

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»
доктору технічних наук, професору
Тарану І. О.
Відгук рецензента
Федоскіної Олени Валеріївни,
кандидата технічних наук, доцента,
доцента кафедри конструювання,
технічної естетики і дизайну
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»
на дисертаційну роботу
Гавриленка Станіслава Сергійовича
«Обґрунтування параметрів
врівноваженого колосникового грохота-
перевантажувача на основі математичного
модельювання нестационарних режимів
роботи»,
подану на здобуття ступеня доктора
філософії з галузі знань 13 «Механічна
інженерія» за спеціальністю 133 «Галузеве
машинобудування»

1. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота С. С. Гавриленка присвячена обґрунтуванню конструктивних і режимних параметрів врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача з ексцентриковим приводом на основі математичного моделювання його стаціонарних та нестационарних ударних режимів роботи.

Робота має чітко виражену інженерно-конструкторську спрямованість. Досліджуваний грохот розглядається не як сукупність окремих деталей або вузлів, а як взаємопов'язана механічна система, що включає три колосникові секції, ексцентриковий привод, пружні опори, підшипникові вузли та несучі елементи. Вибір параметрів виконується з урахуванням динамічної працездатності всієї конструкції, а не лише локальних характеристик окремих її елементів.

Такий підхід є принципово важливим для конструювання врівноважених вібраційних машин. У подібних системах зміна маси, моменту інерції, жорсткості опори, ексцентриситету або частоти обертання привода неминуче впливає на інші динамічні характеристики. Тому конструктивні та режимні параметри мають визначатися не ізолювано, а в межах єдиного розрахункового алгоритму.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Логіка викладення відповідає послідовності виконання повноцінного інженерного дослідження: від аналізу відомих конструкцій і визначення наукової прогалини - до формування розрахункової схеми, математичної моделі, чисельного дослідження, фізичного експерименту та формування методики інженерного обґрунтування параметрів.

Особливо слід відзначити завершеність дисертації. Результати п'ятого розділу не залишаються лише у вигляді загальних проєктних рекомендацій, а систематизовані в окремому Додатку Б **«Методика обґрунтування параметрів врівноважених колосникових грохотів-перевантажувачів з урахуванням розрахунково-моделювального аналізу та експериментальної перевірки»**. Це підсилює інженерну спрямованість і практичну відтворюваність одержаних результатів.

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 удосконалення методів проєктування та оцінювання динамічної працездатності технічних об'єктів галузевого машинобудування.

2. Актуальність теми дослідження

Актуальність теми визначається складними умовами функціонування перевантажувальних пунктів гірничих підприємств, де робочі органи, бункерні конструкції та транспортне обладнання сприймають нерівномірний потік гірничої маси і короткочасні ударні навантаження від падіння великогабаритних шматків.

Такі дії мають принципово нестационарний характер і можуть формувати максимальні динамічні навантаження, значно більші за навантаження, які виникають у сталому режимі. Вони впливають на переміщення робочих органів, деформації пружних елементів, реакції опор, навантаження на привод та ресурс несучих елементів.

Одним із конструктивно перспективних напрямів зниження навантаження на основу є застосування врівноважених багатоколосьникових систем, у яких інерційні дії окремих робочих органів частково або повністю компенсуються завдяки заданому співвідношенню їх рухів.

У досліджуваній конструкції цей принцип реалізується спільним ексцентриковим валом, який задає синфазний рух крайніх колосьників і протифазний рух середнього колосьника. Однак саме по собі геометрично задане фазове співвідношення не гарантує повного динамічного врівноваження. Необхідно також узгоджувати маси, моменти інерції та жорсткісні характеристики відповідних секцій.

З конструкторської точки зору важливо, що ефективність такого принципу залежить від комплексу взаємопов'язаних параметрів: геометрії робочих органів, мас та моментів інерції, розташування центрів мас, жорсткості опор, ексцентриситету, кутової швидкості, фазових кутів і дисипативних характеристик.

Отже, задача не може бути розв'язана лише шляхом збільшення міцності або жорсткості конструкції. Потрібен комплексний динамічний підхід, який дає змогу ще на етапі проектування оцінити поведінку системи як у стаціонарному, так і в ударному нестационарному режимі.

Важливою перевагою дисертації є те, що стаціонарний режим не ототожнюється з повною картиною роботи машини. Автор обґрунтовано включає до аналізу локальний удар та подальший перехідний процес, що суттєво наближає постановку задачі до реальних умов експлуатації.

Таким чином, тема роботи є актуальною як із теоретичної точки зору розвитку методів розрахунку вібраційних машин, так і з позицій практичного конструювання обладнання, здатного працювати в умовах значних короточасних динамічних навантажень.

