

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»

доктору технічних наук, професору
Тарану І. О.

Відгук рецензента Ільїної Інни Сергіївни,
кандидата технічних наук, доцента, доцента
кафедри інжинірингу та дизайну в
машинобудуванні Національного технічного
університету «Дніпровська політехніка» на
дисертаційну роботу Гавриленка Станіслава
Сергійовича «Обґрунтування параметрів
врівноваженого колосникового грохота-
перевантажувача на основі математичного
моделювання нестационарних режимів роботи»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії з
галузі знань 13 «Механічна інженерія» за
спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

1. Загальна оцінка та актуальність дисертаційної роботи

Дисертаційна робота С. С. Гавриленка присвячена обґрунтуванню конструктивних і режимних параметрів врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача з ексцентриковим приводом на основі дослідження його динаміки у стаціонарних та нестационарних ударних режимах.

Характерною рисою роботи є послідовне поєднання математичного моделювання багатокоординатної механічної системи, чисельного аналізу її динамічних характеристик, експериментальної перевірки основних розрахункових закономірностей та доведення отриманих результатів до інженерної методики вибору і перевірки параметрів грохота-перевантажувача.

Актуальність дослідження визначається особливостями функціонування вібраційного перевантажувального обладнання в реальних технологічних умовах. Поряд із усталеним вимушеним коливальним процесом такі машини працюють за змінного завантаження та сприймають локальні ударні дії, спричинені падінням окремих великогабаритних шматків гірничої маси. Ударне збурення здатне короткочасно змінювати динамічний стан механічної системи, збільшувати переміщення робочих органів та пружних опор, порушувати усталений характер руху і формувати додаткові навантаження на елементи конструкції.

Для врівноваженої багатоколосьникової системи ця задача є особливо важливою, оскільки зменшення реакцій, що передаються на основу, забезпечується не одним конструктивним параметром, а узгодженим співвідношенням мас, моментів інерції, жорсткостей опор і фазового положення робочих органів.

Особливістю досліджуваної конструкції є спільний ексцентриковий привод, який кінематично задає протифазний рух середнього колосьника відносно крайніх. Тому в роботі обґрунтовано розмежовано самосинхронізацію незалежних віброзбуджувачів і фазово узгоджений протифазний рух, сформований геометрією єдиного приводного механізму.

У дисертації достатньо чітко сформульована наукова суперечність. З одного боку, для виконання технологічних функцій необхідна інтенсивна динамічна дія робочої поверхні на матеріал, з іншого — збільшення динамічної активності системи та виникнення ударних збурень можуть спричинити небажані реакції, надмірні переміщення і зростання навантажень на опорні та приводні елементи.

Розв'язання цієї суперечності шляхом обґрунтованого вибору параметрів врівноваженої механічної системи має як теоретичне, так і безпосереднє практичне значення для галузевого машинобудування.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною, відповідає сучасним завданням розвитку вібраційних і перевантажувальних машин та має практичне значення для проєктування і модернізації грохотів-перевантажувачів.

2. Відповідність мети, наукового завдання, завдань і методів дослідження

Мета дисертаційної роботи полягає в обґрунтуванні конструктивних і режимних параметрів врівноваженого колосьникового грохота-перевантажувача на основі математичного моделювання його стаціонарних та нестаціонарних ударних режимів роботи з урахуванням ударного навантаження, спричиненого падінням великогабаритних шматків матеріалу. Таке формулювання відповідає змісту виконаного дослідження.

Наукове завдання полягає в обґрунтуванні зазначених параметрів шляхом розроблення та експериментальної перевірки математичної моделі, що враховує масово-інерційні, жорсткісні, дисипативні та режимні характеристики механічної системи.

Для досягнення поставленої мети автором сформульовано взаємопов'язаний комплекс завдань, який охоплює:

- аналіз конструкцій вібраційних грохотів та методів дослідження їх динаміки;
- обґрунтування розрахункової схеми врівноваженого багатоколосьникового грохота;
- визначення узагальнених координат, масово-інерційних і жорсткісних параметрів;
- формування математичної моделі на основі рівнянь Лагранжа другого роду;
- дослідження стаціонарних і нестаціонарних ударних режимів;
- експериментальну перевірку основних розрахункових закономірностей;

– формування інженерних рекомендацій та методики обґрунтування параметрів.

Вибір методів дослідження є обґрунтованим і відповідає поставленому науковому завданню.

