

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Мацуя Анатолія Миколайовича,
доцента кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського
національного технічного університету
на дисертаційну роботу Боброва Євгена Юрійовича
**«Автоматизоване енергозберігаюче керування процесом буріння свердловин в
залізорудному кар'єрі»,**
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
151 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології»
(галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»)

**Актуальність обраної теми досліджень та її зв'язок з науковими
програмами, планами і темами.**

Буріння свердловин є важливою технологічною операцією розвідки та видобутку корисних копалин. Близько третини витрат на видобуток руди припадає саме на буріння свердловин. Від результатів цієї операції залежать якісні характеристики видобутої руди та її вартість, що безпосередньо впливає на весь цикл підготовки сировини до металургійного виробництва.

Підвищити швидкість проходки свердловин та енергоефективність процесу неможливо без комплексної автоматизації бурової установки і впровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій. В дисертаційній роботі і вирішується задача оптимізації керування процесом буріння свердловин в умовах змінних характеристик геологічної структури рудного покладу та стану бурового обладнання.

Важливість обраного здобувачем напрямку досліджень підкреслює і те, що дисертація виконана в рамках та є складовою двох держбюджетних науково-дослідних робіт (номер держреєстрації 0124U000610 та 0124U000714), які виконуються у Криворізькому національному університеті. Тематика наведених науково-дослідних робіт та дисертації 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».

З огляду на вищевказане, тематика дисертаційного дослідження Боброва Є.Ю, яка присвячена вирішенню наукової задачі, що 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, є актуальною як в науковому, так і в прикладному плані. За своїм спрямуванням і фактичним змістом представлена дисертаційна робота відповідає спеціальності 151 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології».

Наукова новизна дослідження й отриманих результатів.

В результаті проведених автором досліджень 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. Особливістю запропонованого підходу є 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. Обґрунтовано представлення блоку приводу бурової установки і блоку руйнування гірської породи у вигляді структур із зосередженими параметрами, а блока бурового інструменту у свердловинній частині – структурою з розподіленими параметрами. Це сприяє підвищенню точності та надійності прогнозування результатів буріння в умовах змінних характеристик руди та стану технологічного обладнання, а також якості управління технологічним процесом та його енергоефективність.

Оригінальним виглядає розроблений автором метод визначення характеристичних ознак взаємодії долота бурової установки з гірською породою в процесі буріння свердловин на основі вимірювання параметрів супутнього вібраційного сигналу. Він відрізняється від відомих тим, що в процесі зміни робочого режиму приводу обертових частин бурової установки формується карта порядку в усьому діапазоні його обертів, визначається частота високоамплітудної вібрації долота, що відповідає визначеному піковому порядку обертів на сформованій карті, і на цій частоті вимірюються параметри та обчислюється середньоквадратичне значення амплітуди та гармонійне спотворення вібраційного сигналу бурового долота. Реалізація зазначеного підходу дозволяє підвищити якість оцінки фізико-механічних характеристик гірських порід та ідентифікувати робочі режими процесу буріння свердловин.

До вирішення завдання оперативного розпізнавання мінеральних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин автор підійшов комплексно та системно. Удосконалено метод, заснований на аналізі характеристичних параметрів у векторному просторі ознак, в якості яких використані результати вимірювань силових, кінематичних та енергетичних параметрів бурової установки. Для практичної реалізації методу автор пропонує використовувати виміряні значення 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. Оригінальною є структура системи 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). Практична апробація запропонованого підходу дозволила розпізнавати основні мінеральні різновиди залізної руди експлуатованого родовища з похибкою 7-9%.

Автором обґрунтовано дворівневу структуру автоматизованого керування буровою установкою. Нижній рівень представлено замкнутими контурами пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання навантаження на долото, швидкості його обертання та продуктивності системи очищення свердловини. На верхньому рівні використовується модельно-прогнозуюче керування для динамічного корегування заданих значень зазначених регульованих змінних, величина яких визначається оперативними оцінками мінеральних різновидів руди. Експериментально доведено, що така структура керування дозволяє зменшити час перехідних процесів в системі у середньому на 12-15% та понизити питоме енергоспоживання на 8-11%.

Пріоритет та оригінальність наведених в дисертації науково-технічних рішень, підтверджується 9 патентами України.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації та їх достовірності.

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації обґрунтовані у повній мірі. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи ґрунтуються на всебічному аналізі отриманих результатів та використанні наукових положень сучасної теорії і практики автоматизації процесів керування буровими установками. Достовірність отриманих результатів також підтверджено задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень, позитивними результатами апробації розроблених способів та засобів. Враховуючи вищевказане, обґрунтованість викладених в роботі положень не викликає сумніву.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 216 найменувань, 7 додатків. Дисертацію викладено на 240 сторінках друкованого тексту, з яких 176 - основний текст, що містить 72 рисунки та 12 таблиць.

Викладання матеріалів відзначається логічною послідовністю, стиль написання є науковим, враховує міжнародну і вітчизняну термінологію.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію щодо апробації результатів дослідження, висвітлення їх у публікаціях, а також щодо структури дисертації.

