел

1. World Economic Forum (2017). Digital Transformation Initiative. Mining and Metals Industry. Retrieved from <http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/wef-dti-mining-and-metals-white-paper.pdf>.
2. Zhironkin, S., & Ezdina, N. (2023). Review of Transition from Mining 4.0 to Mining 5.0 Innovative Technologies. *Applied Sciences*, 13, 4917. <https://doi.org/10.3390/app13084917>.
3. Zhironkin, S., Gasanov, M., & Suslova, Y. (2022). Orderliness in Mining 4.0. *Energies*, 15(21), 8153. <https://doi.org/10.3390/en15218153>.
4. Staszewski, W., & Jablonski, A. (2019). Challenges in application of MEMS sensors for condition monitoring of machinery. In Proceedings of the Conference *Diagnostyka Maszyn: XLVI Ogólnopolskie Sympozjum* (p. 61). Katowice, Poland.
5. Zhou, J., Zhou, Y., Wang, B., & Zang, J. (2019). Human–Cyber–Physical Systems (HCPSs) in the Context of New-Generation Intelligent Manufacturing. *Engineering*, 5(4), 624–636. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.015>.
6. Abu-Abed, F. N. (2022). Application of intelligent management technologies and business design of Industry 5.0 in Mining 5.0. *Economics and Innovation Management*, 3, 50–59. DOI:10.26730/2587-5574-2022-3-50-59.
7. Sremac, S., Zavadskas, E. K., Matić, B., Kopic, M. & Stević, Z. (2019) Neuro-fuzzy inference systems approach to decision support system for economic order quantity, *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 32(1), 1114-1137. DOI: 10.1080/1331677X.2019.1613249.
8. Walczak, R., Koszewski, K., Olszewski, R., Ejsmont, K., & Kálmán, A. (2023). Acceptance of IoT Edge-Computing-Based Sensors in Smart Cities for Universal Design Purposes. *Energies*, 16(3), 1024. 10.3390/en16031024.
9. Kirvan, P., & Hashemi-Pour, C. (2024). Former Site EditorBrien Posey What is a smart sensor and how does it work? Retrieved from <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/smart-sensor>.

10. Park, S., Jung, D., Nguyen, H., & Choi, Y. (2021). Diagnosis of Problems in Truck Ore Transport Operations in Underground Mines Using Various Machine Learning Models and Data Collected by Internet of Things Systems. *Minerals*, 11(10), 1128. <https://doi.org/10.3390/min11101128>.
11. Majstorovic, V., Simeunovic, V., Mitrovic, R., Stosic, D., Dimitrijevic, S., & Miskovic, Z. (2022). How to apply the ERP model for Smart Mining? MATEC Web Conferences, 368, 01015. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202236801015>
12. Tyleckova, E., & Noskievicova, D. (2020). The role of big data in Industry 4.0 in mining industry in Serbia. *Quality and Production Managers Association*, 2(1), 166–173. DOI: <https://doi.org/10.2478/czoto-2020-0020>.
13. Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J., & Fast-Berglund, A. (2016). The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 488, 1–9. DOI:10.1007/978-3-319-51133-7_80.
14. Digital Twins for Industrial Applications White Paper. Definition, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases. An Industrial Internet Consortium White Paper. Version 1.0. (2020). Retrieved from https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf.
15. Kumar, P., Singh, D., & Bhamu, J. (2022). Machine Vision in Industry 4.0. Challenges and Future Directions, 1–13. DOI: 10.1201/9781003122401-13.
16. Zhang, C., Wang, X., Fang, S., & Shi, X. (2022). Construction and Application of VR-AR Teaching System in Coal-Based Energy Education. *Sustainability*, 14(23), 16033; <https://doi.org/10.3390/su142316033>.
17. Smart Mining Scenscenario Solution. *Corerain*. Retrieved from https://www.corerain.com/en/solutions_en/mine.html.
18. Bi, L., Wang, Z., Wu, Z., & Zhang, Y. (2022). A New Reform of Mining Production and Management Modes under Industry 4.0: Cloud Mining Mode. *Applied Sciences*, 12(6), 2781. <https://doi.org/10.3390/app12062781>.

19. Four Technologies Disrupting the Global Mining Industry Today. (2023, August 23). *International Banking*. Retrieved from <https://internationalbanker.com/technology/four-technologies-disrupting-the-global-mining-industry-today/>.
20. Nascimento, A., Kutas, D. T., Elmgerbi, A., Thonhauser, G., & Mathias, M. H. (2015). Mathematical Modeling Applied to Drilling Engineering: An application of Bourgoyne and Young ROP model to a preSalt case study. *Mathematical Problems in Engineering*, 631290, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/631290>.
21. Galle, E. M. & Woods, H. B. (1964). *Best Constant Weight and Rotary Speed for rotary Rock Bits*, Drilling and Production Practice.
22. Warren, T. M. (1981). Drilling model for Soft-Formation bits. *Journal of Petroleum Technology*, 33(06), 963–970. <https://doi.org/10.2118/8438-pa>.
23. Bingham, M. G. (1965). *A New Approach to Interpreting Rock Drillability*. Petroleum Publishing Company.
24. Hegde, C., Daigle, H., Millwater, H., & Gray, K. (2017). Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159, 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.020>.
25. Bourgoyne, A., & Young, F. (1974). A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 14(04), 371–384. <https://doi.org/10.2118/4238-pa>.
26. Alali, A. M., Abughaban, M. F., Aman, B. M., & Ravela, S. (2020). Hybrid data driven drilling and rate of penetration optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 200, 108075. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108075>.
27. Yang, Z., Liu, Y., Qin, X., Dou, Z., Yang, G., Lv, J., & Hu, Y. (2022). Optimization of drilling parameters of target wells based on machine learning and data analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(7), 9069–9084. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07103-x>.
28. Khalilidermani, M., & Knez, D. (2022). A survey of application of mechanical specific energy in petroleum and space drilling. *Energies*, 15(9), 3162.

<https://doi.org/10.3390/en15093162>.

29. Arehart, R.A. (1990). Drill-Bit Diagnosis with Neural Networks. *SPE Computer Applications*, 2(04), 24–28. <https://doi.org/10.2118/19558-PA>.
30. Bilgesu, H.I., Tetrack, L.T., Altmis, U., Mohaghegh, S., & Ameri, S. A. (1997). New Approach for the Prediction of Rate of Penetration (ROP) Values. In *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition 22 October 1997*. p. SPE-39231-MS. Lexington, Kentucky,
31. Amar, K., & Ibrahim, A. (2012). Rate of Penetration Prediction and Optimization Using Advances in Artificial Neural Networks, a Comparative Study. In *Proceedings of the 4th International Joint Conference on Computational Intelligence, Online Streaming, 25–27 October 2021* (p. 647–652). SciTePress-Science and Technology Publications, Barcelona, Spain.
32. Gidh, Y., Purwanto, A., & Bits, S. (2012). Artificial Neural Network Drilling Parameter Optimization System Improves ROP by Predicting/Managing Bit Wear. In *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, p. SPE-149801-MS. Utrecht, The Netherlands.
33. Stelzer, C., Grøttum, T., & Thonhauser, G. (2007). *Drillpipe Failure and its Prediction* (Master's Thesis) By Mining University Leoben & Statoil ASA.
Retrieved from
<https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1892572/AC06500811n01vt.pdf>.
34. Klie, H. (2021). *A Tale of Two Approaches: Physics-Based vs. Data-Driven Models*. TWA. Retrieved from <https://jpt.spe.org/twa/a-tale-of-two-approaches-physics-based-vs-data-driven-models>.
35. Berk, M. (2025). *Combining physics and deep learning*. Towards Data Science. Retrieved from <https://towardsdatascience.com/combining-physics-and-deep-learning-54eac4afe146/>.
36. Du, S., Huang, C., Ma, X., & Fan, H. (2024). A review of Data-Driven Intelligent Monitoring for Geological Drilling Processes. *Processes*, 12(11), 2478.
<https://doi.org/10.3390/pr12112478>.