Для опису руху багатомасової механічної системи використано методи аналітичної механіки та теорії коливань. Систему рівнянь руху сформовано за рівняннями Лагранжа другого роду з урахуванням кінетичної та потенційної енергій і дисипативних властивостей пружної системи.

Принципово важливим є врахування не лише поступальних, а й кутових координат колосників. Це дозволяє визначати рух не тільки центрів мас, а й характерних точок робочих органів, тобто повніше відтворювати кінематику досліджуваної конструкції.

Ударну взаємодію подано через зміну початкових узагальнених швидкостей після короткочасного контакту великогабаритного шматка з робочим органом. Таке подання не відтворює детально контактну силу в часі, але є методично прийнятним для дослідження подальшого післяударного перехідного процесу.

Експериментальна частина роботи побудована саме як перевірка тих властивостей механічної системи, які мають принципове значення для математичної моделі: залежності ударного відгуку від маси та висоти падіння, характеру післяударного затухання, впливу пружного опирання, просторового передавання локального збурення та впливу проміжного шару сипкого матеріалу.

Така відповідність між теоретичною постановкою, чисельним моделюванням та експериментальною перевіркою є однією із сильних сторін дисертаційної роботи.

3. Наукова новизна та теоретичне значення одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційного дослідження визначається чотирма взаємопов'язаними положеннями.

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, відповідно до 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 опрацювання повторних дослідів та нормованого зіставлення розрахункових і експериментальних залежностей. Зазначені положення відповідають формулюванням наукової новизни остаточної редакції дисертації.

Теоретичне значення одержаних результатів полягає у формалізації взаємозв'язку між масово-інерційними, жорсткісними, дисипативними та режимними параметрами врівноваженої багатоколосьникової системи та характером її динамічної реакції.

Розроблена модель придатна для варіювання параметрів механічної системи, аналізу амплітудно-частотних характеристик, фазових співвідношень та післяударного перехідного процесу, а також для переходу від узагальнених координат до реальних переміщень характерних точок робочих органів.

Важливим теоретичним аспектом є те, що умови врівноваження розглядаються не лише як масовий баланс. Враховується також узгодження моментів інерції та жорсткісних властивостей пружної системи, що більш повно відповідає фізичній природі досліджуваної багатоколосьникової машини.

4. Аналіз змісту й результатів першого розділу

Перший розділ має аналітичний характер і формує вихідну наукову позицію дисертаційного дослідження.

Автором розглянуто технологічне призначення колосьникових грохотів-перевантажувачів, їх місце у технологічних лініях переробки та транспортування гірничої маси, а також конструктивні особливості сучасних вібраційних машин.

Проведено порівняльний аналіз інерційних, двовібраторних, ексцентрикових, самосинхронізованих та врівноважених схем. Розглянуто вплив типу привода, пружного опирання, характеру траєкторії робочих органів та ступеня динамічного врівноваження на роботу машини.

Окрему увагу приділено стаціонарним, пусковим, перехідним та ударним режимам.

Важливим позитивним результатом першого розділу є коректне розмежування понять самосинхронізації та фазово узгодженого протифазного руху.

У класичній самосинхронізованій системі фазове співвідношення незалежних вібробуджувачів формується внаслідок їх динамічної взаємодії через спільний пружно встановлений робочий орган. У досліджуваному грохоті фазове співвідношення первинно задається конструктивно спільним ексцентриковим валом. Тому застосований автором термін «кінематично заданий фазово узгоджений протифазний рух» більш точно відображає фізичну природу процесу.

За результатами аналізу літературних джерел виділено комплекс питань, недостатньо охоплених існуючими моделями: одночасне врахування поступальних і кутових координат робочих органів, умов компенсації інерційних сил і моментів,

пружного опирання, дисипації, фазово узгодженого руху, локального імпульсного збурення та подальшого післяударного процесу.

Цей висновок логічно приводить до постановки наукового завдання та обґрунтування структури математичної моделі, розробленої у другому розділі.

5. Аналіз змісту й результатів другого розділу

У другому розділі сформовано багатокоординатну розрахункову схему досліджуваної механічної системи.

На основі тривимірної моделі визначено взаємне розташування трьох колосникових секцій, пружних опор та спільного приводного вала. Для контрольної конструкції радіус ексцентриситету становить 0,005 м, а фазове положення середнього колосника відносно крайніх задається зміщенням на π рад.

Використання рівнянь Лагранжа другого роду дозволило системно врахувати кінетичну та потенційну енергії системи, дисипативні властивості пружного опирання та кінематичне збудження.

