

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка» доктору технічних
наук, професору Тарану І. О.

Відгук офіційного опонента доктора технічних
наук, професора, завідувача кафедри інжинірингу
з галузевого машинобудування Державного
університету економіки і технологій
Засельського Володимира Йосиповича
на дисертаційну роботу Гавриленка Станіслава
Сергійовича на тему «Обґрунтування параметрів
врівноваженого колосникового грохота-
перевантажувача на основі математичного
моделювання нестаціонарних режимів роботи»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії з
галузі знань 13 «Механічна інженерія» за
спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Підвищення продуктивності гірничих, дробильно-сортувальних і перевантажувальних комплексів супроводжується зростанням інтенсивності вантажопотоків та підвищенням вимог до надійності машин і транспортно-перевантажувального обладнання. Однією з найбільш відповідальних операцій у таких технологічних системах є приймання крупнокускової гірничої маси та передавання її на подальші транспортні, грохотильні або дробильні ланки. Саме на цій ділянці обладнання сприймає нерівномірний потік матеріалу, змінні технологічні навантаження та значні локальні ударні дії, які безпосередньо впливають на ресурс робочих органів, пружних опор, приводних вузлів і несучих конструкцій.

Колосниковий грохот-перевантажувач у структурі такого комплексу виконує одночасно технологічну та динамічно-захисну функції. Він забезпечує попереднє відокремлення дрібної фракції, формування більш рівномірного потоку матеріалу, зменшення прямого ударного навантаження на наступне обладнання та створює передумови для використання дрібної фракції як проміжного захисного шару. Водночас вібраційний характер роботи машини зумовлює необхідність обмеження динамічних реакцій, що передаються на основу та суміжні конструкції.

Перспективним напрямом зменшення таких реакцій є застосування врівноважених багатоколосьникових схем, у яких взаємне фазове положення рухів окремих секцій забезпечує часткову або повну компенсацію інерційних дій. У конструкції, дослідженій С. С. Гавриленком, середній колосьник здійснює кінематично заданий протифазний рух відносно крайніх колосьників. Реалізація такого принципу потребує узгодження мас, моментів інерції, жорсткісних характеристик опор, геометричних параметрів ексцентрикового привода та фазових співвідношень руху.

Окремого значення набуває дослідження нестационарних режимів. У реальних умовах максимальні навантаження можуть виникати не лише під час сталого вимушеного руху, а й унаслідок падіння великогабаритних шматків матеріалу та короткочасного порушення усталеного коливального процесу. Тому оцінювання лише стаціонарного режиму не забезпечує достатнього обґрунтування параметрів такої машини.

З огляду на викладене тема дисертаційної роботи С. С. Гавриленка є актуальною, відповідає сучасним завданням галузевого машинобудування та має практичне значення для проектування і модернізації вібраційного перевантажувального обладнання.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами та постановка наукового завдання

Дисертаційне дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи № ДР0122U201676 «Розвиток теорії обґрунтування і вибору конструктивних та технологічних параметрів технічних об'єктів галузевого машинобудування» зі строком виконання 2023–2025 рр. Тематика дисертації безпосередньо відповідає завданням розвитку методів розрахунку й проектування машин за критеріями їх динамічної працездатності.

Наукове завдання дисертації полягає в обґрунтуванні конструктивних і режимних параметрів врівноваженого колосьникового грохота-перевантажувача шляхом розроблення та експериментальної перевірки математичної моделі, що описує стаціонарний і нестационарний ударний режими з урахуванням масово-інерційних, жорсткісних, дисипативних і режимних параметрів системи.

Сформульоване наукове завдання має завершений характер, оскільки охоплює послідовний комплекс етапів: аналіз конструктивних схем і відомих методів дослідження; формування розрахункової схеми; розроблення системи диференціальних рівнянь; чисельне дослідження стаціонарних і ударних режимів; експериментальну перевірку встановлених закономірностей; формування

практичних критеріїв та доведення результатів до інженерної методики обґрунтування параметрів.

Важливою позитивною рисою остаточної редакції роботи є те, що інженерна методика не обмежується викладенням у п'ятому розділі, а систематизована в окремому Додатку Б, що підвищує відтворюваність та практичну придатність отриманих результатів.

Мета, об'єкт і предмет дослідження логічно узгоджені з поставленим науковим завданням. Об'єктом є динамічний процес роботи врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача під час транспортування та грохочення сипкої гірничої маси в стаціонарних і нестаціонарних режимах. Предметом дослідження є закономірності його коливального руху, амплітудно-частотні характеристики, фазова узгодженість протифазного руху колосників, ударні перехідні процеси, а також жорсткісні й дисипативні характеристики пружної системи.

3. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень

Теоретичні положення дисертації базуються на методах аналітичної механіки та теорії коливань. Для формування математичної моделі використано рівняння Лагранжа другого роду, що дає змогу в єдиній системі врахувати поступальні та кутові координати робочих органів, кінетичну і потенційну енергії, дисипацію, кінематичне збудження та зовнішні збурення. Такий підхід є обґрунтованим для досліджуваної багатомасової пружно-дисипативної механічної системи.

Розрахункова схема пов'язана з конструктивною структурою реального об'єкта: трьома колосниковими секціями, спільним ексцентриковим приводним валом та пружними опорами. У математичній моделі враховано маси, моменти інерції, розташування центрів мас, жорсткісні характеристики опор, геометричні й кінематичні параметри ексцентрикового збудження. Це дає змогу оцінювати не лише переміщення окремих робочих органів, а й умови компенсації результуючих інерційних реакцій.

Обґрунтованість результатів підсилюється послідовним чисельним дослідженням стаціонарних і нестаціонарних режимів та зіставленням розрахункових результатів з експериментальними даними.

Для експериментальної перевірки використано масштабно узгоджену балкову модель середнього колосника. Застосовано серії повторних ударних випробувань, пряме вимірювання максимального вертикального переміщення та опрацювання часових реалізацій ударного процесу. Для кожної комбінації основних параметрів

виконано по 20 повторів, а для основної серії здійснено статистичне опрацювання результатів.

Методично правильно, що зіставлення розрахункових та експериментальних залежностей виконано у нормованому вигляді. Це дозволило порівнювати характер зміни та форму залежностей без необґрунтованого ототожнення відносного сенсорного сигналу з абсолютним переміщенням.

У сукупності використані теоретичні, чисельні та експериментальні методи забезпечують належний рівень обґрунтованості й достовірності основних положень і висновків дисертації.

4. Основні результати, що мають наукову новизну

До найбільш вагомих результатів дисертаційної роботи, що характеризуються науковою новизною, слід віднести такі.

По-перше, розроблено математичну модель врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача з ексцентриковим приводом, особливістю якої є одночасне врахування поступальних і кутових рухів робочих органів, фазово узгодженого протифазного руху колосників та ударного збурення, заданого через зміну початкових узагальнених швидкостей після контакту з великогабаритним шматком матеріалу.

По-друге, удосконалено підхід до визначення умов динамічного врівноваження багатоколосникової системи шляхом урахування взаємопов'язаного впливу мас, моментів інерції та жорсткісних характеристик середнього і крайніх колосників.

По-третє, набув подальшого розвитку підхід до моделювання нестационарних ударних режимів вібраційних машин, за якого короткочасна дія великогабаритного шматка формує початкові умови подальшого перехідного руху багатомасової системи.

По-четверте, удосконалено методику експериментального оцінювання ударно-затухаючих процесів у фізичній моделі грохота завдяки спільному використанню максимального вертикального переміщення, розмаху першого контактного імпульсу, статистичного оцінювання повторюваності та нормованого зіставлення розрахункових і експериментальних залежностей.

Наукова цінність роботи не обмежується встановленням окремих числових параметрів. Її результатом є формування взаємопов'язаного підходу до вибору параметрів конструкції за поведінкою машини в стаціонарному та ударному нестационарному режимах.

5. Оцінка першого розділу

У першому розділі автор виконав аналіз технологічного призначення колосникових грохотів-перевантажувачів та їх місця у структурі перевантажувальних пунктів. Розглянуто сучасні конструктивні схеми вібраційних грохотів, типи приводів, характер траєкторій робочих органів та способи динамічного врівноваження.

Позитивною рисою розділу є те, що аналіз конструкцій не обмежено їх описовою класифікацією. Переваги та недоліки різних схем оцінено з позиції конкретного наукового завдання дисертації — роботи з крупнокусковою гірничою масою, сприйняття локальних ударів і необхідності зменшення динамічних реакцій, які передаються на основу.

Автор коректно розмежовує самосинхронізацію незалежних віброзбуджувачів і кінематично заданий фазово узгоджений протифазний рух у досліджуваній машині зі спільним ексцентриковим валом. Таке термінологічне уточнення є важливим для правильного трактування фізичної природи досліджуваного процесу.

За результатами літературного аналізу сформульовано наукову прогалину: у межах розглянутих джерел не виявлено цілісної моделі, що одночасно поєднувала б поступальні й кутові рухи колосників, кінематично заданий протифазний режим, умови врівноваження, пружне опирання та локальне імпульсне збурення. На цій основі сформовано наукове завдання дисертації. Така послідовність є логічною та достатньо аргументованою.