3. Ступінь обґрунтованості наукового завдання, положень і висновків

Наукове завдання дисертації сформульовано як обґрунтування 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 та режимних параметрів системи. Таке формулювання відповідає фактичному змісту роботи.

Мета, об'єкт, предмет та завдання дослідження взаємно узгоджені.

Методичну основу роботи становлять положення аналітичної механіки, теорії коливань, рівняння Лагранжа другого роду, багатомасове динамічне моделювання та чисельне інтегрування систем диференціальних рівнянь.

З конструктивної точки зору принципово важливо, що математична модель не обмежується однією поступальною координатою. Ураховано поступальні й кутові рухи колосників, що дозволяє описувати реальні переміщення характерних точок робочих органів і враховувати вплив моментів від сил, лінії дії яких не проходять через центри мас.

Для опису пружної системи використано еквівалентні жорсткісні та дисипативні характеристики гумометалевих опор. Ударну дію введено через зміну початкових узагальнених швидкостей після короткочасного контакту. Це дозволяє досліджувати подальший післяударний перехідний процес без надмірного ускладнення базової математичної моделі.

Експериментальна частина включає реєстрацію часових реалізацій ударного відгуку, пряме вимірювання максимального вертикального переміщення, статистичне опрацювання повторних дослідів та нормоване порівняння розрахункових і експериментальних залежностей.

Обґрунтованість висновків забезпечується послідовним зв'язком усіх етапів дослідження. Конструктивна модель використовується для формування розрахункової схеми; математична модель - для чисельного параметричного аналізу; отримані закономірності перевіряються експериментально; теоретичні та експериментальні результати переводяться в інженерну методику.

Такий логічний ланцюг є методично правильним і відповідає сучасному підходу до конструювання складних механічних систем.

4. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи сформульована відповідно до фактично отриманих результатів.

До основних положень, які характеризуються науковою новизною, належать:

- розроблення математичної моделі 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;

- удосконалення підходу до визначення умов динамічного врівноваження багатоколосьникової системи шляхом урахування взаємопов'язаного впливу мас, моментів інерції та жорсткісних характеристик середнього і крайніх колосьників;
- подальший розвиток підходу до моделювання нестационарних ударних режимів вібраційних машин, у якому короткочасна дія великогабаритного шматка формує початкові умови подальшого перехідного руху багатомасової системи;
- удосконалення методики експериментального оцінювання ударно-затухаючих процесів у фізичній моделі грохота за рахунок спільного використання максимального вертикального переміщення, розмаху першого контактного імпульсу, статистичного оцінювання повторюваності та нормованого зіставлення розрахункових і експериментальних залежностей.

З позицій конструювання машин особливо вагомим є положення щодо умов динамічного врівноваження.

У дисертації показано, що врівноваження багатоколосьникової конструкції не може зводитися лише до забезпечення заданого співвідношення мас. Необхідно одночасно забезпечити відповідне співвідношення моментів інерції та жорсткісних характеристик опор.

Це має безпосередній конструкторський зміст. Момент інерції визначається не тільки масою деталі, а й розподілом цієї маси відносно осі руху; жорсткість залежить від конструкції, геометрії та матеріалу пружного елемента. Отже, умови врівноваження фактично стають вимогами до конструктивного виконання всієї системи.

Важливим є також уточнення остаточного варіанта дисертації щодо масово-інерційних характеристик привода. Для контрольної моделі наведені маси колосьників 590/1180/590 кг доповнюються приведеними масами підшипникових вузлів, унаслідок чого у рівняннях руху використовуються приведені маси 830/1660/830 кг та відповідні приведені моменти інерції 2900/5800/2900 кг·м². Співвідношення середнього елемента із сумарними параметрами двох крайніх розглядається як масово-інерційна передумова врівноваження.

5. Оцінка змісту дисертації за розділами

У першому розділі виконано аналіз призначення колосьникових грохотів-перевантажувачів, конструкцій сучасних вібраційних грохотів, характерних динамічних процесів, математичних моделей та методів експериментального дослідження.

Позитивним є те, що літературний і конструктивний огляд використано не як самостійний опис відомих технічних рішень, а як інструмент для визначення конкретної наукової прогалини.

Автор виділяє недостатнє комплексне врахування ударних нестационарних режимів, поступальних і кутових координат робочих органів, умов компенсації сил і моментів, властивостей пружного опирання та експериментальної перевірки.

Коректним є також розмежування самосинхронізації незалежних віброзбуджувачів та кінематично заданого фазово узгодженого протифазного руху у конструкції зі спільним ексцентриковим валом.