У **першому розділі** на основі огляду науково-технічних джерел проведено аналіз сучасного стану та існуючих проблем автоматизованого керування буровими установками. Зокрема визначені основні напрямки розвитку гірничої галузі виробництва в цілому, та окремо розглянуто методи моделювання, інформаційного забезпечення, автоматизації та оптимізації процесу буріння свердловин. Визначені в ході аналізу недоліки існуючих автоматизованих систем керування буровими установками лягли в основу постановки завдань, які розв'язуються у дисертаційній роботі.

У **другому розділі** запропоновано удосконалену математичну модель процесу буріння свердловин 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. 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. 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. Представлено результати моделювання із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink® /MATLAB®.

У **третьому розділі** доведено, що супутній віброакустичний сигнал, який 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. 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. Також показано, що енергоємність є універсальною 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. Ще однією характеристичною ознакою процесу буріння визначено оцінку величини повного гармонійного спотворення (THD) вібраційного сигналу бурового долота. Аналіз обчислених значень THD показав, що вони надають адекватну кількxснy оцінку нелінійності процесу взаємодії бурового долота з гірською породою і можуть бути використані для ідентифікації робочих режимів бурової установки та розпізнавання мінеральних різновидів залізної руди але потребують при цьому виконання спектрального аналізу. Наведені параметри використовуються автором для формування інформаційної бази автоматизованого керування процесом буріння свердловин.

У **четвертому розділі** розроблена комп'ютерно-інтегрована технологія бурових робіт у залізорудному кар'єрі. Її основними складовими є синтез і навчання адаптивної нейро-нечіткої системи (ANFIS) для визначення та формування банку даних мінеральних 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 виміряних під час буріння технологічних (вибухових) свердловин характеристик бурової установки з ознаками мінеральних різновидів залізної руди досліджуваного родовища із сформованого банку даних; передача отриманої інформації до центрального інформаційного банку даних.

Для реалізації процедури розпізнавання мінеральних 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.

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

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 здобувачів спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» Криворізького національного

університету, Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, а також для здобувачів технічних спеціальностей Львівського національного університету імені Івана Франка.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи. Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації.

Зміст анотації відображає основний зміст дисертації і розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Боброва Є.Ю. повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 151 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології процесу буріння свердловин».

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 відповідне джерело.

Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих наукових працях.

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.

Таким чином, наукові результати, наведені в дисертації, повністю висвітлені у публікаціях здобувача. Науковий рівень публікацій відповідає рівню провідних наукових видань у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Як в дисертації, так і в публікаціях здобувач дотримується етики досліджень, викладання їх результатів та правил академічної доброчесності.

Зауваження до дисертації.

1. В Розділі 1 дисертації аналіз характеристик існуючих схем автоматизованих систем керування буровими установками та їх специфіки слід було б представити більш широко, з огляду на наукові завдання, що вирішуються в дисертації.

2. У формулі (2.16) однією із змінних визначено параметр f_7 - вплив зносу зуба свердла на швидкість проходки. З наведеного в дисертації не ясно, як цей параметр впливає на результати розпізнавання мінеральних різновидів залізної руди та автоматизованого керування буровою установкою.

3. При розробці математичних моделей у другому розділі варто було б більш детально описати прийняті допущення і дати оцінку точності отриманих моделей.

4. Для побудови одного із структурних елементів алгоритму розпізнавання мінеральних різновидів залізної руди використано метод нечіткого середнього Fuzzy C-means (FCM), але не наведено обґрунтування застосування саме цього вибору.

5. Слід було більш конкретно проаналізувати яким чином впливають основні керуючі дії на якість керування процесом буріння свердловин за умов впровадження системи і технології, які пропонуються.

6. В Розділі 4 наведено опис обладнання, яке було застосовано для практичної реалізації процедури розпізнавання мінеральних різновидів залізної руди на етапі експериментальних досліджень, але не пропонується, принаймні в якості рекомендацій, елементна база для виробничого застосування.

7. В дисертації напрям досліджень обмежений залізрудними родовищами. За результатами виконаної роботи слід було б визначитись стосовно можливості застосування запропонованого підходу до покладів інших корисних копалин.

Висловлені зауваження не мають принципового характеру, не зменшують теоретичної та практичної цінності дисертації та не заперечують її високий науковий рівень.

Загальний висновок.

Представлені в дисертаційній роботі нові науково підтверджені результати дозволяють зробити обґрунтований висновок, що, в сукупності, вони складають вагомий внесок в розвиток автоматизованих систем керування процесом буріння свердловин та сприяють ефективному вирішенню важливої науково-прикладної задачі підвищення ефективності процесу та якості автоматизованого керування буровою установкою.

У відповідності до вищенаведеного вважаю, що дисертація за актуальністю, новизною теоретичних та експериментальних результатів, високим рівнем проведених досліджень повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 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 присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології»(галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»).

Офіційний опонент
доцент кафедри автоматизації
виробничих процесів
Центральноукраїнського національного
технічного університету,
доктор технічних наук, професор



Анатолій МАЦУЙ

Григор А. Мазур
Гор. інспектор Вузького коледжу
М. Голуб