6. Оцінка другого розділу

Другий розділ містить основний теоретичний результат дисертаційної роботи.

На основі тривимірної складальної моделі обґрунтовано конструктивне компонування трьох колосникових секцій зі спільним приводним валом. Для контрольного варіанта прийнято радіус ексцентриситету 0,005 м, а фазове положення середнього колосника відносно крайніх задається зміщенням на π рад, що безпосередньо реалізує принцип протифазного кінематичного збудження.

Важливим результатом є формування умов динамічного врівноваження. Маса середнього колосника узгоджується із сумарною масою крайніх, його момент інерції — із сумою моментів інерції крайніх секцій, а жорсткісні характеристики опор — із відповідними сумарними характеристиками крайніх колосників. Це дає змогу зменшувати поступальний та кутовий рух приводного вузла і, відповідно, результуючі інерційні реакції на основу.

Математичну модель сформовано на основі кінетичної та потенційної енергій системи з урахуванням дисипації. Отримана система диференціальних рівнянь приведена до форми, придатної для чисельного інтегрування.

Окремо слід відзначити підхід до моделювання ударної дії. Короткочасний контакт великогабаритного шматка задається через зміну початкових узагальнених швидкостей, після чого досліджується подальший перехідний рух механічної системи. Така ідеалізація суттєво спрощує параметричний аналіз післяударного процесу, водночас автор коректно визначає її межі щодо опису власне контактної фази.

У цілому теоретичний розділ є послідовним, внутрішньо узгодженим і створює необхідну математичну основу для подальшого чисельного та експериментального дослідження.

7. Оцінка третього розділу

У третьому розділі виконано чисельне дослідження динамічних характеристик грохота в стаціонарних і нестаціонарних режимах.

Побудовано та проаналізовано амплітудно-частотні характеристики, визначено положення контрольної робочої точки. Для прийнятого варіанта кутова швидкість становить 74 рад/с, що відповідає частоті 11,78 Гц і приблизно $706,6 \text{ хв}^{-1}$. Основний максимум амплітудно-частотної характеристики розташований у районі 30 рад/с, тому прийнятий робочий режим знаходиться на спадній ділянці характеристики поза основною резонансною областю.

Значну увагу приділено фазово узгодженому руху робочих органів. Розглянуто синфазний режим як небажаний граничний випадок і протифазний режим як робочий стан системи. Аналіз фазових характеристик підтверджує протифазний характер руху середнього колосника відносно крайніх.

Під час одиничного ударного збурення до вимушеного руху додається вільна складова. За прийнятих параметрів вона поступово затухає, після чого система повертається до сталого вимушеного режиму. При цьому переміщення приводного вузла залишаються малими, що є важливим показником збереження динамічного врівноваження після короткочасного порушення робочого процесу.

У роботі досліджено вплив маси ударного тіла, висоти його падіння, поздовжньої складової швидкості та параметрів пружної системи на максимальні переміщення. Це дозволило сформулювати підґрунтя для подальшого вибору раціональних конструктивних і режимних параметрів.

Пусковий режим як окрему завершену чисельну серію автор не досліджував. Водночас загальна математична модель допускає його аналіз за умови задання закону зміни кутової швидкості привода в часі. Така позиція є методологічно коректною, оскільки автор не ототожнює потенційні можливості математичної моделі з фактично виконаним обсягом досліджень.

8. Оцінка четвертого розділу

Четвертий розділ має принципове значення для експериментального підтвердження встановлених теоретичних закономірностей.

Автором розроблено експериментальний стенд із масштабно узгодженою балковою моделлю середнього колосника. Обґрунтовано геометричні та масово-жорсткісні характеристики моделі, вибрано маси ударних тіл і висоти їх падіння. Для кожної комбінації основних параметрів виконано по 20 повторних дослідів, що дає можливість оцінити повторюваність ударного процесу. Для основної серії виконано статистичне опрацювання результатів.

Експериментально встановлено закономірне збільшення максимального вертикального переміщення пружно опертої балки зі зростанням маси ударного тіла та висоти його падіння.

Порівняння розрахункових та експериментальних результатів виконано у нормованій формі. Середнє абсолютне відхилення нормованих значень становить 0,032 для серії з масою ударного тіла 0,05 кг і 0,029 для серії з масою 0,25 кг. Наведені показники характеризують відмінність форми нормованих залежностей, а не похибку абсолютних переміщень, що автор правильно зазначає.

Додаткову практичну цінність має перевірка балкової моделі на працюючому лабораторному грохоті. Встановлено сталу фонову частоту 49,23–49,33 Гц. У центральній точці розмах першого ударного імпульсу приблизно в 11,8 рази перевищував фоновий розмах.