За результатами аналізу обґрунтовано вибір врівноваженої багатоколосьникової схеми з ексцентриковим приводом.

Другий розділ є теоретичною основою дисертаційної роботи.

На основі тривимірної складальної моделі уточнено конструктивне компонування трьох колосьникових секцій, підшипникових вузлів, спільного ексцентрикового вала та пружного опирання.

Для контрольного варіанта прийнято радіус ексцентриситету $r = 0,005$ м, відповідний повний геометричний хід ексцентрикового вузла становить 10 мм. Фазування задається як $0/\pi/0$: крайні колосьники рухаються синфазно, середній - у протифазі.

Важливим результатом є умови динамічної врівноваженості, відповідно до яких маса та момент інерції середнього колосьника мають узгоджуватися із сумарними характеристиками крайніх колосьників, а жорсткість його опор - із сумарною жорсткістю опор крайніх секцій.

Таке формулювання має не лише теоретичне, а й безпосереднє конструкторське значення, оскільки визначає вимоги до компонування секцій та параметрів пружних елементів.

Отримана система диференціальних рівнянь приведена до форми, придатної для чисельного інтегрування. Ударне збурення задається зміною початкових швидкостей, що забезпечує можливість моделювати подальший післяударний рух.

У третьому розділі проведено чисельне дослідження стаціонарного режиму, фазово узгодженого руху, поздовжніх перехідних процесів та нестационарного ударного навантаження.

Для контрольної конструкції прийнято робочу кутову швидкість **74 рад/с**, що відповідає частоті приблизно **11,78 Гц** і частоті обертання близько **706,6 хв⁻¹**. Основний виражений максимум повної амплітудно-частотної характеристики

знаходиться приблизно в області 30 рад/с, а робоча точка розташована на її спадній ділянці.

В остаточній редакції дисертації частотний вибір обґрунтовується не ізольованим порівнянням робочої частоти з однією власною частотою спрощеної системи, а за повною амплітудно-частотною характеристикою багатокоординатної моделі, що є більш коректним для складної пружно-інерційної системи.

Виконано аналіз синфазного та протифазного режимів. Показано, що робочим є протифазний рух середнього колосника відносно крайніх.

Під час ударного збурення до вимушеної складової додається вільна складова руху. Після її затухання система повертається до усталеного режиму.

Важливо, що пусковий процес у дисертації не видається за повністю досліджений режим. Загальна форма рівнянь допускає його моделювання після задання конкретного закону зміни кутової швидкості в часі, однак окрема оптимізація закону розгону не виконувалася.

Четвертий розділ присвячено експериментальній перевірці розрахункових закономірностей.

Автором сформовано масштабно узгоджену балкову модель середнього колосника, обґрунтовано маси ударних тіл і висоти падіння, реалізовано пряме вимірювання максимального вертикального переміщення та реєстрацію часових реалізацій ударного процесу.

Для кожної комбінації основних експериментальних параметрів виконано по 20 повторів, що підвищує статистичну обґрунтованість висновків.

Порівняння розрахункових і експериментальних результатів виконано за нормованими залежностями. Середнє абсолютне відхилення нормованих значень становить 0,032 для серії з масою ударного тіла 0,05 кг та 0,029 для серії з масою 0,25 кг.

Під час дослідження балкової моделі на працюючому лабораторному грохоті встановлена фонові частота 49,23-49,33 Гц. У центральній точці перший ударний імпульс приблизно в 11,8 разів перевищує фоновий розмах.

Особливої практичної уваги заслуговує експеримент із проміжним шаром піску товщиною 5 ± 1 мм, за якого середній розмах першого ударного імпульсу зменшується приблизно на **49,2 %**, а післяударний розмах - приблизно на **45,5 %**.

Цей результат має очевидне конструктивно-технологічне значення, оскільки свідчить про можливість цілеспрямовано змінювати контактні умови в зоні завантаження і тим самим знижувати локальну ударну дію на робочий орган.

У п'ятому розділі результати теоретичного, чисельного та експериментального досліджень перетворені на систему інженерних рекомендацій і методику обґрунтування параметрів.

Особливо важливим для остаточної редакції є уточнення структури підрозділу 5.2. Параметри привода розглядаються не ізольовано, а у взаємозв'язку з масово-інерційними характеристиками рухомої системи. Підрозділ 5.2.1 присвячено геометричним, масово-інерційним та кінематичним параметрам ексцентрикового збудження, а 5.2.2 - частотному обґрунтуванню та узгодженню швидкості з електроприводом.