37. Tariq, S., Lee, S., Shin, Y., Lee, M.S., Jung, O., Chung, D., & Woo, S.S. (2019). Detecting anomalies in space using multivariate convolutional LSTM with mixtures of probabilistic PCA. *In Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining 4–8 August 2019*, pp. 2123–2133. Anchorage, AK, USA.
38. Li, Z., & Yan, X. (2019). Fault-relevant optimal ensemble ICA model for non-Gaussian process monitoring. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* PP(99), pp.1-10. DOI: 10.1109/TCST.2019.2936793.
39. Wang, X., & Wu, P. (2022). Nonlinear dynamic process monitoring based on ensemble kernel canonical variate analysis and bayesian inference. *ACS Omega*, 7(22), 18904–18921. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01892>.
40. Khoshouei, M., & Bagherpour, R. (2023). Measurement, prediction, and modeling of the drilling specific energy by soft rock properties during the drilling operation. *Measurement*, 222, 113679.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113679>.
41. Khoshouei, M., Bagherpour, R., & Yari, M. (2024). A smart look at monitoring while drilling (MWD) and optimizing using acoustic emission technique (AET). *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70717-8>.
42. Nathan, Pastorek, Katherine, R. Young, & Alfred Eustes. (2019). Downhole Sensors in Drilling Operations. *PROCEEDINGS, 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, pp.11-13. Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-214.
43. Caplane, C., Rispal, M., De Oliveira Souza, G., Peronne, M., & Reiffsteck, P. (2024). Comparison of direct and indirect MWD measurements. *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization* (in: ISC2024). Barcelona. Retrieved from https://www.scipedia.com/public/Caplane_et_al_2024a.
44. Pessier, R., & Fear, M. (1992). Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.

<https://doi.org/10.2523/24584-ms>.

45. Yavari, H., Fazelizadeh, M., Aadnoy, B. S., Khosravanian, R., Qajar, J., Sedaghatzadeh, M., & Riazi, M. (2023). An approach for optimization of controllable drilling parameters for motorized bottom hole assembly in a specific formation. *Results in Engineering*, 20, 101548. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101548>.

46. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Шашкіна, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). Методи аналізу вібрації та акустичної емісії бурової установки в процесі буріння свердловин. *Гірничий вісник*, 112, 144-153.

47. Morkun, N., Bobrov, Y., & Hryshchenko Y. (2025). *Improving the efficiency of iron ore mining and processing*. LAMBERT Academic Publishing.

48. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., & Бобров, Є. Ю. (2025). *Спосіб визначення характеристик гірських порід в процесі буріння свердловин в гірському масиві* (Патент України № 158801). Державна служба інтелектуальної власності України.

49. Martin E., & Cobern. (2003). Downhole vibration monitoring & control system quarterly technical report #2.

Retrieved from <https://www.osti.gov/servlets/purl/821466>.

50. Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. (2024). Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 1-8.

<https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.

51. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Тронь, В. В., Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Гапоненко, І. А. (2023). *Підвищення ефективності процесів гірничого виробництва на основі ультразвукових технологій*. Кривий Ріг, Видавництво Сінельніков Д.А., Кривий Ріг.

52. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). *Спосіб визначення характеристик феромагнітних гірських порід у процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 156662). Державна служба інтелектуальної власності України.

53. Li, Z., Lei, Y., Wang, E., Frid, V., Li, D., Liu, X., & Ren, X. (2022). Characteristics of electromagnetic radiation and the acoustic emission response of Multi-Scale rock-like material failure and their application. *Foundations*, 2(3), 763–780. <https://doi.org/10.3390/foundations2030052>.
54. Khoshouei, M., Bagherpour, R., Jalalian, M. H., & Yari, M. (2020). Investigating the acoustic signs of different rock types based on the values of acoustic signal rms. *Rudarsko-geološko-naftni Zbornik*, 35(3), 29–38. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.3.3>.
55. Yang, Z., Liu, Y., Qin, X., Dou, Z., Yang, G., Lv, J., & Hu, Y. (2022). Optimization of drilling parameters of target wells based on machine learning and data analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(7), 9069–9084. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07103-x>.
56. Teale, R. (1965). The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 2(1), 57–73. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90022-7)
57. Dupriest, F., & Koederitz, W. (2005). Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy. *Proceedings of SPE/IADC Drilling Conference*. <https://doi.org/10.2523/92194-ms>.
58. Nascimento, A., Elmgerbi, A., Roohi, A., Prohaska, M., Thonhauser, G., Gonçalves, J. L., & Mathias, M. H. (2016). Reverse Engineering: A new well monitoring and analysis methodology approaching Playing-Back Drill-Rate tests in Real-Time for drilling optimization. *Journal of Energy Resources Technology*, 139(1). <https://doi.org/10.1115/1.4033067>.
59. Aldred, W., Bourque, J., Mannering, M., & Chapman, C. (2012). Drilling Automation. *Oilfield Review*, 24(2). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/248391350_Drilling_Automation.
60. Veysi, P., Adeli, M., & Peirov Naziri, N. (2024). Introduction to PID Controller and Model Predictive Control in Engineering Systems. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/379956442_Introduction_to_PID_Controller_and_Model_Predictive_Control_in_Engineering_Systems.

61. Моркун, В., Моркун, Н., Бобров, Є., & Грищенко, Я. (2025). Моделювання багатоконтурної системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин на основі ПІД контролерів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 5 (291), 45–52.
<https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-45-52>.
62. Samad, T., Bauer, M., Bortoff, S., Di Cairano, S., Fagiano, L., Odgaard, P. F., Rhinehart, R. R., Sánchez-Peña, R., Serbezov, A., Ankersen, F., Goupil, P., Grosman, B., Heertjes, M., Mareels, I., & Sosseh, R. (2020). Industry engagement with control research: Perspective and messages. *Annual Reviews in Control*, 49, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.03.002>
63. Ciannella, S., & Cluett, W.R. (2014). Applied Model Predictive Control - a brief guide do MATLAB/Simulink MPC toolbox. *Technical Report*. DOI:10.13140/RG.2.1.2334.7369.
64. Моркун, В.С., Моркун, Н.В., Бобров, Є.Ю., & Грищенко, Я.О. (2026). Модельно-прогнозуюче керування процесом буріння свердловин. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 00–00.
65. Zang, C., Lu, Z., Ye, S., Xu, X., Xi, C., Song, X., Guo, Y., & Pan, T. (2022). Drilling Parameters optimization for horizontal wells based on a multiobjective genetic algorithm to improve the rate of penetration and reduce drill string drag. *Applied Sciences*, 12(22), 11704. <https://doi.org/10.3390/app122211704>.
66. Chen, X., Gao, D., Guo, B., & Feng, Y. (2016). Real-time optimization of drilling parameters based on mechanical specific energy for rotating drilling with positive displacement motor in the hard formation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35. DOI:10.1016/j.jngse.2016.09.019.
67. Bahari, A., & Seyed, A.B. (2009). Drilling cost optimization in a hydrocarbon field by combination of comparative and mathematical methods. *Petroleum Science*, 6(4), 451–463. DOI: 10.1007/s12182-009-0069-x.
68. Hegde, C., Daigle, H., & Gray, K.E. (2018). Performance comparison of algorithms for real-time rate-of-penetration optimization in drilling using data-driven models. *SPE Journal*, 23(05), 1706–1722. <https://doi.org/10.2118/191141-PA>.

69. Abughaban, M., Alshaarawi, A., & Meng, C. (2019). Optimization of drilling performance based on an intelligent drilling advisory system. *In Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, Beijing, China, 26–28 March 2019*. DOI: 10.2523/IPTC-19269-MS
70. Payette, G.S., Spivey, B.J., Wang, L., & Bailey, J.R. (2017). Real-time well-site based surveillance and optimization platform for drilling: Technology, basic workflows and field results. *In Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, The Hague, The Netherlands, 14–16 March 2017*. <https://doi.org/10.2118/184615-MS>.
71. Gidh, Y., Purwanto, A., & Bits, S. (2012). Artificial Neural Network Drilling Parameter Optimization System Improves ROP by Predicting/Managing Bit Wear. *In Proceedings of the SPE Intelligent Energy International, Utrecht, The Netherlands, 27–29 March 2012*. DOI: 10.2118/149801-MS
72. Guria, C., Goli, K.K., & Pathak, A.K. (2014). Multi-objective optimization of oil well drilling using elitist non-dominated sorting genetic algorithm. *Petroleum Science, 11*, 97–110. DOI <https://doi.org/10.1007/s12182-014-0321-x>
73. Ammar, A., Mahmoud, A., & Beshir, M. (2021). Hybrid data driven drilling and rate of penetration optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering, 200*, 108075. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108075>
74. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., & Бобров, Є. Ю. (2022). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві* (Патент України № 151846). Державна служба інтелектуальної власності України.
75. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Грищенко, С. М., Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Гапоненко І. А. (2024). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві з феромагнітних порід* (Патент України № 156663). Державна служба інтелектуальної власності України.
76. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., & Бобров, Є. Ю. (2025). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві* (Патент України № 158802). Державна служба інтелектуальної власності України.