Пошукова серія з використанням проміжного шару піску товщиною 5 ± 1 мм показала зменшення середнього розмаху першого ударного імпульсу приблизно на 49,2 %, а післяударного розмаху — приблизно на 45,5 %. Отриманий результат має практичний інтерес для подальших досліджень контактної-податливого шару дрібного матеріалу як засобу зниження локальної ударної дії.

У цілому експериментальна частина логічно пов'язана з теоретичним дослідженням і підтверджує основні тенденції, отримані під час математичного моделювання.

9. Оцінка п'ятого розділу та практичного значення результатів

П'ятий розділ виконує функцію інженерного узагальнення результатів попередніх етапів дослідження.

Результати теоретичного, чисельного та експериментального аналізу систематизовано у вигляді послідовної методики обґрунтування конструктивних і режимних параметрів врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача.

Методика передбачає формування технологічних вихідних даних та обмежень, визначення геометричних параметрів робочої поверхні, вибір геометричних, масово-інерційних і кінематичних параметрів ексцентрикового збудження, частотне обґрунтування режиму та узгодження швидкості з електроприводом, забезпечення фазового співвідношення руху робочих органів, розрахунок пружної й дисипативної системи, а також перевірку стаціонарного та нестаціонарного ударного режимів.

Для промислового проектування принципово важливим є те, що критерії прийнятності проектних параметрів не обмежуються номінальною продуктивністю або заданою амплітудою коливань. Вони охоплюють положення робочої точки відносно резонансної області, масово-інерційне та жорсткісне узгодження колосникових секцій, фазове співвідношення $0/\pi/0$, дисипативні властивості опор і характеристики ударного відгуку.

Особливо слід відзначити, що в остаточній редакції дисертації розроблену методику не обмежено описом у п'ятому розділі. Її систематизовано в окремому Додатку Б «Методика обґрунтування параметрів врівноважених колосникових грохотів-перевантажувачів з урахуванням розрахунково-моделювального аналізу та експериментальної перевірки».

У такому поданні методика виконує функцію самостійного інженерного алгоритму, який пов'язує вихідні дані, вибір конструктивних і режимних параметрів, математичне моделювання, чисельну перевірку динамічних режимів, експериментальне оцінювання та прийняття рішення щодо прийнятності параметрів. Це суттєво підвищує відтворюваність результатів і їх придатність до практичного застосування.

Практичне значення дисертаційного дослідження також підтверджується використанням його результатів у НДР № ДР0122U201676, впровадженням у навчальний процес кафедри інжинірингу та дизайну в машинобудуванні НТУ «Дніпровська політехніка», передаванням методичних результатів для практичного застосування у ТОВ «Океанмашенерго» та використанням розрахунково-моделювального й алгоритмічного блоку методики у ТОВ «Паритет СОФТ».

Таким чином, результати дисертації доведені від математичної постановки та встановлення динамічних закономірностей до конкретної інженерної процедури вибору і перевірки параметрів грохота-перевантажувача.

10. Повнота опублікування результатів та особистий внесок здобувача

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 14 наукових праць, із яких 6 відображають основні наукові результати дисертації, а 8 засвідчують апробацію її матеріалів.

Опубліковані роботи охоплюють основні складові дисертаційного дослідження: динаміку врівноваженого грохота-перевантажувача з ексцентриковим приводом, просторові коливання робочого органа, нестационарний ударний процес, експериментальний ударний відгук балкової моделі та обґрунтування жорсткісних параметрів пружних опор. Це свідчить про достатню повноту висвітлення основних результатів роботи у наукових публікаціях.

Особистий внесок здобувача у працях, виконаних у співавторстві, конкретизовано. До нього належать формування розрахункової схеми, підготовка вихідних даних, участь у побудові математичної моделі, виконання чисельного моделювання, аналіз динамічних режимів та узагальнення результатів.

Самостійні публікації автора стосуються моделювання ударного перехідного процесу, експериментального дослідження ударного відгуку та обґрунтування жорсткісних характеристик пружних опор, тобто безпосередньо відображають ключові складові дисертаційної роботи.

11. Академічна доброчесність

У дисертаційній роботі наведено посилання на використані літературні й технічні джерела, а в переліку публікацій конкретизовано особистий внесок здобувача у роботи, виконані у співавторстві.

За змістом представлених матеріалів використані положення інших авторів відокремлені від власних результатів здобувача. Підстав для сумніву в самостійному характері основних результатів дослідження не вбачається.

