

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента

доктора технічних наук, професора Азаряна Альберта Арамаїсовича
на дисертаційну роботу

Боброва Євгена Юрійовича

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

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Актуальність теми дисертації.

Гірничовидобувні та гірничопереробні підприємства Криворізького залізорудного басейну забезпечують 90 % потреб металургійних підприємств України у залізорудній сировині. Найважливішою ланкою на початковому етапі видобутку залізної руди є буровибухові роботи, які потребують буріння розвідувальних та експлуатаційних свердловин. Понад третину витрат на видобуток руди припадає саме на цю операцію, від ефективності якої залежать якісні та кількісні параметри всього виробничого циклу підготовки сировини для металургійного переділу. Тому робота, спрямована на вирішення задачі підвищення якості та ефективності керування процесом буріння свердловин шляхом застосування стратегії модельно-прогнозуючого керування буровою установкою із застосуванням в якості інформаційної бази робочих параметрів бурової установки, є актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації обґрунтовані у повній мірі. Теоретичні дослідження базуються на використанні фундаментальних положень теорії автоматичного керування, математичної теорії нечіткої логіки, нейронних мереж та фізики коливань. Використані апробовані методи аналізу наукових і практичних рішень в області перспективних напрямків розвитку техніки і технологій гірничого виробництва; методи комп'ютерного моделювання для синтезу та аналізу математичних моделей; статистичні методи для оброблення результатів експериментальних досліджень. Отримані теоретичні результати практично апробовані у виробничих умовах.

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).

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- 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;

- 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;

- 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%;

- 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%.

Практичне значення отриманих 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 залізрудному кар'єрі. При цьому запропоновані науково-технічні рішення надають можливість покращити якість керування буровою установкою та зменшити її енергоспоживання. Результати досліджень, наведені 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.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання виконано в повному обсязі, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача *Боброва Євгена Юрійовича* повністю відповідає спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології», та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Автоматизація та приладобудування».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота *Боброва Євгена Юрійовича* є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою в логічному стилі викладання матеріалу. Результати роботи представлено чітко та послідовно, основні положення аргументовані належним чином. Текст роботи викладено науковим стилем мовлення, технічно грамотно, використана переважно загальноприйнята термінологія у галузі автоматизації та приладобудування.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 226 сторінок.

Зміст та коротка характеристика результатів досліджень.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми, визначено мету й наукові завдання дослідження, розкрито його наукове та практичне значення.

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.

У *другому розділі* вирішено завдання розроблення гібридної моделі процесу буріння свердловин, яка 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. Розроблений метод визначення характеристичних ознак взаємодії долота бурової установки з гірською породою в процесі буріння свердловин на основі вимірювання параметрів супутнього вібраційного сигналу, який 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.

В четвертому розділі 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. ANFIS оптимізована із застосуванням генетичного алгоритму (GA), а для створення початкової популяції хромосом у генетичному алгоритмі використано метод нечіткої кластеризації Fuzzy C-means (FCM). 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 (МПК) для динамічного корегування заданих значень регульованих змінних контурів нижнього рівня. Наведено результати комп'ютерного моделювання та практичної апробації основних складових комп'ютерно інтегрованої технології бурових робіт у залізорудному кар'єрі.

У *Загальних висновках* у стислій формі узагальнено отримані результати досліджень та сформульовано рекомендації щодо їх подальшого застосування.

Список використаних джерел із 216 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та закордонні публікації за темою дисертаційних досліджень.

У *Додатках* наведено матеріали, що засвідчують практичну апробацію результатів дисертаційної роботи, а також їх використання в процесі підготовки фахівців відповідних спеціальностей у закладах вищої освіти.

Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням. Дисертаційна робота чітко висвітлює методи досліджень та отримані результати, оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Основні наукові положення та результати, що були отримані при виконанні дисертаційного дослідження, 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.

Публікації здобувача оформлені на достатньому науковому рівні, фактів порушення принципів академічної доброчесності не виявлено. Основні результати дослідження, що відображають особистий внесок здобувача, повністю відображені в розділах дисертації.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Важливим елементом процесу буріння є визначення та підтримання просторових координат свердловини, зокрема її кута. При формуванні цільової функції керування доцільно було б вказати цей фактор.
2. Для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди використані ряд динамічних змінних бурової установки. На мою думку, додавання до них результатів ядернофізичних та магнітометричних вимірювань дозволить підвищити якість отриманих даних.
3. У розділі 3 дисертації обґрунтовано використання питомої енергії для формування характеристичних ознак процесу буріння свердловин але не наведено зв'язок цього параметра із зносом бурового долота та його типу.
4. Вираження глибини різання гірської породи із застосуванням синусоїдальної змінної (3.37) вважаю достатньо приблизним.
5. Метод оперативного розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин є одним із головних здобутків дисертаційного дослідження. Тому, на мою думку, його розробку доцільно було б навести в окремому розділі.
6. В якості операційної бази розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди застосована адаптивна нейро-нечітка система ANFIS. Але саме такий вибір вважаю недостатньо обґрунтованим.
7. У наборі даних для тренування адаптивної нейро-нечіткої системи ANFIS застосовано 7 мінералогічних різновидів залізної руди. За результатами

дослідження не зроблено висновок стосовно впливу кількості різновидів руди на результати розпізнавання.

8. У переліку публікацій автора вказана стаття [19] у розділі «Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації». В цій статті викладено загальні принципи формалізації управління технологічним процесом гірничого виробництва в динамічній розподіленій системі. У розділі 2 дисертації та у відповідному пункті наукової новизни запропонована оригінальна структура моделі з розподіленими параметрами, яка потім використана для формування автоматизованого керування процесом буріння. Тому цю статтю слід було б привести у розділі «Список публікацій, в яких наведено основні наукові результати дисертації».

Проте зазначені зауваження не є визначальними, мають переважно рекомендаційний характер, не применшують загальну наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів і можуть бути враховані здобувачем у подальших дослідженнях.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії **Боброва Євгена Юрійовича** на тему «**Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в залізорудному кар'єрі**» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

Дисертаційна робота за актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, практичною цінністю та науковою новизною відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в пп. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, **Бобров Євген Юрійович**, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування», за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Рецензент

доктор технічних наук, професор,
головний науковий співробітник
науково-дослідної частини

Криворізького національного університету



[Handwritten signature]

Підпис	Альберт АЗАРЯН
ЗАСВІДЧУЮ:	
Відділ кадрів Криворізького національного університету	
<i>[Handwritten signature]</i>	
«14» 08	2026 р.