77. Yang, Z., Liu, Y., Qin, X., Dou, Z., Yang, G., Lv, J., & Hu, Y. (2022). Optimization of drilling parameters of target wells based on machine learning and data analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(7), 9069–9084. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07103-x>.
78. Guolin, Ke, Qi, Meng, Thomas, Finley, Taifeng, Wang, Wei, Chen, Weidong, Ma, Qiwei, Ye, Tie-Yan, Liu. (2017). LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*. https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf.
79. Friedman, J. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Ann. Statist.*, 29(5), 1189–1232. DOI: 10.1214/aos/1013203451.
80. Chen, X., Wang, R., Yang, J., Gao, D., Li, G., & Li, P. (2025). A new intelligent optimization method for drilling parameters of extended reach wells based on mechanical specific energy and machine learning. *Petroleum Research*, 10(3), 485–500. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2025.03.002>.
81. Chandan, R. R., Soni, S., Raj, A., Veeraiah, V., Dhabliya, D., Pramanik, S., & Gupta, A. (2022). Genetic algorithm and machine learning. In *Advances in healthcare information systems and administration book series*, <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-5656-9.ch009>.
82. Моркун, В., Моркун, Н., Грищенко, С., Бобров, Є., & Грищенко Я. (2025). Підвищення ефективності процесів гірничого виробництва на основі комп'ютерно-інтегрованих технологій. Wolf. Київ.
83. Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, Y. Y., & Haponenko, A. A. (2024). Modeling of drilling tool vibration in the process of drilling blast wells. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 12–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/012>.
84. *Drilling for Crude Oil - The Drilling Rig: Revision notes for GSCE Chemistry*. (n.d.). Pass my exams. Retrieved from <https://www.passmyexams.co.uk/GCSE/chemistry/drilling-crude-oil-1.html>.
85. Lucrasoft ICT groep. (n.d.). *HCR - CE - Frd Furukawa*. Retrieved from

<https://www.frd.eu/en/products/crawler-drills/hcr-ce/>.

86. Du, K., & Wei, Z. (2022). Research on the optimization of a drilling rock breaking method based on fuzzy cluster analysis. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 18(3), 751–760. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2022.019577>

87. Andrade, C. P. S., Saavedra, J. L., Tunkiel, A., & Sui, D. (2021). Rotary steerable systems: mathematical modeling and their case study. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11(6), 2743–2761.

<https://doi.org/10.1007/s13202-021-01182-6>.

88. Lilly, J. H. (2010). *Fuzzy control and identification*. Wiley.

89. Abonyi, J., Nagy, L., & Szeifert, F. (2000). Hybrid fuzzy convolution modelling and identification of chemical process systems. *International Journal of Systems Science*, 31(4), 457–466. <https://doi.org/10.1080/002077200291046>.

90. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2023). Моделювання процесів гірничого виробництва із застосуванням характеристик акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії. *Вісник Криворізького національного університету*, 1(21), 78–86.

<https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-78-86>.

91. Цокурєнко, О.О. (1998). *Інформаційно-обчислювальний комплекс та обернені завдання*. Наукова думка, Київ.

92. Моркун, В.С., Цокурєнко, О.О., & Луценко, І.А. (2005). *Адаптивні системи оптимального керування технологічними процесами*. Мінерал, Кривий Ріг.

93. Ротштейн, О.П., Ларюшкін, Е.П., & Катєльніков, Д.І. (1997). Багатофакторний аналіз технологічного процесу біоконверсії на основі лінгвістичної інформації. *Вісник ВПІ*, (3), 38-45.

94. Abonyi, J. (2003). Fuzzy model identification for control. In *Birkhäuser Boston eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0027-7>.

95. Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, SMC-15(1), 116–132. <https://doi.org/10.1109/tsmc.1985.6313399>.

96. Wang, L., & Mendel, J. (1992). Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 3(5), 807–814. <https://doi.org/10.1109/72.159070>.
97. Штовба, С.Д. (2007). *Проектування нечітких систем засобами MATLAB*. Гаряча лінія – Телеком.
98. Nascimento, A., Kutas, D. T., Elmgerbi, A., Thonhauser, G., & Mathias, M. H. (2015). Mathematical Modeling Applied to Drilling Engineering: An application of Bourgoyne and Young ROP model to a preSalt case study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/631290>.
99. Maurer, W. (1962). The «Perfect – cleaning» theory of rotary drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 14(11), 1270–1274. <https://doi.org/10.2118/408-pa>.
100. Meng, C., Mengci, S., Jinwen, Z., Kai, K., & Yucai, L. (2014). Maximizing drilling performance with Real-Time Surveillance system based on Parameters optimization Algorithm. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 8(1), 15–24. <https://doi.org/10.3968/5537>.
101. Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, E. Y., & Haponenko, I. A. (2025). Determination of the harmonic distortion value of vibroacoustic signals in the process of drilling operations. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 88–95. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/088>.
102. Sharma, A., Dushaishi, M. A., & Nygaard, R. (2021). Fixed bit rotary drilling failure Criteria Effect on drilling vibration. *By University of Oklahoma Libraries*. Retrieved from <http://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-pdf/ARMA21/All-ARMA21/2480289/arma-2021-2083.pdf>.
103. Akhtarmanesh, S., Atashnezhad, A., Hareland, G., & Dushaishi, M. A. (2021). ROP Model for PDC Bits in Geothermal Drilling. *55th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2021*. June 2021. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/358395813_ROP_Model_for_PDC_Bits_in_Geothermal_Drilling

104. Khandelwal, M. (2012). Correlating P-wave Velocity with the Physico-Mechanical Properties of Different Rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 170(4), 507–514. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0556-7>.
105. Dukkupati, R. V., & Srinivas, J. (2010). *Solving Engineering Mechanics Problems with MATLAB*. UK: New Academic Science.
106. Dukkupati, R. V. (2014). *MATLAB for Control System Engineers*. UK: New Academic Science Limited.
107. Zhou, Z., Hu, Y., Liu, B., Dai, K., & Zhang, Y. (2023). Development of automatic electric drive drilling system for core drilling. *Applied Sciences*, 13(2), 1059. <https://doi.org/10.3390/app13021059>.
108. *Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Motor Speed: System Modeling*. (n.d.). Michigan. Retrieved from <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed&ion=SystemModeling>.
109. Simscape Block Libraries, 2025. MathWorks. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
110. Sharma, A., Burak, T., Nygaard, R., Espen, E., Kristiansen, T., Welmer, M. (2025). Hybrid ROP modeling: Combining analytical and data-driven approaches for drilling. *Geoenergy Science and Engineering*, Volume 251, 213877. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.213877>.
111. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Поркуян, О. В., Грищенко, С. М., Бобров, Є. Ю., & Грищенко, Я. О. (2024). Визначення параметрів вібрації бурової установки із використанням методу відстеження порядку обертових машин. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 5 (285), 50–58. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-50-58>.
112. Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Shashkina, A. A., & Bobrov, E. Y. (2024). General principles of formalization of technological process control of mining production in a dynamic distributed system. *Radio Electronics*,

Computer Science, Control, 4, 210–221. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-4-20>.

113. Flexible Shaft, 2025. MATLAB. Retrieved from

<https://se.mathworks.com/help/sdl/ref/flexibleshaft.html>

114. Chudnovsky, V., Kennedy, D., Mukherjee, A. & Wendlandt, J. (2006). Modeling Flexible Bodies in SimMechanics and Simulink. *MATLAB Digest*, 3(14).

115. Adams, M. L. (2009). Rotating machinery vibration. In *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9781439847558>.

116. Miller, S., Soares, T., Van Weddingen, Y., & Wendlandt, J. (2017). Modeling Flexible Bodies with Simscape Multibody. *The MathWorks*.