Важливим результатом другого розділу є встановлення умов динамічного врівноваження. Маса та момент інерції середнього колосника узгоджуються із сумарними відповідними параметрами двох крайніх колосників, а жорсткість його опор — із сумарною жорсткістю опор крайніх секцій.

Фізичний зміст такого підходу полягає у забезпеченні компенсації результуючих інерційних дій і зменшенні руху приводного вузла.

Отримана система диференціальних рівнянь приведена до форми, придатної для чисельного інтегрування.

Позитивно оцінюється те, що математична модель не обмежена визначенням узагальнених координат. Наведено співвідношення, які дозволяють переходити до фактичних переміщень характерних точок робочих органів, що важливо як для інженерної інтерпретації розрахункових результатів, так і для їх зіставлення з експериментальними вимірюваннями.

Окремим елементом математичної постановки є моделювання локального ударного збурення шляхом зміни початкових узагальнених швидкостей. Такий підхід дозволяє досліджувати нестационарну післяударну реакцію багатомасової системи без необхідності вводити складну контактну модель безпосередньо до основної системи рівнянь.

У цілому другий розділ формує достатньо послідовну теоретичну основу для подальшого чисельного й експериментального дослідження.

6. Аналіз змісту й результатів третього розділу

У третьому розділі виконано чисельне дослідження динамічних характеристик грохота у стаціонарних та нестационарних режимах.

Розглянуто амплітудно-частотні характеристики, стаціонарний вимушений рух, фазово узгоджений режим, поздовжні перехідні процеси та ударне нестационарне збурення.

Показано, що робочим для врівноваженої конструкції є протифазний режим із фазовим зсувом π рад між середнім та крайніми колосниками, тоді як синфазний рух розглядається як небажаний граничний випадок, за якого інерційні дії робочих органів підсумовуються.

Для контрольного варіанта прийнято робочу кутову швидкість 74 рад/с, що відповідає частоті приблизно 11,78 Гц та частоті обертання близько 706,6 хв⁻¹.

Основний виражений максимум повної амплітудно-частотної характеристики знаходиться приблизно в області 30 рад/с, а прийнята робоча точка розташована на спадній ділянці характеристики, праворуч від основного резонансного максимуму.

Такий підхід до вибору робочої області є методично обґрунтованим, оскільки остаточне рішення приймається за поведінкою повної багатокоординатної системи, а не лише за однією спрощеною оцінкою власної частоти.

Під час моделювання ударного збурення до вимушеного процесу додається вільна складова руху, яка поступово затухає. Після завершення перехідного процесу система повертається до сталого фазово узгодженого режиму, а переміщення приводного вузла залишаються малими.

Проаналізовано вплив маси ударного тіла, висоти падіння та параметрів системи на величину післяударного відгуку. Це дозволило перейти від якісного опису ударного процесу до кількісного обґрунтування параметрів грохота.

Слід позитивно оцінити коректне визначення меж фактично виконаних досліджень. Пусковий процес не досліджувався як окрема завершена чисельна серія. Загальна система рівнянь допускає такий аналіз за умови задання конкретного закону зміни кутової швидкості привода в часі, але оптимізація закону розгону не входила до безпосереднього предмета виконаної роботи.

7. Аналіз змісту й результатів четвертого розділу

Четвертий розділ присвячено експериментальній перевірці основних розрахункових закономірностей нестационарної динаміки.

Обґрунтовано параметри масштабної балкової моделі середнього колосника, вибрано маси ударних тіл та висоти їх падіння.

Експеримент виконано послідовно для статично та пружно опертої балкових схем. Така постановка дала змогу оцінити вплив способу опирання на форму ударного імпульсу та характер післяударного затухання.

Для кожної комбінації маси та висоти виконано по 20 повторних дослідів, а для основної серії визначено статистичні характеристики та довірчі інтервали за довірчої ймовірності $\beta = 0,8$.

Експериментально встановлено закономірне збільшення максимального переміщення зі зростанням маси ударного тіла та висоти падіння.

Розрахункові й експериментальні залежності зіставлено в нормованій формі. 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.

Застосований спосіб порівняння є методично доцільним, оскільки автор не ототожнює безпосередньо абсолютні переміщення повної математичної моделі з локальним експериментальним відгуком фізичної моделі за умов неповної динамічної подібності.

Під час перевірки балкової моделі на працюючому лабораторному грохоті встановлено стабільну частоту фонового вимушеного процесу в діапазоні 49,23–49,33 Гц.

