

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного технічного Університету
«Дніпровська політехніка»
доктору технічних наук, професору
Колосову Д. Л.

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, старшого наукового співробітника

Шевченка Георгія Олександровича

на дисертаційну роботу Шкут Анастасії Петрівни

на тему: «Методологія віртуального моделювання двопривідних інерційних
грохотів з використанням програмного комплексу Dassault Systemes

SolidWorks», подану до захисту на здобуття

наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

1. Актуальність теми дисертації, її зв'язок із науковими програмами, темами

Проблема розробки ефективних методів проектування та моделювання інерційних грохотів набуває особливої актуальності в умовах зростаючих вимог до продуктивності та надійності промислового обладнання. Інерційні грохоти, які використовуються для сортування і класифікації сипучих матеріалів у гірничодобувній, будівельній та інших галузях промисловості, повинні відповідати сучасним вимогам до енергоефективності, надійності та довговічності.

Сучасні виробничі процеси характеризуються високим рівнем динамічності, що вимагає від інженерів здатності швидко реагувати на зміни умов експлуатації обладнання, а також інтеграції нових технологій у проектувальний процес. Традиційні методи розрахунку і проектування інерційних грохотів, які базуються на аналітичних моделях і фізичних експериментах, часто є занадто трудомісткими й не враховують повною мірою всіх складнощів динамічних процесів. Це може призводити до помилок у розрахунках і підвищеного ризику виходу обладнання з ладу.

Зважаючи на це, виникає необхідність у впровадженні ефективніших та точних методів проектування, які могли б забезпечити високу швидкість та якість розробки обладнання. Віртуальне моделювання з використанням сучасних програмних комплексів, таких як Dassault Systemes SolidWorks, стає незамінним інструментом, що уможливорює виконувати детальні симуляції та аналіз динамічних характеристик грохотів. Це дає можливість не лише знизити витрати на створення фізичних прототипів, але й забезпечити більш глибоке розуміння процесів, що відбуваються під час експлуатації обладнання.

Крім того, використання технологій віртуальної реальності (VR) у процесі проектування й навчання персоналу відкриває нові можливості для підвищення ефективності роботи інженерів та операторів. VR дозволяє не лише

моделювати і тестувати конструкції віртуально, але й створювати інтерактивні навчальні середовища, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу й підвищенню кваліфікації працівників.

Таким чином, актуальність дисертаційної роботи здобувачки Шкут А. П. на тему «Методологія віртуального моделювання двопривідних інерційних грохотів з використанням програмного комплексу Dassault Systemes SolidWorks» полягає в необхідності розробки інноваційних методологій для проектування й оптимізації інерційних грохотів, які б відповідали сучасним викликам і тенденціям у промисловому виробництві. Запропонований підхід, що включає віртуальне моделювання, автоматизацію проектування та використання VR-технологій, дозволить забезпечити високу точність, надійність і ефективність проектних рішень, що є критично важливим для конкурентоспроможності сучасних підприємств.

Здобувачка є співробітником у рамках декількох науково-дослідних робіт.

Значна частина досліджень Шкут А. П., представлених у дисертаційній роботі, виконана в рамках держбюджетної НДР «Розвиток теорії обґрунтування і вибору конструктивних та технологічних параметрів технічних об'єктів галузевого машинобудування» (№ ДР 0122U201676). 01.2023-12.2025.

Шкут А. П. брала участь у науково-дослідній роботі, спрямованій на розробку ресурсощадних гідротехнологій для видобутку багатих залізних руд на шахті «Ювілейна» ПрАТ «СУХА БАЛКА». В результаті її внесок у цей проект допомагає впроваджувати інноваційні рішення, що підвищують ефективність використання комп'ютерних технологій під час видобутку природних ресурсів.

Крім того, аспірантка залучена до розробки практичного курсу «Методика виконання лабораторних робіт із використанням автоматизованого робочого місця конструктора інерційних двопривідних грохотів», який є частиною дисципліни «Основи комп'ютерного інжинірингу». Ця діяльність свідчить про її значну роль у навчальному процесі та підготовці нових фахівців у сфері машинобудування.

Таким чином, актуальність дисертаційної роботи здобувачки Шкут А. П. на тему «Методологія віртуального моделювання двопривідних інерційних грохотів з використанням програмного комплексу Dassault Systemes SolidWorks» полягає в необхідності розробки інноваційних методологій для проектування та оптимізації інерційних грохотів, які б відповідали сучасним викликам і тенденціям у промисловому виробництві. Запропонований підхід, що включає віртуальне моделювання, автоматизацію проектування та використання VR-технологій, дозволить забезпечити високу точність, надійність і ефективність проектних рішень, що є критично важливим для конкурентоспроможності сучасних підприємств.