117. Mechanical Rotational System with Stick-Slip Motion. MATLAB. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/mechanical-rotational-system-with-stick-slip-motion.html>.

118. Mechanical System with Translational Friction. MATLAB. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/mechanical-system-with-translational-friction.html>.

119. Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young, F. (1986). Applied Drilling Engineering. In *Society of Petroleum Engineers Richardson, Texas, USA eBooks*. <https://doi.org/10.2118/9781555630010>.

120. National Oilwell Varco. «RockForce™ Bits» in Products. (2014). Retrieved from

http://www.nov.com/Segments/Wellbore_Technologies/Downhole/Drill_Bits/Roller_Cone/RockForce_Bits/RockForce.aspx.

121. Liou, J. «The Hughes Christensen Talon PDC». (2016). Retrieved from <http://www.drillingcontractor.org/new-bits-look-beyond-design-at-overall-wellbore16693>.

122. Warren, T. M. (1987). Penetration-Rate performance of Roller-Cone bits. *SPE Drilling Engineering*, 2(01), 9–18. <https://doi.org/10.2118/13259-pa>.

123. Patil, P. A., Teodoriu, C. (2013). Analysis of Bit–Rock Interaction During Stick–Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. *OIL GAS European*

Magazine,

39(3).

124–129.

https://www.researchgate.net/publication/271192233_Analysis_of_Bit-Rock_Interaction_During_Stick-Slip_Vibration_Using_PDC_Cutting_Force_Model.

124. Detournay, E., & Defourny, P. (1992). A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29(1), 13–23.

[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).

125. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Бобров, Є. Ю., & Грищенко, Я. О. (2025). Моделювання механізму взаємодії бурового долота з гірською породою. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 8 (294), 45–51. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-45-51>.

126. Kessai, I., Benammar, S., Doghmane, M. Z., & Tee, K. F. (2020). Drill Bit Deformations in Rotary Drilling Systems under Large-Amplitude Stick-Slip Vibrations. *Applied Sciences*, 10(18), 6523. <https://doi.org/10.3390/app10186523>.

127. Zhou, Z., Hu, Y., Liu, B., Dai, K., & Zhang, Y. (2023b). Development of automatic electric drive drilling system for core drilling. *Applied Sciences*, 13(2), 1059. <https://doi.org/10.3390/app13021059>.

128. Rotational Friction. MATLAB. Retrieved from

<https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/rotationalfriction.html>

129. Armstrong, B. & C.C. de Wit (1995). *Friction Modeling and Compensation*, The Control Handbook, CRC Press.

130. Mechanical Rotational System with Stick-Slip Motion. MATLAB. Retrieved from

<https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/mechanical-rotational-system-with-stick-slip-motion.html>.

131. Бобров, Є. Ю. (2023). Вібраційний аналіз процесу буріння свердловин. *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*, с. 240. Кривий Ріг, Криворізький національний університет.

132. Wang, Y., Ni, H., Wang, R., & Liu, S. (2022). An improved model to characterize drill-string vibrations in rotary drilling applications. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 18(5), 1263–1273. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2022.020405>.
133. Che Kar, Suriani bt, S., Esat, I.I., Alkhamees, A.A., & Mohd Farid Woo, M.E. (2016). Drill string dynamic: Improving the drilling performance by study the resonance of the experimental drill string system using 2 contact points of friction force of breaking system. *7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, pp. 175–179. [https://doi.org/ 10.1109/ICMAE.2016.7549530](https://doi.org/10.1109/ICMAE.2016.7549530).
134. Xu, Y., Zhang, H., & Guan, Z. (2021). Dynamic characteristics of downhole bit load and analysis of conversion efficiency of drill string vibration energy. *Energies*, 14(1), 229. [https://doi.org/ 10.3390/en14010229](https://doi.org/10.3390/en14010229).
135. Ghasemloonia, A., Rideout, D. Geoff., & Butt, Stephen D. (2015). A review of drillstring vibration modeling and suppression methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 131, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.030>.
136. Oktav, A. (2017). Advances in Noise and Vibration Analysis. In H. Arapgirlioğlu, R. L. Elliott, E. Turgeon, & A. Atik (Eds.) *Researches on science and art in 21st century Turkey*. Chap. 332, pp. 2988–2998. Gece Kitaplığı. https://www.researchgate.net/publication/321621659_Advances_in_Noise_and_Vibration_Analysis.
137. Morkun V., Morkun N., & Pikilniak A. (2019). *The Propagation of Ultrasonic Waves in Gas-containing Suspensions*. Cambridge Scholars Publishing.
138. Flegner, P., Kačur, J., Durdán, M., & Laciak, M. (2022). Evaluation of the Acceleration Vibration Signal for Aggregates of the Horizontal Drilling Stand. *Applied Sciences*, 12(8), 3984. <https://doi.org/10.3390/app12083984>.
139. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Шашкіна, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). Частотно-часовий аналіз віброакустичного сигналу бурової установки в процесі буріння свердловин, с. 254. *Міжнародна науково-технічна конференція*

«Розвиток промисловості та суспільства», Кривий Ріг, Криворізький національний університет.

140. Babak, V., Beregun, V., & Krasilnikov, A. Methods and means of vibrodiagnostics of units of cogeneration installations. *Special Issue of e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT)*, 22(11). <http://www.ndt.net/?id=21640>.

141. Бабак, С.В., Мислович, М.В., & Сисак, Р.М. (2015). *Статистична діагностика електротехнічного устаткування*. Ін-т електродинаміки НАН України. Київ.

142. Яворський, І.М. (2013). *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. ФМІ НАНУ, Львів.

143. Cobern, Martin E. (2003). Downhole vibration monitoring & control system. *Quarterly technical report #1. Starting date: October 1, 2002, Ending Date: December 31, 2002*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/822318>.

144. Егамбердієв, І.П. (2019). *Методи оцінки технічного стану бурових верстатів*. вид-во ім. Алішер Навої, Навої.

145. Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (1993). *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. Wiley-Interscience.

146. Jia, G., Guo, F., Wu, Z., Cui, S., & Yang, J. (2023). A noise reduction method for multiple signals combining computed order tracking based on chirplet path pursuit and distributed compressed sensing. *Structural Durability & Health Monitoring*, 17(5), 383-405. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2023.026885>.

147. Wang, K. S., & Heyns, P. S. (2011). Application of computed order tracking, Vold-Kalman filtering and EMD in rotating machine vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 416-430. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.09.003>.

148. Wang, T., Zhang, L., Qiao, H., & Wang, P. (2020). Fault diagnosis of rotating machinery under time-varying speed based on order tracking and deep learning. *Journal of Vibroengineering*, 22(2), 366–382. <https://doi:10.21595/jve.2019.20784>.

149. Borghesani, P., Pennacchi, S., Chatterton, R., & Ricci R. (2014). The velocity synchronous discrete Fourier transform for order tracking in the field of rotating

- machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 44(1–2), 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.03.026>.
150. Brandt, A. (2011). *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. Retrieved from <http://surl.li/tyves>.
151. Order-RPM map for order analysis. MATLAB. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/signal/ref/rpmordermap.html>.
152. Liu, Q., Zhou, B., Chen, F., Li, N., Xie, J., Zhao, M., Di, Q., Feng, C., Song, S., & Yin, C. (2023). Optimal design and nonlinear dynamic characteristics of titanium /steel drill pipe composite drill string for ultra-deep drilling. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47156-y>.
151. Zafarian, H., Ameri, M. J., & Dolatyari, A. (2024). Development of a rock-bit interaction analytical model by considering the in-situ stresses for a bottom-hole element. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56177-0>.
152. Bobrov, Y. (2022). Energy-saving computer-integrated drilling technology. *5th International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources»*, p. 176–178. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing,
153. Poletto, F. (2005). Energy balance of a drill-bit seismic source, part 1: Rotary energy and radiation properties. *Geophysics*, 70(2), T13–T28. <https://doi.org/10.1190/1.1897038>.
154. Simon, R. (1963). Energy balance in rock drilling. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3(04), 298–306. <https://doi.org/10.2118/499-pa>.
155. Thuro, K. (1997). Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. *Geologische Rundschau*, 86(2), 426. <https://doi.org/10.1007/s005310050151>.
156. Khoshouei, M., Bagherpour, R., & Yari, M. (2024). A smart look at monitoring while drilling (MWD) and optimizing using acoustic emission technique (AET). *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70717-8>.