Остаточна оцінка відсутності академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації результатів має здійснюватися також з урахуванням матеріалів офіційної перевірки дисертації, передбаченої процедурою атестації.

12. Дискусійні питання та зауваження до дисертаційної роботи

Незважаючи на позитивну загальну оцінку дисертаційного дослідження, окремі положення роботи мають дискусійний характер або визначають перспективні напрями його подальшого розвитку.

1. Ударне збурення моделюється через зміну початкових узагальнених швидкостей після короткочасного контакту. Такий підхід ефективний для аналізу післяударного руху, але не визначає пікову контактну силу, тривалість контакту та розподіл контактного тиску. Доцільно було б чіткіше сформулювати кількісний критерій, за якого тривалість контакту вважається малою порівняно з характерними періодами системи.

2. Реальний технологічний потік має розподілений і випадковий характер. У дисертації матеріал враховується переважно через локальний удар та експериментальний вплив проміжного шару. Подальший розвиток роботи доцільно пов'язати з урахуванням доданої маси, розподіленого контакту та взаємодії колосникової поверхні із шаром сипкого матеріалу.

3. Для практичного забезпечення врівноваження важливими є допуски на масу, момент інерції, координати центрів мас, жорсткість опор і фазове положення ексцентриків. У методиці бажано було б окремо визначити допустимі відхилення цих параметрів та їх вплив на залишкові реакції на основу.

4. Під час експлуатації колосникової поверхні відбувається абразивне зношування, що поступово змінює масу й геометрію робочих органів. Було б доцільно оцінити, наскільки знос секцій може порушувати умови динамічного врівноваження протягом міжремонтного періоду.

5. Розроблена методика орієнтована на динамічну працездатність і справедливо не підміняє технологічний розрахунок грохочення. Водночас для промислового впровадження корисним було б показати, як результати динамічного розрахунку інтегруються з вимогами до продуктивності, крупності живлення та ефективності попереднього розділення.

6. Експериментальна верифікація проведена на лабораторній установці. Подальша натурна перевірка на промисловому грохоті-перевантажувачі дозволила б оцінити масштабний ефект, реальні спектри ударів та вплив довготривалої експлуатації.

7. У роботі наведено очікуваний інженерно-економічний ефект на якісному рівні. Для практичного використання методики підприємствами доцільно було б доповнити її техніко-економічним порівнянням традиційної та врівноваженої схем за

показниками металоємності, ресурсу опор, ремонтних витрат і навантажень на фундамент.

Наведені зауваження мають дискусійний і рекомендаційний характер, переважно визначають напрями подальшого розвитку запропонованої математичної та інженерної методології, не ставлять під сумнів правильність основних одержаних результатів і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

13. Загальний висновок

Дисертаційна робота Гавриленка Станіслава Сергійовича «Обґрунтування параметрів врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача на основі математичного моделювання нестационарних режимів роботи» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-технічне завдання галузевого машинобудування.

У роботі одержано нові науково обґрунтовані результати щодо математичного опису врівноваженої багатоколосникової механічної системи, умов її динамічного врівноваження, моделювання нестационарного ударного процесу та експериментального оцінювання ударно-затухаючого відгуку.

Теоретичні результати підтверджені чисельними дослідженнями та експериментальною перевіркою. Встановлені закономірності доведені до завершеної інженерної методики обґрунтування параметрів врівноважених колосникових грохотів-перевантажувачів, систематизованої в окремому додатку до дисертації, а також до практичних рекомендацій щодо вибору параметрів привода, пружної системи, фазового узгодження та оцінювання ударних режимів.

Особливо позитивно слід оцінити логічний зв'язок між усіма етапами дослідження: аналізом конструкцій і наукової проблеми, формуванням математичної моделі, чисельним аналізом, експериментальною перевіркою та інженерним узагальненням отриманих результатів.

Здобувач продемонстрував належний рівень володіння методологією наукової діяльності, методами аналітичної механіки, теорії коливань, математичного і чисельного моделювання, експериментальних досліджень та статистичного опрацювання результатів. Публікації достатньою мірою відображають основні результати дисертації.

За актуальністю теми, рівнем наукової новизни, ступенем обґрунтованості й достовірності результатів, відповідністю поставленій меті та спеціальності, практичним значенням, повнотою опублікування результатів і рівнем виконання наукового завдання дисертаційна робота Гавриленка Станіслава Сергійовича

відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44 зі змінами.

Вважаю, що Гавриленко Станіслав Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Офіційний опонент: доктор
технічних наук, професор,
завідувач кафедри інжинірингу
з галузевого машинобудування
Державного університету
економіки і технологій

Володимир ЗАСЕЛЬСЬКИЙ