У центральній точці розмах першого ударного імпульсу приблизно в 11,8 раза перевищує фоновий розмах. Це переконливо демонструє принципову відмінність локального нестационарного збурення від усталеного фонового процесу.

Окремий практичний інтерес має експеримент із проміжним шаром піску товщиною 5 ± 1 мм. Його використання зменшує середній розмах першого імпульсу з 67,93 до 34,51 %FS, тобто приблизно на 49,2 %, а післяударний розмах — приблизно на 45,5 %.

Отриманий результат підтверджує можливість використання проміжного шару дрібної фракції як контактно-податливого елемента зниження локальної ударної дії.

Водночас автор правильно обмежує трактування цього результату та не включає його безпосередньо до математичної моделі як повністю описану взаємодію сипкого матеріалу з робочою поверхнею.

8. Аналіз змісту й результатів п'ятого розділу та практичне значення роботи

П'ятий розділ виконує важливу функцію інженерного узагальнення результатів теоретичного, чисельного та експериментального дослідження.

У ньому сформовано методику інженерного обґрунтування параметрів грохота-перевантажувача, відповідно до якої технологічні вимоги задаються як вихідні дані та обмеження, після чого послідовно визначаються конструктивні й режимні параметри механічної системи та здійснюється перевірка їх прийнятності.

Остаточна редакція дисертації істотно уточнює склад параметрів ексцентрикового привода. Підрозділ 5.2.1 присвячено геометричним, масово-інерційним та кінематичним параметрам ексцентрикового збудження, а підрозділ 5.2.2 — частотному обґрунтуванню та узгодженню швидкості з електроприводом.

Такий підхід є доцільним, оскільки пов'язує динамічне обґрунтування параметрів механічної системи з конструктивно реалізованими параметрами привода.

Методика передбачає:

- формування технологічних вихідних даних та обмежень;
- попередній вибір геометричних параметрів;
- визначення параметрів ексцентрикового збудження;

- частотне обґрунтування робочої області;
- узгодження швидкості з електроприводом;
- забезпечення заданого фазового співвідношення;
- вибір параметрів пружної та дисипативної системи;
- перевірку умов масово-інерційного і жорсткісного врівноваження;
- оцінювання стаціонарного режиму;
- перевірку нестаціонарного ударного відгуку;
- формування рішення щодо прийнятності вибраних параметрів.

Позитивною рисою є те, що критерії прийнятності не обмежуються продуктивністю або номінальною амплітудою коливань. Додатково враховуються положення робочої точки відносно резонансної області, фазове співвідношення $0/\pi/0$, масово-інерційне і жорсткісне узгодження секцій, дисипативні властивості опор та характеристики ударного відгуку.

Особливої уваги заслуговує Додаток Б, який у фінальному варіанті дисертації перетворено на розгорнуту самостійну «Методику обґрунтування параметрів врівноважених колосникових грохотів-перевантажувачів з урахуванням розрахунково-моделювального аналізу та експериментальної перевірки».

У такому вигляді практичний результат роботи не обмежується окремими рекомендаціями.

Сформовано завершену послідовність:

вихідні дані → вибір параметрів → масово-інерційне та жорсткісне узгодження → частотна перевірка → параметри електропривода → математична модель → чисельний аналіз → перевірка ударного режиму → експериментальна оцінка → критерії прийняття параметрів.

Це істотно підвищує відтворюваність одержаних результатів і дозволяє розглядати запропоновану методику як самостійний практичний результат дисертаційного дослідження.

Практичне значення роботи також підтверджується використанням її результатів у межах НДР № ДР0122U201676, у навчальному процесі кафедри інжинірингу та дизайну в машинобудуванні НТУ «Дніпровська політехніка», впровадженню методики на підприємстві ТОВ «Океанмашенерго» та застосуванням розрахунково-моделювального й алгоритмічного блоку в ТОВ «Паритет СОФТ». Ці напрями практичного використання зазначено в остаточній редакції дисертації.

Отже, робота має чітко виражену прикладну спрямованість, а її практичні результати логічно впливають із установлених теоретичних та експериментальних закономірностей.

9. Повнота оприлюднення результатів, особистий внесок та академічна доброчесність

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

Тематика публікацій безпосередньо пов'язана зі змістом дисертації та охоплює динаміку врівноваженого грохота з ексцентриковим приводом, просторові коливання робочого органа, моделювання ударного перехідного процесу, експериментальне дослідження ударного відгуку балкової моделі та обґрунтування жорсткісних параметрів пружних опор.

