

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента

кандидати технічних наук, доцента Рубана Сергія Анатолійовича

на дисертаційну роботу

Боброва Євгена Юрійовича

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

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

Актуальність теми дисертації.

Гірничовидобувні та гірничопереробні підприємства Криворізького залізорудного басейну забезпечують понад 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. На цю операцію припадає від 25 до 35 % витрат на видобуток руди, а від її ефективності залежать якісні та кількісні параметри всього виробничого циклу підготовки сировини для металургійного перероблення.

Існуючі системи автоматизованого керування процесом буріння внаслідок застарілих методів ідентифікації й моделювання нелінійних динамічних об'єктів та обмеженості засобів інформаційного забезпечення не забезпечують якісного формування й підтримання оптимальної швидкості проходки в умовах змінних фізико-механічних і текстурно-структурних особливостей руди, що знижує продуктивність та енергоефективність процесу. Тому робота, спрямована на підвищення якості та ефективності керування процесом буріння свердловин шляхом застосування стратегії модельно-прогнозуючого керування буровою установкою на базі гібридної нейро-нечіткої моделі, є актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації обґрунтовані повною мірою. Теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях теорії автоматичного керування, математичної теорії нечіткої логіки, нейронних мереж та фізики коливальних систем. Використано апробовані методи аналізу й систематизації наукових і практичних рішень у галузі перспективних напрямів розвитку техніки і технологій гірничого виробництва; методи аналітичного й комп'ютерного моделювання для синтезу та аналізу математичних моделей бурової установки й системи керування; методи

оптимального керування та комп'ютерні інформаційні технології для реалізації розпізнавання різновидів руди й алгоритму модельно-прогнозуючого керування. Достовірність результатів підтверджується задовільною збіжністю теоретичних та експериментальних даних, а також позитивними результатами апробації 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 вихрострумowego 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 та блок руйнування породи представлено структурами із зосередженими параметрами, а блок бурового інструменту у свердловинній частині – структурою з розподіленими параметрами, що дозволило підвищити точність і надійність прогнозування результатів буріння в умовах змінних характеристик руди та стану обладнання, а також якість керування технологічним процесом і його енергоефективність;
- вперше розроблено 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 установки формують карту порядку в усьому діапазоні обертів, визначають частоту високоамплітудної вібрації долота, що відповідає піковому порядку обертів на сформованій карті, і на цій частоті обчислюють середньоквадратичне значення амплітуди та гармонійне спотворення вібраційного сигналу долота, що дозволяє за рахунок зменшення впливу

- збурюючих факторів підвищити якість оцінки фізико-механічних характеристик породи 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 (швидкості проходки, навантаження на долото, швидкості обертання, продуктивності системи очищення, питомої механічної енергії, амплітуди та гармонійного спотворення вібрації долота), для реалізації якого застосовується адаптивна нейро-нечітка система ANFIS, оптимізована генетичним алгоритмом (GA) з попередньою кластеризацією ознак методом нечітких середніх (Fuzzy C-means), що дозволяє 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 регульованих змінних, величина яких визначається оперативними оцінками мінералогічних різновидів руди, що дозволяє зменшити час перехідних процесів у системі в середньому на 12–15 % та понизити питоме енергоспоживання на 8–11 %.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі виконаних теоретичних досліджень реалізовано комп'ютерно-інтегровану технологію бурових робіт та автоматизовану систему керування процесом буріння свердловин у залізорудному кар'єрі. Запропоновані науково-технічні рішення надають можливість покращити якість керування буровою установкою та зменшити її енергоспоживання. Результати досліджень 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 на основі бурового станка СБШ-250МНА-32 (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 імені Івана Франка та Східноукраїнського національного університету імені 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 напрямам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми.

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

За результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна зробити висновок, що робота є результатом самостійних досліджень здобувача й не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та неправомірних 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 викладення матеріалу. Результати роботи представлено чітко та послідовно, основні положення аргументовані належним чином. Текст викладено науковим стилем, технічно грамотно, із використанням переважно загальноприйнятої термінології у галузі автоматизації та приладобудування.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 240 сторінок, з яких 159 сторінок основного тексту; робота містить 87 рисунків та 8 таблиць.