Це є істотним покращенням конструкторської логіки роботи, оскільки привод розглядається не як незалежний вузол, а як складова всієї динамічної системи.

Методика також охоплює фазове узгодження, перевірку потужності привода, вибір жорсткостей опор, дисипативних характеристик, забезпечення вібростійкості гумометалевих елементів, рекомендації щодо зменшення ударних дій та підвищення ресурсу системи.

Таким чином, п'ятий розділ логічно завершує дослідження та переводить теоретичні закономірності у площину практичного проектування.

6. Практичне значення та впровадження результатів

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у можливості використання розробленої математичної моделі, розрахункових залежностей та методичних рекомендацій для попереднього вибору параметрів робочих органів, гумометалевих опор, ексцентрикового привода та режимів роботи врівноважених колосникових грохотів-перевантажувачів.

Розроблена методика може використовуватися як під час створення нової машини, так і під час модернізації існуючої конструкції.

Для нового проектування вона задає логічну послідовність визначення взаємопов'язаних параметрів. Для модернізації - дозволяє встановити, які з параметрів існуючої системи можуть бути причиною підвищених реакцій, надмірних переміщень або несприятливого фазового режиму.

Окрему прикладну цінність мають рекомендації щодо:

- масово-інерційного та жорсткісного узгодження секцій;
- фазового співвідношення $0/\pi/0$;
- вибору робочої області за повною амплітудно-частотною характеристикою;
- узгодження робочої швидкості з електроприводом;
- вибору пружних і дисипативних параметрів гумометалевих опор;

- оцінювання післяударного переміщення та затухання;
- застосування контактної-податливого проміжного шару для зниження ударного навантаження.

Особливо слід відзначити розгорнутий **Додаток Б**, який у варіанті № 2 перетворено на окремий інженерний документ. Він систематизує послідовність переходу від вихідних даних до вибору параметрів, математичного моделювання, чисельної перевірки режимів, експериментального оцінювання та прийняття інженерного рішення.

Фактично формується завершений алгоритм: **вихідні технологічні та конструктивні дані → геометричні й масово-інерційні параметри → пружна система → частотний аналіз → параметри привода → фазове узгодження → математична модель → стаціонарний режим → ударний режим → експериментальна перевірка → критерії прийнятності.**

Саме така послідовність є найбільш цінною з позицій конструювання машин, оскільки дає можливість використовувати наукові результати не лише для пояснення вже відомої конструкції, а і як основу для прийняття проєктних рішень.

Практичне використання результатів підтверджується їх застосуванням у межах НДР № ДР0122U201676, у навчальному процесі кафедри інжинірингу та дизайну в машинобудуванні НТУ «Дніпровська політехніка», а також передаванням результатів для практичного застосування до ТОВ «Океанмашенерго» та ТОВ «Паритет СОФТ».

7. Повнота викладення результатів у публікаціях та апробація

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

Тематика публікацій відповідає основним складовим дисертації та охоплює динаміку врівноваженого грохота з ексцентриковим приводом, просторові коливання робочого органа, моделювання ударного перехідного процесу, експериментальне дослідження ударного відгуку та обґрунтування жорсткісних параметрів пружних опор.

Самостійні публікації здобувача безпосередньо присвячені нестационарному ударному процесу, експериментальній перевірці та обґрунтуванню жорсткісних параметрів, тобто основним складовим виконаного дисертаційного дослідження.

Апробація результатів здійснювалася на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях упродовж 2023-2026 років.

Отже, основні наукові результати роботи достатньо повно відображені у публікаціях та пройшли необхідну апробацію.

8. Академічна доброчесність

У дисертації наведено бібліографічні посилання на використані джерела, а в переліку публікацій окремо визначено особистий внесок здобувача у роботи, виконані у співавторстві.

За змістом представлених матеріалів положення інших авторів відокремлені від власних результатів здобувача.

Особистий внесок С. С. Гавриленка охоплює формування розрахункової схеми, підготовку вихідних даних, участь у побудові математичної моделі, виконання чисельного аналізу, самостійне дослідження ударного перехідного процесу, проведення експериментальних досліджень та обґрунтування жорсткісних параметрів пружної системи.

Представлені матеріали дають підстави вважати основні результати дисертації результатом самостійної наукової роботи здобувача.

Остаточна оцінка дотримання академічної доброчесності здійснюється також з урахуванням матеріалів офіційної перевірки дисертації відповідно до встановленої процедури атестації.

9. Зауваження та дискусійні положення

Поряд із загальною позитивною оцінкою дисертаційної роботи до її окремих положень можна висловити такі зауваження та рекомендації.

