

## **Висновок**

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі» здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії за спеціальністю 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування Боброва Євгена Юрійовича**

### **1. Актуальність теми дисертації**

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.

#### **1.1 Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри**

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 вихрострумовевого 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»

## **1.2 Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів**

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 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 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 залізрудному 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.

Дисертаційна робота виконана під керівництвом доктора технічних наук, професора Моркуна В.С. Робота є результатом самостійних досліджень Боброва Є.Ю. і полягає в самостійному виконанні теоретичної й аналітичної частин роботи, а також інтерпретації отриманих результатів.

## **1.3 Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій**

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 у мовах неповної на 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.

#### **1.4 Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру**

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%.

## 1.5 Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

### Монографії:

- [1] Morkun, N., Bobrov, Y., & Hryshchenko, Y. Improving the efficiency of iron ore mining and processing. LAMBERT Academic Publishing, 2025
- [2] Моркун В., Моркун Н., Грищенко С., Бобров Є., & Грищенко Я. Підвищення ефективності процесів гірничого виробництва на основі комп'ютерно-інтегрованих технологій : монографія. Київ : ФОП Вольф І.Є., 2025.

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. URL : <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. URL : <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. URL : <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/088>.
- [6] Моркун, В.С., Моркун, Н.В., Бобров, Є.Ю., Грищенко, Я.О. Модельно-прогнозуюче керування процесом буріння свердловин. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 2026. С.13-21.

### Статті в наукових періодичних фахових виданнях категорії Б:

- [7] Моркун В. С., Моркун Н. В., Гапоненко А. А., & Бобров Є. Ю. Моделювання процесів гірничого виробництва із застосуванням характеристик акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії. *Вісник Криворізького національного університету*, 1(21). Кривий Ріг: 2023. С.78–86. URL : <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. Застосування нелінійних ультразвукових методів для визначення характеристик залізорудної сировини. *Гірничий вісник*, 1(57), Кривий Ріг, 2023. С.144–151.
- [9] Моркун В. С., Моркун Н. В., Поркуян О. В., Грищенко С. М., Бобров Є. Ю., & Грищенко Я. О. Визначення параметрів вібрації бурової установки із використанням методу відстеження порядку обертових машин. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 5 (285), 2024. С.50–58. URL : <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. Методи аналізу вібрації та акустичної емісії бурової установки в процесі буріння свердловин. *Гірничий вісник*, 1(58), Кривий Ріг, 2024. С.144–153. URL : <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2024-1-112-144-153>.
- [11] Моркун, В., Моркун, Н., Бобров, Є., & Грищенко, Я. Моделювання багатоконтурної системи автоматизованого керування процесом буріння свердловин на основі ПІД контролерів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 5 (291), 2025. С.45–52. URL : <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. Моделювання механізму взаємодії бурового долота з гірською породою. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 8 (294), 2025. С.45–51. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-45-51>.

## **1.6 Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо**

- [13] Bobrov, Y. 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»*. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 2022. p. 176-178
- [14] Бобров, Є. Ю. Вібраційний аналіз процесу буріння свердловин. *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*, Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2023. С.240
- [15] Бобров Є. Ю., Гапоненко А. А., & Моркун В. С. 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»*. Дніпро : Журфонд, 2023 С.138–140
- [16] Моркун В. С., Моркун Н. В., Шашкіна А. А., & Бобров Є. Ю. Частотно-часовий аналіз віброакустичного сигналу бурової установки в процесі буріння свердловин, *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*, Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2024. С. 254.
- [17] Моркун В. С., & Бобров Є. Ю. Модельно-прогнозуюче керування буровою установкою. *XVIII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація»*. Одеса : Одеський національний технологічний університет, 2025. С. 444–445.

## **1.7 Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати**

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.

## **1.8 Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані.**

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 вихрострумовевого перетворень у залізорудній сировині для розпізнавання її мінералогічних різновидів» (номер держреєстрації 0124U000714).

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

### **Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення**

Стиль викладання та глибина подання матеріалу дозволяють оцінити дисертаційну роботу Боброва Є.Ю. як завершену наукову працю. Тема дисертації, «Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі», її зміст, висновки та положення відповідають спеціальності 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, і вимогам порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінетом Міністрів України від 12 січня 2022р.;

**У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.**

### **2. З урахуванням зазначеного, на засіданні кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій ухвалили:**

**2.1** Дисертаційна робота Боброва Євгена Юрійовича є завершеним науковим дослідженням, присвяченим розробці принципів, структури та системи автоматизованого модельно-прогнозуючого керування процесом буріння свердловин на базі гібридної моделі із застосуванням, в якості інформаційної бази, робочих параметрів бурової установки та визначених характеристичних ознак взаємодії бурового інструменту з гірською породою.

Робота є актуальною, оскільки від ефективності буровибухових робіт, на які припадає до 35 % витрат на видобуток залізної руди, безпосередньо залежать якісні та кількісні характеристики всього виробничого циклу підготовки сировини для металургійного переділу.

**2.2** 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 11 патентах на корисну модель.

**2.3** Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

**2.4** З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії Боброва Євгена Юрійовича дисертація «Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловини в залізорудному кар'єрі» рекомендується для подання до розгляду та захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

**За затвердження висновку проголосували:**

науково-педагогічні працівники кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій:

1. д-р техн. наук, професор, Щокін В. П.
2. д-р техн. наук, професор Купін А. І.
3. д-р техн. наук, професор Попов С. О.
4. д-р техн. наук, доцент Котов І. А.
5. канд. техн. наук, доцент, зав. каф. Рубан С.А.
6. канд. техн. наук, доцент Тиханський М. П.
7. канд. техн. наук, доцент Савицький О. І.
8. канд. техн. наук, доцент Тронь В. В.
9. канд. техн. наук, доцент Маринич І. А.
10. канд. техн. наук, доцент Курганов І. Д.
11. канд. техн. наук, доцент Харламенко В. Ю.
12. канд. техн. наук, доцент Жосан А. А.
13. ст. викладач Бурнасов П. В.
14. ст. викладач Сердюк О. Ю.
15. ст. викладач Тиханська А. М.
16. асистент Ляшок В. Г.

та запрошені:

17. проректор з наукової роботи Криворізького національного університету д-р техн. наук, професор Бровко Д. В.
- від кафедри комп'ютерних систем та мереж:
18. канд. техн. наук, доцент Музика І. О.
19. канд. техн. наук, доцент Кузнєцов Д. І.
20. канд. техн. наук, ст. викладач Сенько А. О.
- від кафедри професійної та соціально-гуманітарної освіти:
21. канд. техн. наук, доцент, докторант каф. АКНТ Ткачук В. В.
- від науково-дослідної частини:
22. д-р техн. наук, головний науковий співробітник Азарян А. А.
23. д-р техн. наук, головний науковий співробітник Моркун В. С. (науковий керівник здобувача).

Також присутні аспіранти кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій: Ляшок Н. Д., Воловецький О. О., Макогонов А. В., Лещенко Є. В., Лінський М. П. (участь у голосуванні не приймали).

З присутніх – 5 докторів наук та 8 кандидатів наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

за -  
проти -  
утримались -

двадцять три  
немає  
немає

Головуючий на засіданні кафедри,  
проф. кафедри АКНТ,  
д.т.н., професор



Андрій КУПІН

«15» 06 2026 р.

|                                                                |  |
|----------------------------------------------------------------|--|
| Підпис                                                         |  |
| ЗАСВІДЧУЮ:                                                     |  |
| Учений секретар<br>Криворізького національного<br>університету |  |
|                                                                |  |
| «15» 06 20 26 р.                                               |  |