Отже, основні теоретичні, чисельні й експериментальні результати дисертації достатньою мірою представлені в опублікованих працях.

У дисертації наведено посилання на використані літературні та технічні джерела. Для публікацій, виконаних у співавторстві, конкретизовано особистий внесок здобувача.

Автору належать формування та обґрунтування розрахункової схеми, підготовка вихідних даних, участь у побудові математичної моделі, виконання чисельних досліджень, аналіз динамічних режимів, експериментальне дослідження ударного відгуку та узагальнення результатів.

Самостійні публікації здобувача безпосередньо стосуються ключових елементів дисертації: моделювання нестационарного ударного процесу, експериментальної перевірки та обґрунтування параметрів пружної системи.

Представлені матеріали дозволяють відокремити власні результати здобувача від результатів, отриманих у співавторстві.

Підстав для сумніву в самостійному характері основних наукових результатів роботи не вбачається. Остаточний висновок щодо дотримання академічної доброчесності має також ґрунтуватися на результатах офіційної перевірки дисертації, передбаченої процедурою атестації.

10. Зауваження та дискусійні питання

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

1. Дисипація в гумометалевих опорах подана через еквівалентні параметри. Для ширшого застосування моделі бажано було б оцінити чутливість результатів до амплітудної, частотної та температурної залежності демпфування.

2. Порівняння розрахункових та експериментальних залежностей виконано в нормованій формі, що методично обґрунтовано. Разом з тим для підвищення метрологічної завершеності було б корисно подати в одному місці повний бюджет невизначеності прямих і похідних вимірювань.

3. У роботі застосовано поняття стійкого фазово узгодженого режиму. Оскільки первинне фазове співвідношення задається спільним ексцентриковим валом, під час захисту доцільно особливо чітко пояснити критерій, за яким автор оцінює збереження або порушення фазового узгодження в пружній системі.

4. Чисельна реалізація виконана у середовищі Mathcad. Було б корисно навести окрему оцінку чутливості розв'язку до кроку інтегрування та параметрів чисельного алгоритму для найбільш швидкоплинної ділянки ударного перехідного процесу.

Наведені зауваження мають дискусійний і рекомендаційний характер. Вони не спростовують одержаних у дисертаційній роботі наукових результатів, не ставлять під сумнів достовірність установлених закономірностей і переважно визначають напрями подальшого вдосконалення математичної, чисельної та експериментальної методології.

11. Загальний висновок

Дисертаційна робота Гавриленка Станіслава Сергійовича «Обґрунтування параметрів врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача на основі математичного моделювання нестационарних режимів роботи» є логічно завершеною самостійною кваліфікаційною науковою працею, в якій розв'язано актуальне науково-технічне завдання обґрунтування конструктивних і режимних параметрів врівноваженого колосникового грохота-перевантажувача.

У роботі розроблено багатокоординатну математичну модель динаміки грохота з урахуванням поступальних і кутових рухів робочих органів, установлено умови масово-інерційного та жорсткісного врівноваження, досліджено фазово узгоджений протифазний режим, стаціонарні й нестационарні ударні процеси та виконано експериментальну перевірку основних розрахункових закономірностей.

Наукова новизна одержаних результатів має достатній рівень обґрунтованості та безпосередньо пов'язана з поставленим науковим завданням.

Здобувач продемонстрував володіння методами аналітичної механіки, теорії коливань, математичного та чисельного моделювання, експериментального дослідження й статистичного опрацювання даних.

Важливою позитивною рисою остаточної редакції дисертації є завершення логічного ланцюга

«аналіз проблеми → математична модель → чисельне дослідження → експериментальна перевірка → інженерна методика».

Практичні результати не обмежуються загальними рекомендаціями. Вони доведені до самостійної інженерної методики обґрунтування параметрів врівноважених колосникових грохотів-перевантажувачів, систематизованої в Додатку Б, яка об'єднує розрахунково-моделювальний аналіз, вибір конструктивних і режимних параметрів, перевірку динамічної працездатності та експериментальне оцінювання.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у наукових виданнях та пройшли необхідну апробацію.

За актуальністю теми, змістом і рівнем виконання наукового завдання, науковою новизною, ступенем обґрунтованості й достовірності результатів, практичним значенням, повнотою їх оприлюднення та відповідністю спеціальності 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 інжинірингу та дизайну в машинобудуванні Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Інна ІЛЬІНА