

## **ВІДГУК**

офіційного опонента Запорожця Артура Олександровича  
на дисертаційну роботу **Марчук Любові Романівни**  
**«Адаптивна мехатронна система ударного руйнування гірських порід»,**  
що подана на здобуття ступеня доктора філософії  
з галузі знань 14 «Електрична інженерія»  
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи**

Останні досягнення в гірничодобувних технологіях актуалізують видобуток критично важливих мінералів, необхідних для технологій енергетики, в тому числі відновлюваної енергетики. Незважаючи на значну кількість різних методів руйнування, ударне руйнування гірських порід є найпоширенішим методом, що широко використовується у гірничодобувній галузі. На тему руйнування гірських порід опубліковано велику кількість наукових праць. Ці дослідження показують вплив різних факторів на ефективність руйнування. Однак досліджень щодо раціональних способів руйнування гірських порід з різними параметрами все ще бракує. Більше того, праці з цієї тематики здебільшого обмежуються дослідженням впливу тільки на кілька типів гірських порід.

Переважна більшість досліджень підтверджують гіпотезу про те, що суттєво вплинути на ефективність руйнування гірських порід вдасться за умови застосування механізмів імпульсної дії виконавчих органів з урахуванням технологічних характеристик гірських порід, що можуть змінюватися навіть при проведенні однієї технологічної операції по їх руйнуванню. Досягнути такого результату фактично можливо з застосуванням електромеханічних систем керування процесом руйнування в реальному масштабі часу.

Таким чином представлене дослідження є актуальним і важливим, відповідає національним пріоритетам України у сфері енергоефективності, та сприяє розвитку енергетичної та гірничодобувної галузей.

### **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами**

Дисертаційна робота Марчук Л.Р. виконана на кафедрі автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» під керівництвом д.т.н., доц. Сліденка Віктора Михайловича згідно плану пошукової НДР МОН України: “Удосконалення електромеханічних та мехатронних систем ” (0121U107906), у якій здобувачка була виконавцем. Частина роботи виконано в рамках програм мобільності Erasmus+ за угоди EMS між Університетом Лотарингії (Université de Lorraine), Франція і КПІ ім. Ігоря Сікорського; програми DAAD Eastern Partnership Project



у Ганноверському університеті імені Готфріда Вільгельма Лейбніца (Leibniz University Hannover), Німеччина

### **3. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни**

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків дисертації Марчук Л.Р. зумовлені проведенням порівняльним аналізом літературних джерел, що включають 87 найменувань стосовно теми дисертації, математичною та логічною строгістю побудови підходів і моделей, коректністю постановки й вирішення завдань досліджень, використанням широко апробованих методів теорії електромеханіки, термодинаміки, математичного аналізу, статистичної теорії динамічних систем, методів математичного моделювання з використанням програмних засобів MatLab, MathCad, AutoCAD та SolidWorks.

Обґрунтованість висновків і одержаних результатів дисертаційної роботи підтверджуються результатами математичного та комп'ютерного моделювання, та засвідчують високу ефективність запропонованих методів і засобів. Здобуті Марчук Л.Р. наукові результати відповідають завданням досліджень та підтверджуються їх апробацією на науково-технічних конференціях і семінарах.

Високий рівень отриманих результатів також підтверджується їх впровадженням у навчальний процес кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського».

В дисертаційній роботі поставлене наукове завдання, яке полягає у розробці та обґрунтуванню параметрів адаптивної мехатронної системи керування ударним пристроєм для руйнування гірських порід з підвищенням ефективності прохідницьких робіт, видобутку корисних копалин та ефективності підземного містобудування.

Поставлене Марчук Л.Р. наукове завдання виконано повністю, здобувачка повною мірою оволоділа методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувачки Марчук Любові Романівни повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».



Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувачки у науковий напрям енергетики та електромеханіки.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Марчук Л.Р. є результатом самостійних досліджень здобувачки і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело. Тому дисертаційна робота Марчук Л.Р. є оригінальною роботою та не порушує принципів академічної доброчесності.

## **5. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 10 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 3 статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття у періодичному науковому виданні, проіндексованому у наукометричній базі даних Scopus, віднесеному до третього квартиля Q3 відповідно до класифікації Scimago.

Також результати дисертації були апробовані на 6 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувачки мають високий науковий рівень, проходили рецензування та перевірку на плагіат згідно умов видавництва. Особистий внесок здобувачки до представлених наукових публікацій є вагомим. Публікації охоплюють всі результати дисертаційного дослідження.

Таким чином, наукові результати наведені в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувачки.