157. Цокурєнко, О.О. (1998). *Інформаційно-обчислювальний комплекс та обернені завдання*. Наукова думка, Київ.
158. Моркун, В.С., Цокурєнко, О.О., & Луценко, І.А. (2005). *Адаптивні системи оптимального керування технологічними процесами*. Мінерал, Кривий Ріг.
159. Shangxin, F., Yujie, W., Guolai, Z., Yufei, Z., Shanyong, W., Ruilang, C., & Enshang, X. (2020). Estimation of optimal drilling efficiency and rock strength by using controllable drilling parameters in rotary non-percussive drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 193, 107376. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107376>.
160. Pessier, R. C., & Fear, M. J. (1992). Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a Bit-Specific coefficient of sliding friction. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/24584-ms>.
161. Chen, X., Fan, H., Guo, B., Gao, D., Wei, H., & Ye, Z. (2014). Real-Time prediction and optimization of drilling performance based on a new mechanical specific energy model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(11), 8221–8231. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1376-0>.
162. Chen, X., Yang, J., & Gao, D. (2018). Drilling performance optimization based on mechanical specific energy technologies. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75827>.
163. Amadi, K., & Iyalla, I. (2012). Application of mechanical specific energy techniques in reducing drilling cost in deepwater development. *SPE Deepwater Drilling and Completions Conference*, June 2012. <https://doi.org/10.2118/156370-ms>.
164. Перегудов, В.В. (2007). *Аналіз впливу вибухових робіт з використанням емоніту на якість підготовки залізняку для переробки на рудозбагачувальній фабриці*. Звіт з НДР. Криворізький технічний університет.
165. Lakshminarayana, C. R., Tripathi, A. K., & Pal, S. K. (2021). Experimental investigation on potential use of drilling parameters to quantify rock strength. *International Journal of Geo-Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00152-5>.

166. Yarali, O., & Soyer, E. (2012). Assessment of relationships between drilling rate index and mechanical properties of rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.08.010>.
167. Nazir, R., Momeni, E., Armaghani, D. J., & Amin, M. F. M. (2013). Correlation between unconfined compressive strength and indirect tensile strength of limestone rock samples. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1737–1746. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Ramli_Nazir/publication/258038944_Correlation_between_unconfined_compressive_strength_and_indirect_tensile_strength_of_limestone_rock_samples/links/55c340f808aea2d9bdc006e1.pdf?inViewer=true&disableCoverPage=true&origin=publication_detail.
168. Kolapo, P. (2020). Investigating the effects of mechanical properties of rocks on specific energy and penetration rate of borehole drilling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(2), 1715–1726. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01577-y>.
169. Alam, K., Mitrofanov, A., & Silberschmidt, V. (2010). Experimental investigations of forces and torque in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone. *Medical Engineering & Physics*, 33(2), 234–239. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.10.003>.
170. Chugh, C. P. (1992). *High technology in drilling and exploration*. <https://www.amazon.com/High-Technology-Drilling-Exploration-Chugh/dp/9061914779>.
171. Yu, T., Li, X., Zhang, H., Duan, C., Zeng, H., & Agila, W. (2022). Nonlinear analysis of axial-torsional vibration of drill string based on a 3 DOF model. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(6), 168781322211077. <https://doi.org/10.1177/1687813222110778>.
172. Spanos, P. D., Sengupta, A. K., Cunningham, R. A., & Paslay, P. R. (1995). Modeling of roller cone bit Lift-Off dynamics in rotary drilling. *Journal of Energy Resources Technology*, 117(3), 197–207. <https://doi.org/10.1115/1.2835341>.

173. De Moraes, L. P., & Savi, M. A. (2018). Drill-string vibration analysis considering an axial-torsional-lateral nonsmooth model. *Journal of Sound and Vibration*, 438, 220–237. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.054>.
174. Liu, X., Vljajic, N., Long, X., Meng, G., & Balachandran, B. (2012). Nonlinear motions of a flexible rotor with a drill bit: stick-slip and delay effects. *Nonlinear Dynamics*, 72(1–2), 61–77. <https://doi.org/10.1007/s11071-012-0690-x>.
175. Hosseinzadeh, A., & Bakhtiari-Nejad, F. (2017). A new dynamic model of coupled Axial–Torsional vibration of a drill string for investigation on the length increment effect on Stick–Slip instability. *Journal of Vibration and Acoustics*, 139(6). <https://doi.org/10.1115/1.4037299>.
176. Choudhury, S. M. a. A., Shah, S. L., & Thornhill, N. F. (2008). Measures of Nonlinearity – a review. *Advances in Industrial Control*, 69–75. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79224-6_5.
177. Libraries and Blocksets. MATLAB. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/simulink/libraries.html>.
178. THD. MATLAB. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/thd.html>.
179. RMS. MATLAB. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/rms.html>.
180. Distortion Measurements. MATLAB. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/signal/ug/distortion-measurements.html>
181. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2023). Застосування нелінійних ультразвукових методів для визначення характеристик залізорудної сировини. *Гірничий вісник*, 1(57), 144–151.
182. Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Моркун, В. С. (2023). Комп'ютерно-інтегровані технології контролю та керування буровими роботами у залізорудному кар'єрі. *XIII Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молоді вчені 2023 - від теорії до практики»*, с. 138–140. Дніпро, Журфонд.

183. Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., & Bejari, H. (2009). Application of fuzzy set Theory to rock Engineering Classification Systems: An illustration of the Rock Mass Excavability Index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(3), 335–350. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0029-1>.
184. Моркун, В. С., & Бобров, Є. Ю. (2025). Модельно-прогнозуюче керування буровою установкою. *XVIII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація» - 2025*, с. 444–445. Одеса, Одеський національний технологічний університет.
185. Žak, S. (2016). An Introduction to Proportional-Integral-Derivative (PID) Controllers. In *ECE 382*. School of Electrical and Computer Engineering. Retrieved from https://engineering.purdue.edu/~zak/ECE_382-Fall_2018/IntroPID_16.pdf.
186. Wang, H., Wen, C., Chiu, Y., Lee, I., Kao, H., Lee, I., & Ho, W. (2013). *Leuconostoc mesenteroides* growth in food products: Prediction and sensitivity analysis by Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems. *PLoS ONE*, 8(5), e64995. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064995>.
187. Lo, S. (2003). An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3), 665–675. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00687-3](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00687-3).
188. Ertunc, H. M., & Hosoz, M. (2008). Comparative analysis of an evaporative condenser using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *International Journal of Refrigeration*, 31(8), 1426–1436. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.03.007>.
189. Haznedar, B., Bayraktar, R., Yayla, M., & Demirkol, M. D. (2020). Training of ANFIS with simulated annealing algorithm on flexural buckling load prediction of aluminium alloy columns. *New Trends and Issues Proceedings on Advances Pure and Applied Sciences*, 12, 15–23. <https://doi.org/10.18844/gjpaas.v0i12.4982>.
190. Haznedar, B., & Kalinli, A. (2018). Training ANFIS structure using simulated annealing algorithm for dynamic systems identification. *Neurocomputing*, 302, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.04.006>.

191. Jang, J., & Sun, N. C. (1995). Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceedings of the IEEE*, 83(3), 378–406. <https://doi.org/10.1109/5.364486>.
192. Tian, Y., Cheng, R., Zhang, X., & Jin, Y. (2017). PLATEMO: A MATLAB platform for Evolutionary Multi-Objective Optimization [Educational Forum]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 12(4), 73–87. <https://doi.org/10.1109/mci.2017.2742868>.
193. Cazacu, R., & Grama, L. (2014). Steel truss optimization using genetic algorithms and FEA. *Procedia Technology*, 12, 339–346. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.496>.
194. Ozturk, A. C., Haznedar, H., Haznedar, B., Ilgan, S., Erogul, O., & Kalinli, A. (2023). Differentiation of Benign and Malignant Thyroid Nodules with ANFIS by Using Genetic Algorithm and Proposing a Novel CAD-Based Risk Stratification System of Thyroid Nodules. *Diagnostics*, 13(4), 740. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13040740>.
195. Dunn, J. C. (1973). A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting Compact Well-Separated clusters. *Journal of Cybernetics*, 3(3), 32–57. <https://doi.org/10.1080/01969727308546046>.
196. Bezdek, J. C. (1981). Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0450-1>.
197. Bataineh, K. M., Naji, M. & Saqer, M. (2011). A Comparison Study between Various Fuzzy Clustering Algorithms. In *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 5(4), 335–343. <https://jjmie.hu.edu.jo/files/v5n4/JJMIE-230-09.pdf>.
198. Coutinho, J. P., Santos, L. O., & Reis, M. S. (2023). Bayesian Optimization for automatic tuning of digital multi-loop PID controllers. *Computers & Chemical Engineering*, 173, 108211. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108211>.
199. Luyben, W. L. (1986). Simple method for tuning SISO controllers in multivariable systems. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(3), 654–660. <https://doi.org/10.1021/i200034a010>.

200. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2005). *Advanced PID control*. Retrieved from <http://www.dia.uned.es/proyectos/dpi2004-01804/documents/revistas/Revista12.pdf>.
201. Lee, D., Lee, M., Lee, Y., & Park, S. (2001). Multiloop PID controllers tuning for desired closed loop responses. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(25), 407–413. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)33858-2](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)33858-2).
202. Dittmar, R. (2019). Model Predictive Control mit MATLAB und Simulink - Model Predictive Control with MATLAB and Simulink. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86001>.
203. Turevskiy, A. (2024). PID Controller Design for a DC Motor. Retrieved from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26275-pid-controller-design-for-a-dc-motor>.
204. DC Motor Speed: PID Controller Design. CONTROL TUTORIALS. FOR MATLAB & SIMULINK Retrieved from <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=ControlPID>.
205. Harmse, M., & Dittmar, R. (2009). Robuste Einstellung dezentraler PID-Regler in einer Mehrgrößenumgebung. *Automatisierungstechnische Praxis*, 51(12), 68-78.
206. Lee, Y., Park, S., Lee, M., & Brosilow, C. (1998). PID controller tuning for desired closed-loop responses for SI/SO systems. *AIChE Journal*, 44(1), 106–115. <https://doi.org/10.1002/aic.690440112>.
207. Lee, Y., Park, S., & Lee, M. (1998). PID controller tuning to obtain desired Closed-Loop responses for cascade control systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(11), 613–618. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)44994-9](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)44994-9).
208. Edgar, T., Heeb, R., & Hougen, J. (1981). Computer-aided process control system design using interactive graphics. *Computers & Chemical Engineering*, 5(4), 225–232. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(81\)87015-9](https://doi.org/10.1016/0098-1354(81)87015-9).
209. Model Predictive Control Toolbox. MATLAB. Design and simulate model predictive controllers. Retrieved from <https://se.mathworks.com/products/model-predictive-control.html>.

210. Balbis, L., Katebi, R. & Ordys, A. (2006). Model predictive control design for industrial applications. *University of Strathclyde*.
<https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/10158523/fl158.pdf>.
211. Controller State Estimation. MATLAB. Retrieved from
<https://se.mathworks.com/help/mpc/ug/controller-state-estimation.html>.
212. Dittmar, R. (2017). Modellbasierte prädiktive Regelung (MPC) und Softsensoren. In: *Früh K, Maier U, Schaudel D, editors. Handbuch der Prozessautomatisierung, 6th ed.* München, Deutscher Industrieverlag, pp. 894-918.
213. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Касаткіна І. В. (2022). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві із феромагнітних порід* (Патент України № 151805). Державна служба інтелектуальної власності України.
214. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Веснін, А. В. (2022). *Спосіб визначення характеристик феромагнітних гірських порід в процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 151807). Державна служба інтелектуальної власності України.
215. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Грищенко С. М. (2022). *Спосіб автоматичного контролю характеристик феромагнітних гірських порід в процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 151844). Державна служба інтелектуальної власності України.
216. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Сулима Т. С. (2022). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві з феромагнітних порід* (Патент України № 151847). Державна служба інтелектуальної власності України.

Додато А

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО»**

36007, м. Полтава, вул. Маршала Бірюзова 66А ЄДРПОУ 40466017,
ІПН404660116010, р/рUA363510050000026008611912500
в АТ «УкрСиббанк» МФО 351005

**Довідка
про використання результатів дисертаційної роботи
Боброва Євгена Юрійовича
«Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному
кар'єрі»
ТОВ «ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО»**

м. Полтава

При виконанні бурових робіт у залізорудному кар'єрі із застосуванням дослідно-промислової бурової установки ТОВ «ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО» виконана експериментальна апробація системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин, запропонованої у дисертаційній роботі Є.Ю. Боброва.

Виконано наступні роботи:

- для реалізації процедури розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди використана адаптивна нейро-нечітка система ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), оптимізована із застосуванням генетичного алгоритму (GA) з попередньою нечіткою кластеризацією методом Fuzzy C-means (FCM) результатів вимірювань робочих параметрів бурової установки;
- у якості інформативних ознак, що застосовані у системі розпізнавання, використані кінематичні та енергетичні параметри бурової установки, а саме швидкість проходки, навантаження на долото та швидкість його обертання, тиск повітря у системі очистки свердловин від шламу, споживана питома механічна енергія, середньоквадратичне значення амплітуди та гармонійне спотворення сигналу вібрації долота;
- у наборі експериментальних даних, що використані для тренування та назначання системи розпізнавання виділено 7 мінералогічних різновидів залізної руди: 1 – магнетитові роговики; 2 – силікат-карбонат-магнетитові роговики; 3 – червоносмугасті магнетитові та гематит-магнетитові роговики; 4 – напівокислені та окислені роговики; 5 – силікатні сланці, безрудні роговики та кварці; 6 – магнетит-силікат-карбонатні (бідні) роговики; 7 – гематит-магнетитові роговики;
- використана структура дворівневого керування буровою установкою, відповідно до якій на нижньому рівні застосовуються пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) контролери для регулювання основних змінних процесу буріння, а на верхньому – модельно-прогнозуючий контролер (МПК) для динамічного корегування заданих значень регульованих змінних контурів нижнього рівня.

Експериментальна експлуатація установки відбувалась на ділянці родовища, що складається з 7 мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Середня точність розпізнавання мінералого-технологічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища із застосуванням алгоритму ANFIS становить 85,1%, а модифікованого ANFIS+GA – 92,4%. Застосування попередньої кластеризації даних в алгоритмі ANFIS+GA за допомогою методу Fuzzy C-means покращує точність на 0,2-0,3% та зменшує час на отримання результатів на 7-8%.

Застосування каскадної схеми керування на базі MPC контролера зменшило час перехідних процесів в системі у середньому на 12-15% при величині перерегулювання, яке не перевищувало 1,2 значення швидкості проходки, визначеного оптимальним щодо отриманій оцінці мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Своєчасна оцінка фізико-механічних властивостей гірської породи та оперативне налаштування за допомогою MPC керування робочих режимів бурової установки дозволило зменшити її питоме енергоспоживання на 8-11%.

Директор



О.Ю. Кваша

Додаток Б

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО»**

36007, м. Полтава, вул. Маршала Бірюзова 66А ЄДРПОУ 40466017,
ІПН404660116010, р/рUA363510050000026008611912500
в АТ «УкрСиббанк» МФО 351005

лист № 01-10-25
від 22.10.2025 р.

Пану Боброву Євгену Юрійовичу

Довідка

про результати експериментальних випробувань науково-технічних рішень, розроблених в
дисертаційній роботі Боброва Євгена Юрійовича
«Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному
кар'єрі»

м. Полтава

При виконанні бурових робіт в залізорудному кар'єрі із застосуванням дослідно-промислової бурової установки ТОВ «ПОЛТАВСЬКЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО» виконано експериментальні випробування науково-технічних рішень, які розроблені в дисертаційній роботі Боброва Євгена Юрійовича.

Зокрема, досліджено:

метод визначення робочих режимів процесу буріння на основі нечіткої кластеризації вимірюваних параметрів бурової установки;

метод автоматизованого керування процесом буріння свердловин із застосуванням модельно-прогнозуючого контролера (МПК) для безпосереднього керування буровою установкою.