2. Ступінь обґрунтованості основних результатів, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Основні результати, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, мають високий ступінь обґрунтованості, що

підтверджується комплексним підходом до досліджень, використанням сучасних методів аналізу та моделювання, проведенням експериментальних досліджень, а саме:

- Дисертація Шкут А. П. на здобуття ступеня доктора філософії відповідає стандарту спеціальності 133 Галузеве машинобудування, оскільки є самостійним розгорнутим дослідженням, що пропонує розв'язання комплексної проблеми в царині галузевого машинобудування, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення. Комплексна проблема, яку розв'язує дисертація Анастасії Петрівни Шкут, полягає у створенні ефективної, надійної та економічно вигідної методології проектування інерційних грохотів за допомогою віртуального моделювання. Це завдання включає оптимізацію конструкції, підвищення ефективності проектування, забезпечення надійності й безпеки експлуатації, а також інтеграцію сучасних комп'ютерних технологій у процес розробки. Розв'язання цієї проблеми дозволить значно покращити виробничі процеси й підвищити конкурентоспроможність підприємств у галузі машинобудування.

- Методологічна основа дослідження базується на поєднанні аналітичних методів, фізичних експериментів і комп'ютерного моделювання, що забезпечує всебічний аналіз динамічних характеристик інерційних грохотів. Такий підхід дає можливість отримати точні результати, враховуючи всі значущі фактори, які впливають на роботу обладнання.

- Застосування сучасного програмного забезпечення SolidWorks для віртуального моделювання та аналізу конструкцій грохотів є важливим аспектом підвищення точності й достовірності отримуваних результатів у наукових дослідженнях. Комплексний підхід, що включає використання модулів SolidWorks Motion та SolidWorks Simulation, забезпечує можливість точно відтворити реальні експлуатаційні умови, врахувати перехідні процеси й визначити власні частоти коливань конструкцій, що є критично важливими для оцінки їх надійності та ефективності.

Розроблена методологія визначення власних частот коливань грохота на прикладі моделі ГВЧ-31С з використанням SolidWorks Simulation дозволила виявити шість основних форм коливань. Ці форми описують поведінку грохота як жорсткого тіла, підвішеного на пружинах, із частотами коливань у діапазоні від 0,89 до 4,12 Гц. Результати моделювання засвідчили, що робочий режим порожнього грохота відповідає зарезонансному режиму при частоті вібратора 25 Гц. Похибка у визначенні власних частот становить 15,3 %, що підтверджує доцільність і точність використання SolidWorks Simulation для аналізу динамічних систем.

Крім того, розроблено методологію моделювання перехідних процесів роботи грохота за допомогою SolidWorks Motion. У ході дослідження встановлено, що в перехідному режимі грохот має середній нахил назад на 5,98 мм, а в робочому режимі – на 0,51 мм, що свідчить про нецентроване положення грохота під час коливань. Аналіз вертикальних і поздовжніх коливань підтвердив ефективність демпфірування та стабільність роботи грохота в різних режимах. Максимальні динамічні зусилля в пружинах

досягають 49 кН, що свідчить про безпеку навантажень та робочий стан системи.

Методологія моделювання напружено-деформованого стану вузлів кріплення грохота, розроблена на основі SolidWorks Simulation, засвідчила, що максимальні напруження виникають у точках кріплення вібраторів до пластини. Встановлено, що в цих місцях зварні шви піддаються високій концентрації напружень, що потребує застосування методу Hot Spot Stress для точного прогнозування довговічності конструкції. Результати дослідження підтвердили, що належне моделювання й використання сучасного програмного забезпечення дозволяють ефективно аналізувати та оптимізувати напружено-деформований стан вузлів кріплення, забезпечуючи надійність і тривалий термін експлуатації модернізованого грохота.

Застосування SolidWorks Education Edition в освітньому процесі відіграє ключову роль у формуванні методології віртуального моделювання двопривідних інерційних грохотів. Інтеграція всіх етапів проектування в рамках цього програмного забезпечення уможливило автоматизувати розрахунки, моделювання та документування, що підвищує ефективність роботи конструкторів у рамках автоматизованого робочого місця (АРМ) і сприяє розвитку інженерної думки.