## **6. Наукове значення та практична цінність**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- вперше встановлена група технологічних параметрів, впливових на формування мехатронної системи керування ударним пристроєм з адаптацією до умов робочого середовища, яка включає енергетичні параметри пневмоакумулятора, електромагнітного клапана, ударної взаємодії елементів конструкції, параметри, які враховують змінні характеристики гірського масиву;
- вперше встановлені електротехнічні характеристики електромагніту клапана, з урахуванням перехідних процесів, що дозволяє згенерувати силовий та частотний режим електромагнітного клапана до 20 Гц з перетворенням електричної енергії та енергії ресивера в потенціальну енергію зарядки пневмоакумулятора в автоматичному режимі, що забезпечує збільшення ефективності ударної системи до двох раз;



- вперше встановлено параметри електромеханічної системи “електроживлення - електромагнітний клапан-ресивер-пневмоакумулятор”, як активної частини адаптивної мехатронної системи, з забезпеченням її функціонування в автоматичному режимі без підзарядки ресивера пневмосистемою екскаватора безперервно протягом 1,056 години, а з урахуванням циклу роботи гідравлічного екскаватора - прогнозовано до 8 годин;
- вперше встановлена залежність функції щільності ймовірності для показника політропи в межах середнього квадратичного відхилення для нормального розподілу та щільності ймовірності для бета розподілу енергетичних параметрів пневмоакумулятора, як випадкових величин, що впливають на його ефективність;
- вперше встановлена залежність сили опору різанню від кутового переміщення ковша та числа ударів ударника ДорНДІ, як змінних технологічних параметрів, що відображаються поверхнею 2-го порядку з локацією зони раціонального спрацювання імпульсного пристрою за умови стопоріння ковша при статичному різанні в вибої;
- встановлена степенева залежність швидкості розгону бойка від його переміщення при енергетичній розрядці пневмоакумулятора шляхом інтегрування нелінійного диференціального рівняння руху бойка з використанням фазового простору, що дозволило встановити конструктивний параметр довжини розгону бойка, яка відповідає змінним параметрам технологічної системи та параметрам мехатронного керування;
- сформульована змішана початково-крайова задача зі звичайним диференціальним рівнянням та хвильовим рівнянням в частинних похідних, яка відрізняється від відомих апроксимацією різницевої задачі змішаною різницевою схемою з ваговими коефіцієнтами та алгоритмом розв'язку різницевої задачі, який побудований на основі методу прогонки на кожному часовому шарі при частковій лінеаризації нелінійних жорстких зв'язків, що дозволяє визначити взаємовплив системи адаптації та параметрів гірських порід;
- вперше розроблена імітаційна модель електромеханічної системи в Matlab Simulink для визначення структури та функцій адаптивної мехатронної системи керування пристроєм ударного руйнування гірських порід;
- розроблена мехатронна система адаптивного керування тиском в пневмоакумуляторі ударного пристрою, яка відрізняється від відомих врахуванням закономірностей впливу на енергію зарядки пневмоакумулятора електротехнічних характеристик електромагнітного клапана, та термодинамічних параметрів політропічного процесу частотної подачі газу в камеру пневмоакумулятора ударного пристрою з перетворенням електричної енергії в механічну, що в цілому формує передумови до оптимізації структури та параметрів адаптивної мехатронної системи.



Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що запропонована структура та аналітично обґрунтовані параметри і ефективність застосування мехатронної системи керування адаптацією ударного пристрою до умов робочого середовища з можливістю його встановлення, як на ковшах гідравлічних екскаваторів так і безпосередньо на маніпуляторах для підвищення енергоефективності руйнуванням гірських порід та міцних ґрунтів.

## 7. Оцінка структури та змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Дисертаційна робота викладена технічною мовою із використанням наукової термінології, має логічну структуру та доступна для розуміння. Текст дисертації має достатній обсяг та проілюстрований значною кількістю рисунків, що дозволяють краще пояснити отримані результати.

Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 198 сторінок.

У *вступі* описано актуальність дослідження, сформульовано мету та завдання досліджень, об'єкт, предмет та методи дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також відомості про наявні публікації, апробацію та особистий внесок здобувача.

У *першому розділі* проведено аналіз сучасних мехатронних систем, зокрема електрогідравлічних приводів та пристроїв для руйнування гірських порід. Розглянуто систему рекуперації енергії на прикладі акумулятора для гідравлічної стріли екскаватора та дистанційне керування для будівельних і гірничих машин. Підкреслено необхідність вдосконалення процесів видобутку корисних копалин з застосуванням технологій ударного руйнування гірських порід.

У *другому розділі* досліджено ключові параметри, що впливають на ефективність ударного пристрою та енергетичні характеристики пневматичного акумулятора. Визначено робочий діапазон функціонування системи ударного руйнування з урахуванням змінних характеристик робочого середовища. Проведено статистичний аналіз впливу випадкових величин на енергетичні параметри ударної системи. Встановлено крайні значення параметрів для показника політропи, що складають 1,4...1,5, математичне сподівання – 1,45 при довірчій ймовірності 0,683, що дозволяють реалізувати на практиці раціональний діапазон показника ступеня стиснення газу та енергії зарядки пневмоакумулятора.

*Третій розділ* присвячено дослідженню енергетичної взаємодії елементів віброударної системи. Представлено нелінійну модель процесу енергорозрядки пневмоакумулятора при розгоні бойка на удар. Для розв'язку нелінійного диференціального рівняння застосовано метод пониження порядку диференціального рівняння за допомогою фазових координат. Це дозволило встановити степеневу залежність між швидкістю бойка та його переміщенням.