1. Під час визначення параметрів гумометалевих опор застосовано еквівалентні жорсткісні та дисипативні характеристики. Для інженерного проєктування доцільно було б ширше окреслити діапазон деформацій, у якому таке лінеаризоване представлення зберігає достатню точність, оскільки реальні гумометалеві елементи можуть мати виражену нелінійність.

2. Умови динамічного врівноваження сформульовано для узгоджених мас, моментів інерції та жорсткостей. У промисловому виконанні неминучими є технологічні й монтажні відхилення цих параметрів. Доцільним було б доповнити методику оцінкою допустимих виробничих відхилень, за яких залишкова невірноваженість не перевищує прийнятного рівня.

3. Експериментальна перевірка виконана на масштабній балковій моделі та лабораторному грохоті. Для завершення переходу від моделі до промислової

конструкції бажаною є подальша натурна кількісна валідація на повнорозмірному грохоті-перевантажувачі з реальним потоком гірничої маси.

4. Виявлений ефект зменшення ударного імпульсу за наявності шару дрібного матеріалу є практично важливим. Подальший розвиток роботи доцільно пов'язати з визначенням впливу не тільки товщини, а й гранулометричного складу, вологості та ступеня ущільнення такого шару.

5. У низці рисунків і графічних матеріалів зосереджено значний обсяг інформації. Для використання методики як інженерного документа доцільно було б у подальшому уніфікувати графічні позначення та виділити окремі розрахункові схеми для стаціонарного, ударного і пускового режимів.

Наведені зауваження мають переважно рекомендаційний характер. Вони стосуються подальшого розвитку математичної моделі, поглиблення конструкторського обґрунтування, метрологічного та експериментального підтвердження і практичної адаптації запропонованої методики.

Зазначені зауваження не ставлять під сумнів правильність основних результатів, не спростовують сформульованих наукових положень і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

10. Загальний висновок

Дисертаційна робота Гавриленка Станіслава Сергійовича **«Обґрунтування параметрів врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача на основі математичного моделювання нестационарних режимів роботи»** є завершеною самостійною науковою працею, у якій розв'язано актуальне науково-технічне завдання галузевого машинобудування.

У роботі розроблено математичну модель врівноваженої багатоколосникової механічної системи з урахуванням поступальних та кутових рухів робочих органів, визначено взаємопов'язані умови масово-інерційного й жорсткісного врівноваження, досліджено фазово узгоджений протифазний рух та нестационарний ударний процес.

Теоретичні положення підтверджені чисельними та експериментальними дослідженнями. Встановлено закономірності впливу конструктивних і режимних параметрів на динамічну поведінку системи та сформульовано відповідні рекомендації для проєктування.

З позицій конструювання машин особливо важливим є те, що результати дисертації не обмежуються окремими розрахунковими залежностями. Автором сформовано взаємопов'язану систему вимог до мас, моментів інерції, жорсткостей,

геометричних і кінематичних параметрів ексцентрикового збудження, робочої частоти, фазового співвідношення та параметрів пружної системи.

В остаточній редакції дисертації додатково посилено інженерну завершеність роботи: уточнено склад масово-інерційних і кінематичних параметрів привода, частотне обґрунтування пов'язано з узгодженням швидкості з електроприводом, а загальну процедуру обґрунтування параметрів оформлено як самостійну методику у Додатку Б.

Таким чином, у дисертації сформовано завершений науково-інженерний ланцюг: **аналіз конструкцій і проблеми → формування розрахункової схеми → математична модель → чисельне дослідження → фізична верифікація → інженерна методика → практичні рекомендації.**

Отримані результати характеризуються науковою новизною, достатнім ступенем теоретичного та експериментального обґрунтування, практичною спрямованістю та належною повнотою оприлюднення. Здобувач продемонстрував належний рівень володіння методами аналітичної механіки, теорії коливань, математичного й чисельного моделювання, конструкторського аналізу, експериментального дослідження та статистичного опрацювання даних.

Зміст дисертаційної роботи відповідає її темі та предметній області спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». За актуальністю теми, науковим рівнем, новизною одержаних результатів, ступенем їх обґрунтованості й достовірності, практичним значенням, рівнем виконання наукового завдання, повнотою оприлюднення результатів та рівнем оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності дисертаційна робота відповідає вимогам **Порядку присудження ступеня доктора філософії**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44 зі змінами. **Гавриленко Станіслав Сергійович** заслуговує на **присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».**

Рецензент: кандидат
технічних наук, доцент,
доцент кафедри
конструювання, технічної
естетики і дизайну
Національного технічного
університету «Дніпровська
політехніка»

Олена ФЕДОСКИНА