Отримано наступні результати:

1. Метод нечіткої кластеризації FCM (метод нечітких середніх) застосований для виділення трьох робочих режимів процесу буріння: R1- початкова фаза; R2 - фаза ефективного буріння; R3 - фаза неефективного буріння.

Для реалізації зазначеної процедури кластеризації обрано наступні змінні: x_1 - швидкість проходки (ROP); x_2 - швидкість обертання долота (RPM); x_3 - вага на долоті (WOB); x_4 - амплітуда вібрації долота (A); x_5 - похідна від ROP (dROP); та параметр нелінійності вібрації x_6 - (THD).

Параметри $x_1 - x_4$ є вимірюваними змінними, x_5 та x_6 обчислюються за результатами вимірювань.

Застосований метод використовує мінімізацію зваженої суми квадратів відстаней вимірюваних значень аналізованих змінних у межах класу

$$J(U, v_1, \dots, v_K) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K (u_{ik})^m d^2(x_i, v_k), \quad (1)$$

де $v_k = (v_{ka})$, $k = 1, \dots, K$, $a = 1, \dots, p$ - значення центроїда кластера k ; $x_i = (x_{ia})$, $i = 1, \dots, n$, $a = 1, \dots, p$ - i -й об'єкт відносно p змінних; $d^2(x_i, v_k)$ - квадрат евклідової відстані між x_i та v_k ; m - параметр ступеня нечіткості кластеризації.

Метою цієї процедури є отримання розв'язків U та $v_1, \dots, v_K$, які мінімізують рівняння (1). Для отримання рішення використовуються вирази

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{l=1}^K \{d(x_i, v_k)/d(x_i, v_l)\}^{\frac{2}{m-1}}}; \quad (2)$$

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^n (u_{ik})^m x_i}{\sum_{i=1}^n (u_{ik})^m}, \quad (3)$$

де $i = 1, \dots, n$; $k = 1, \dots, K$.

Для очищення результатів вимірювань $X(t)$, тобто $x_1 - x_4$, від збурень і завад корисна складова $Z(t)$ в цих сигналах представлена у вигляді

$$Z(t) = \sum_{k=0}^m a_k F_k(t), \quad (4)$$

де a_k - дійсні коефіцієнти; $F_k(t)$ - лінійно незалежні функції.

У якості F_k обрано ортогональні многочлени Чебишева дискретної змінної. У цьому випадку незміщена оцінка коефіцієнтів a_k визначається виразом

$$a_k = \frac{(X, F_k)}{(F_k, F_k)}, \quad (5)$$

де $(X, F_k) = \sum_{i=0}^N X(iT) F_k(i)$; $(F_k, F_k) = \sum_{i=0}^N F_k^2(i)$.

Для обчислення x_5 (похідної дискретної змінної x_1) за часом використане рівняння

$$x_5(t) = K \frac{x_1(t_n) - x_1(t_{n-1})}{T}, \quad (6)$$

де $x_1(t_n)$ та $x_1(t_{n-1})$ - значення ROP на поточному та попередньому кроці часу відповідно; K - коефіцієнт масштабування; T - дискретний крок часу.

За результатами експериментальних досліджень отримано наступні показники якості кластеризації: Partition Coefficient PC = 0.713; Separation Index S = 0,005; Classification Entropy CE = 0.691. Проведений аналіз результатів кластеризації доводить, що застосований підхід та обраний набір параметрів дозволяють з довірчою ймовірністю 0,94 визначити фази процесу буріння.

2. Визначено результати використання модельно-прогнозуючого контролера у системі автоматизованого керування (САК) буровою установкою для безпосереднього керування процесом. Для порівняння використана базова структура, що включає три замкнуті контури на основі пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерів для регулювання основних змінних процесу: швидкості обертання долота RPM, навантаження на долото WOB та продуктивності системи очистки свердловини.

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що використання МРК контролера безпосередньо у контурі керування буровою установкою у порівнянні з базовою структурою на основі ПІД регуляторів дозволяє зменшити у середньому на 17 % час перехідних процесів в системі та підвищити якість регулювання швидкості проходки свердловин.

Отримані результати є основою для формування оптимального керування буровою установкою для досягнення максимально можливої швидкості проходки ROP для існуючих в даний момент умов (фізико-механічні характеристики і структурно-текстурні властивості середовища, що буриться, та технічний стан бурового обладнання).

3 повагою,
Директор ТОВ «ПНВП»




Кваша Олег

Додаток В



Товариство з обмеженою відповідальністю
«МЕТБЛАСТ»

50065, Україна, Дніпропетровська обл.,
 м. Кривий Ріг, вул. Матусевича Віталія, буд. 35, оф. 151
 Код ЄДРПОУ 44897816, ІПН 448978104845
 р/р UA263052990000026001010407123 в АТ КБ «ПриватБанк»,
 МФО 305299
 Тел.+38 (096) 329 51 61, E-mail: METBLASTLLC@GMAIL.COM

Довідка

про апробацію результатів дисертаційної роботи
 Боброва Євгена Юрійовича

«Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин
 в залізорудному кар'єрі» у виробничому процесі ТОВ «МЕТБЛАСТ»

м. Кривий Ріг

У виробничому процесі ТОВ «МЕТБЛАСТ» виконана апробація результатів дисертаційної роботи Боброва Євгена Юрійовича «Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі», зокрема:

- запропонована комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт в залізорудному кар'єрі використана для визначення мінералогічних різновидів залізної руди;
- результати розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди використані при реалізації процедури формування заряду вибухової речовини та технології його підривання у вибухових свердловинах.

За результатами апробації встановлено, що запропонована комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі дозволяє:

- сформувані банк даних мінералогічних різновидів залізної руди родовища, що розробляється, із застосуванням результатів вимірювань кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки та адаптивної нейро-нечіткої системи для їх класифікації;
- виконати мінералогічний опис пробуреної свердловини по її глибині за результатами співставлення вимірювань під час буріння технологічних (вибухових) свердловин експлуатаційних параметрів бурової установки з ознаками мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища із сформованого банку даних;
- використати інформацію про мінералогічний опис пробуреної свердловини по її глибині при визначення конструкції і параметрів заряду вибухової речовини, та технології його підривання.

Висновки

Запропонована у дисертаційній роботі Боброва Євгена Юрійовича комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі завдяки оперативному визначенню мінералогічного складу гірської породи по глибині пробуреної свердловини дозволяє:

- зменшити на 5-7% масу вибухової речовини при виконанні вибухових робіт;
- керувати гранулометричним складом підірваної гірської маси шляхом корегування конструкції вибухового заряду та технології його підривання у відповідності до визначеного мінералогічного складу гірської породи.

Директор ТОВ «МЕТБЛАСТ»



Анастасія ТРЮХАН

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Криворізького Національного
університету



Владислав ЧУБАРОВ

«26» травня 2016р.

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи

Боброва Євгена Юрійовича

«Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в
залізорудному кар'єрі»

у навчальному процесі Криворізького національного університету

Ми що нижче підписалися, декан факультету інформаційних технологій, канд. техн. наук, доц. Музика І.О., завідувач навчально-методичного відділу Івашура С.Л., зав. кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій, канд. техн. наук, доц. Рубан С.А., склали цю довідку про те, що в навчальному процесі Криворізького національного університету для студентів спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології і робототехніка» використовуються результати дисертаційної роботи аспіранта Боброва Є.Ю. «Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі», а саме: теоретичне обґрунтування, алгоритми, програми та опис технічної реалізації адаптивної нейро-нечіткої системи розпізнавання образів технічних об'єктів, оптимізованої із застосуванням генетичного алгоритму та попередньою нечіткою кластеризацією їх характеристикних ознак.

Вищезазначені матеріали знайшли відображення в лекційному курсі «Інтелектуальні системи керування», а також використовуються при проведенні практичних занять та виконанні лабораторних робіт із зазначеної дисципліни.

Декан ФІТ

Завідувач НМВ

Завідувач кафедри АКНТ

Іван МУЗИКА

Світлана ІВАШУРА

Сергій РУБАН

Додаток Д

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи

Боброва Євгена Юрійовича

«Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі» в навчальному процесі Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

м. Київ

В навчальному процесі Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля використовуються результати дисертаційної роботи аспіранта Боброва Євгена Юрійовича «Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі», а саме: теоретичне обґрунтування, алгоритми, програми та технічна реалізація каскадного модельно-прогнозуючого керування енергоємними технологічними процесами та адаптивної нейро-нечіткої системи розпізнавання образів технічних об'єктів, оптимізованої із застосуванням генетичного алгоритму та попередньою нечіткою кластеризацією їх характеристичних ознак.