Розроблено дискретно-безперервну математичну модель, яка враховує інерційно-хвильові взаємодії бойка та інструмента в процесі передачі енергії гірському масиву.

У *четвертому розділі* наводиться імітаційну модель функціонування ударного пристрою в середовищі Matlab Simulink. Модель дозволяє встановити раціональний режим та параметри функціонування ударного пристрою, а також сформулювати вимоги до мехатронної системи адаптивного керування процесом руйнування гірських порід. Досліджено посилення контактної сили між ударним інструментом і ґрунтовим масивом, що продемонструвало потенціальні можливості адаптивної системи.

У *п'ятому розділі* наведено елементи реалізації мехатронної системи з електроживленням за трьома варіантами. Запропоновано блок-схему функціонування системи та встановлено частотні параметри функціонування електромагнітного клапана. Проведено оцінку ефективності функціонування електромагнітної системи з забезпечення необхідного рівня тиску в пневмоакумуляторі та визначено тривалість безперервної роботи адаптивної системи. Вперше встановлені електротехнічні характеристики електромагніту клапана: середня довжина витка 0,085 м, діаметр дроту  $0,315 \cdot 10^{-3}$  м, площа обмоткового вікна  $0,99 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, число витків обмотки 7965, опір обмотки 209 Ом, що дозволяє згенерувати силовий та частотний режим електромагнітного клапана (20 Гц) з перетворенням електричної енергії та енергії ресивера в потенціальну енергію зарядки пневмоакумулятора в автоматичному режимі.

У *висновках* узагальнено основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

## 8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Загалом роботу можна характеризувати як комплексне науково-прикладне дослідження, але варто відмітити декілька зауважень:

1. «Перелік умовних позначень, скорочень і термінів» варто було б назвати «Перелік умовних скорочень».

2. Деякі пункти наукової новизни мають більш практичне значення та не базуються на методологічному підході. Зокрема, це стосується пунктів 2, 3, 4, 8 та 9 наукової новизни. Їх доцільно було б віднести до практичних результатів.

3. В п. 2.2.1 вказано, що «Враховуючи достатню продовжність роботи ударного пристрою, приймаємо гіпотезу, що зовнішні фактори впливають на зміну показника політропи, як випадкової величини, за нормальним розподілом ймовірності». Ця гіпотеза потребує додаткового обґрунтування та пояснення впливу зовнішніх факторів на зміну показника політропи.

4. Чим обґрунтований вибір показника політропи  $n$  діапазоні  $1,3 \div 1,6$  (стор. 69)? Це потрібно пояснити.



5. В тексті роботи наявні позначення одних і тих же величин різними символами (наприклад, на стор. 69-70 символами  $n$  та  $x$  позначено діапазон показника політропи).

6. Чим обґрунтовано значення знаменника «3» у формулі для визначення середньоквадратичного відхилення (стор. 69)? Який обсяг вибірки даного дослідження?

7. На стор. 71 автор роботи зменшує діапазон  $n_{min}=1.4$ ;  $n_{max}=1.5$ ? Чим це обґрунтовано та чи не вносить це помилки в подальші розрахунки?

8. На стор. 75 вказано, що «Далі обчислимо середнє значення за (2.13) та дисперсію (2.14) для масштабованого бета-розподілу», проте відповідні результати не наводяться.

9. Формула (3.1) (стор. 84) записана неправильно.

10. За допомогою яких залежностей отримані результати, що представлені на рис. 3.4, 4.5, 4.6, 5.6?

11. Блок-схеми на рис. 4.7, 5.1 побудовані не на основі «ДСТУ ISO 5807:2016 Оброблення інформації. Символи та угоди щодо документації стосовно даних, програм та системних блок-схем, схем мережевих програм та схем системних ресурсів (ISO 5807:1985, IDT)».

12. В Додатку 1 відсутні підписи і пояснення, що ускладнює розуміння цієї частини роботи.

13. Сторінки дисертаційної роботи з додатками не пронумеровані, що дещо ускладнює пошук необхідної інформації.

14. У представленій роботі наведено акт впровадження в навчальний процес. Було б доцільно отримати інші акти впровадження у виробництво, що значно б підвищило значимість отриманих результатів.

15. Викладення матеріалу загалом чітке та стилістично виважене, однак наявна певна кількість орфографічних, стилістичних та синтаксичних помилок, що не впливають на розуміння матеріалу.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## 9. Загальний висновок по дисертаційній роботі

Вважаю, що дисертаційна робота здобувачки ступеня доктора філософії Марчук Любові Романівни на тему «Адаптивна мехатронна система ударного руйнування гірських порід» 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 14 «Електрична інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною 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.

Здобувачка Марчук Любов Романівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Офіційний опонент:**

Заступник директора  
з науково-організаційної роботи  
Інституту загальної енергетики  
НАН України,

доктор технічних наук, старший дослідник



Артур ЗАПОРОЖЕЦЬ

М.П.

« 12 » 08 2024 року