Зміст та коротка характеристика результатів досліджень.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми, визначено мету й наукові завдання дослідження, розкрито його наукове та практичне значення, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації.

У *першому розділі* на основі проведеного аналізу вітчизняних і зарубіжних досліджень у галузі перспективних напрямів розвитку техніки й 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, 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 установки у наземній частині й блок руйнування породи представлено структурами із зосередженими параметрами, а блок бурового інструменту у свердловинній частині – структурою з розподіленими параметрами.

У *третьому розділі* сформовано інформаційну базу автоматизованого керування процесом буріння та визначено характеристичні ознаки взаємодії бурового інструменту з гірською породою. Розроблено метод визначення характеристичних ознак на основі вимірювання параметрів супутнього вібраційного сигналу, який дозволяє підвищити якість оцінки фізико-механічних характеристик породи й ідентифікувати неефективний робочий режим установки. В якості ще однієї інформативної ознаки використано механічну питому енергію.

У *четвертому розділі* запропоновано комп'ютерно-інтегровану технологію бурових робіт у залізрудному кар'єрі, основними складовими якої є синтез і навчання адаптивної нейро-нечіткої системи (ANFIS) для формування банку даних мінералогічних різновидів залізної руди; синтез алгоритму і параметрів модельно-прогнозуючого керування; регулювання основних змінних та динамічна корекція параметрів систем установки. ANFIS оптимізована генетичним алгоритмом (GA) з використанням методу Fuzzy C-means для формування початкової популяції. Обґрунтовано дворівневу структуру керування (ПД-контролери на нижньому рівні та модельно-прогнозуючий контролер на верхньому) і наведено результати моделювання та практичної апробації. За даними експериментів середня точність розпізнавання різновидів руди становить 85,1 % для ANFIS і 92,4 % для ANFIS+GA.

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 та їх використання у процесі підготовки фахівців у закладах вищої освіти.

Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням. Робота 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 дисертаційного дослідження знайшли відображення у 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 висвітлено у наукових публікаціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Значна частина огляду в першому розділі та окремі базові моделі спираються на класичні уявлення нафтогазового буріння (бурова колона великої довжини, циркуляція бурового розчину, долота PDC). Доцільно було б чіткіше обґрунтувати межі застосовності цих моделей до умов сухого пневматичного буріння вибухових свердловин у залізорудному кар'єрі станком типу СБШ.
2. Із тексту четвертого розділу не цілком очевидно, яку частку набору з 1000 спостережень (700 навчальних і 300 тестових) становлять безпосередні натурні вимірювання, а яку – дані, отримані шляхом імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Бажано конкретизувати обсяг саме промислових вимірювань та умов верифікації заявленої похибки розпізнавання 7–9 %.
3. Ефект від попередньої кластеризації методом Fuzzy C-means в алгоритмі ANFIS+GA є відносно скромним (підвищення точності на 0,2–0,3 % при скороченні часу обчислень на 7–8 %). Бажано було б додатково

обґрунтувати доцільність ускладнення алгоритму за такого приросту точності.

4. У роботі вживається значна кількість абревіатур, частина з яких застосовується непослідовно (зокрема, паралельне використання позначень МРС, МПК і МРК для модельно-прогнозуючого керування). Бажано уніфікувати умовні позначення за текстом дисертації.
5. Оскільки переважна більшість публікацій підготовлена у співавторстві, у тексті дисертації доцільно було б виразніше відмежувати особистий внесок здобувача в окремих результатах.

Проте зазначені зауваження не є визначальними, мають переважно рекомендаційний характер, не применшують загальної наукової новизни та практичної значимості 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 і 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, 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

канд. техн. наук, доцент,
завідувач кафедри автоматизації,
комп'ютерних наук і технологій
Криворізького національного університету