Вищезазначені матеріали знайшли відображення в лекційних курсах, а також використовуються при проведенні практичних занять та виконанні лабораторних робіт.

Ректор Східноукраїнського
національного університету
імені Володимира Даля,
доктор техн. наук, професор



О.В. Поркуян

Олександр Поркуян
Засвідчено
Засвідчено
Засвідчено

Додаток Е

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи

Боброва Євгена Юрійовича

«Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі» в навчальному процесі Львівського національного університету ім. Івана Франка

м. Львів

23.06.2025

У навчальному процесі Львівського національного університету ім. Івана Франка використані результати дисертаційної роботи, присвяченої розробці автоматизованих енергозберігаючих систем керування для технологічних процесів у гірничій промисловості.

Зокрема, застосовуються:

- теоретичні положення щодо побудови каскадних модельно-прогнозуючих систем, які дозволяють здійснювати випереджальне керування параметрами енергосмних процесів на основі математичних моделей;
- алгоритми адаптивного керування із застосуванням нейро-нечітких систем, які забезпечують стійкість і ефективність керування за умов неповної або змінної інформації;
- програмні модулі для розпізнавання образів технічних об'єктів, оптимізовані за допомогою генетичних алгоритмів та методів нечіткої кластеризації, що дозволяє підвищити точність і швидкодію систем технічної діагностики.

Вказані результати впроваджені в навчальний процес факультету прикладної математики та факультету електроніки. Вони використовуються при підготовці лекційних матеріалів, а також у рамках практичних і лабораторних занять, де студенти:

- аналізують принципи побудови та функціонування систем керування для реальних технічних об'єктів;

- будують алгоритми оптимізації і класифікації з використанням сучасних обчислювальних методів;
- реалізують фрагменти систем керування в середовищах MATLAB/Simulink, Python тощо;
- проводять експериментальні дослідження ефективності адаптивних та інтелектуальних систем в умовах наближених до промислових.

Використання зазначених матеріалів у навчальному процесі сприяє розвитку у студентів здатності до системного мислення, навичок проектування, програмної реалізації та аналітичного оцінювання сучасних автоматизованих систем, що відповідають потребам промислової автоматизації та цифровізації.

Проректор з науково-педагогічної
роботи та інформатизації
Львівського національного
університету імені Івана Франка,
доцент кафедри прикладної
математики



В.М. Кухарський

Додаток Ж

Список публікацій, в яких наведено основні наукові результати дисертації

Монографії:

1. Morkun, N., Bobrov, Y., & Hryshchenko, Y. (2025). *Improving the efficiency of iron ore mining and processing*. LAMBERT Academic Publishing.
2. Моркун, В., Моркун, Н., Грищенко, С., Бобров, Є., & Грищенко, Я. (2025). *Підвищення ефективності процесів гірничого виробництва на основі комп'ютерно-інтегрованих технологій*. ФОП Вольф І.Є. Київ.

Статті в наукових періодичних виданнях, які входять до переліку міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science:

3. Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, Y. Y., & Haponenko, A. A. (2024). Modeling of drilling tool vibration in the process of drilling blast wells. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 12–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/012>.
4. Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. (2024). Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 1–8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
5. Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Bobrov, E. Y., & Haponenko, I. A. (2025). Determination of the harmonic distortion value of vibroacoustic signals in the process of drilling operations. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 88–95. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/088>.
6. Моркун, В.С., Моркун, Н.В., Бобров, Є.Ю., Грищенко, Я.О. (2026). Модельно-прогнозуюче керування процесом буріння свердловин. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 13-21.

Статті в наукових періодичних фахових виданнях категорії Б:

7. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2023). Моделювання процесів гірничого виробництва із застосуванням характеристик

акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії. *Вісник Криворізького національного університету*, 1(21), 78–86.

<https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-78-86>.

8. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2023). Застосування нелінійних ультразвукових методів для визначення характеристик залізорудної сировини. *Гірничий вісник*, 1(57), 144–151.

9. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Поркуян, О. В., Грищенко, С. М., Бобров, Є. Ю., & Грищенко, Я. О. (2024). Визначення параметрів вібрації бурової установки із використанням методу відстеження порядку обертових машин. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 5 (285), 50–58. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-50-58>.

10. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Шашкіна, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). Методи аналізу вібрації та акустичної емісії бурової установки в процесі буріння свердловин. *Гірничий вісник*, 1(58), 144–153. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2024-1-112-144-153>.

11. Моркун, В., Моркун, Н., Бобров, Є., & Грищенко, Я. (2025). Моделювання багатоконтурної системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин на основі ПД контролерів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 5 (291), 45–52. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-45-52>.

12. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Бобров, Є. Ю., & Грищенко, Я. О. (2025). Моделювання механізму взаємодії бурового долота з гірською породою. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 8 (294), 45–51. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-45-51>.

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

13. Bobrov, Y. (2022). Energy-saving computer-integrated drilling technology. *5th International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources»*, p. 176–178. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing,

14. Бобров, Є. Ю. (2023). Вібраційний аналіз процесу буріння свердловин. *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*, с. 240. Кривий Ріг, Криворізький національний університет.
15. Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Моркун, В. С. (2023). Комп'ютерно-інтегровані технології контролю та керування буровими роботами у залізорудному кар'єрі. *XIII Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молоді вчені 2023 - від теорії до практики»*, с. 138–140. Дніпро, Журфонд.
16. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Шашкіна, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). Частотно-часовий аналіз віброакустичного сигналу бурової установки в процесі буріння свердловин, с. 254. *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*, Кривий Ріг, Криворізький національний університет.
17. Моркун, В. С., & Бобров, Є. Ю. (2025). Модельно-прогнозуюче керування буровою установкою. *XVIII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація» - 2025*, с. 444–445. Одеса, Одеський національний технологічний університет.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації

18. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Тронь, В. В., Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Гапоненко, І. А. (2023). Підвищення ефективності процесів гірничого виробництва на основі ультразвукових технологій. Видавництво Сінельніков Д.А., Кривий Ріг.
19. Morkun, V. S., Morkun, N. V., Hryshchenko, S. M., Shashkina, A. A., & Bobrov, E. Y. (2024). General principles of formalization of technological process control of mining production in a dynamic distributed system. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 4, 210–221. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-4-20>.
20. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Касаткіна І. В. (2022). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в*

гірському масиві із феромагнітних порід (Патент України № 151805). Державна служба інтелектуальної власності України.

21. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Веснін, А. В. (2022). *Спосіб визначення характеристик феромагнітних гірських порід в процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 151807). Державна служба інтелектуальної власності України.

22. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Грищенко С. М. (2022). *Спосіб автоматичного контролю характеристик феромагнітних гірських порід в процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 151844). Державна служба інтелектуальної власності України.

23. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., & Бобров, Є. Ю. (2022). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві* (Патент України № 151846). Державна служба інтелектуальної власності України.

24. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., Гапоненко, І. А., Бобров, Є. Ю., & Сулима Т. С. (2022). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві з феромагнітних порід* (Патент України № 151847). Державна служба інтелектуальної власності України.

25. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Гапоненко, А. А., & Бобров, Є. Ю. (2024). *Спосіб визначення характеристик феромагнітних гірських порід у процесі буріння свердловин у гірському масиві* (Патент України № 156662). Державна служба інтелектуальної власності України.

26. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., Грищенко, С. М., Бобров, Є. Ю., Гапоненко, А. А., & Гапоненко І. А. (2024). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві з феромагнітних порід* (Патент України № 156663). Державна служба інтелектуальної власності України.

27. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., & Бобров, Є. Ю. (2025). *Спосіб визначення характеристик гірських порід в процесі буріння свердловин в гірському масиві*

(Патент України № 158801). Державна служба інтелектуальної власності України.

28. Моркун, В. С., Моркун, Н. В., & Бобров, Є. Ю. (2025). *Спосіб керування процесом буріння свердловин в гірському масиві* (Патент України № 158802). Державна служба інтелектуальної власності України.