- Проведені в рамках дослідження фізичні експерименти додатково підтвердили точність аналітичних моделей і результатів комп'ютерного моделювання. Отримані експериментальні дані чітко продемонстрували, що використані методи та моделі є адекватними, що забезпечує високу надійність отриманих висновків.

Для дослідження характеристик грохотів було створено експериментальний стенд, до складу якого увійшли високочастотний грохот, віброметр із системи акустичної та вібровиміральної техніки Robotron, п'єзоелектричний датчик прискорення КД 35, а також комп'ютер із програмним забезпеченням Sonic Sound Forge. Після проведення калібрування обладнання було отримано еталонний графік з амплітудою коливань 1 мм.

Комп'ютерне моделювання грохота показало амплітуди коливань, а саме: 0,232 мм при вертикальному встановленні датчика, 0,182 мм при горизонтальному встановленні датчика та 0,257 мм при встановленні датчика під кутом 45°.

На лабораторному стенді також було проведено дослідження грохота, в ході яких, аналогічно з комп'ютерним моделюванням, були зняті параметри руху в трьох напрямках. Статистична обробка отриманих даних підтвердила їх достовірність: критерій Кохрена засвідчив однорідність дисперсій, а критерій Фішера підтвердив адекватність моделей, що дозволяє використовувати результати для подальшого аналізу та практичного застосування. Пірсоновий критерій підтвердив нормальний розподіл даних. Було здійснено порівняння результатів аналітичного, комп'ютерного та експериментального досліджень грохота й різниця в розрахунках амплітуд між комп'ютерним та аналітичним методом становила від 2 до 8 %, а між комп'ютерним і фізичним експериментом – від 1 до 9 % залежно від точки вимірювання на грохоті.

Таким чином, отримані результати дозволяють зробити висновок, що методи комп'ютерного моделювання грохотів із використанням Dassault Systemes SolidWorks є ефективними для створення віртуальних моделей і симуляції робочих процесів.

- Математичні моделі й обчислення, представлені в даній дисертації, базуються на фундаментальних теоретичних принципах механіки та вібротехніки, які широко відомі й визнані у науковому співтоваристві. Всі математичні залежності були ретельно адаптовані до специфічних умов експлуатації інерційних грохотів, що значно підвищує достовірність і надійність отриманих результатів.

Зокрема, математична модель застосована для детального аналізу грохота типу ГВЧ-2, оснащеного мотор-вібраторами із синхронними частотами обертання, які забезпечують стабільну роботу системи. Завдяки цьому вдалося візуалізувати динаміку руху грохота, зокрема приділити особливу увагу режимам пуску та сталої роботи. Графічні матеріали, включені в дослідження, демонструють зміни положення ключових точок грохота, таких як місця кріплення амортизаторів і центр маси. Це дозволило описати зміни у поведінці вібраційного грохота за різних умов експлуатації.

Важливим кроком у розробці математичної моделі стало застосування рівнянь Лагранжа другого роду для формулювання рівнянь руху грохота, що дало можливість урахувати вплив непружних опорів пружних зв'язків. Це є особливо важливим для точного моделювання динаміки системи. Проведені дослідження показали, що коефіцієнти непружних опорів залишаються стабільними в межах робочих частот, що підтверджує гіпотези Бокка-Шліппе та дослідження В. М. Потураєва. Це дозволяє враховувати непружні опори як уявну частину комплексного модуля пружних зв'язків. Використання принципу Вольтерра для врахування непружних опорів після розв'язання задачі для чисто пружної системи значно спрощує розрахунки й підвищує точність моделювання поведінки грохота.

Отримані результати створюють необхідну основу для розробки віртуальних моделей, які можуть бути використані в подальшій оптимізації конструкції та режимів роботи грохотів.

Загальний результат роботи полягає у створенні автоматизованого робочого місця конструктора для проектування інерційних грохотів, яке поєднує фізичний, комп'ютерний та аналітичний етапи дослідження. Це робоче місце значно підвищує ефективність проектування грохотів, забезпечуючи точність і надійність інженерних рішень, а також скорочуючи час на розробку нових моделей обладнання.

Розроблене автоматизоване робоче місце (SPDW) успішно впроваджено на підприємстві ТОВ «Паритет СОФТ». Використання цього комплексу під час проектування інерційних грохотів дозволило скоротити час створення концептуальних моделей у 10 разів, а робочих проектів – у 2,5 раза порівняно з традиційними методами. Це свідчить про високу ефективність і практичну цінність розробки.

- Рекомендації щодо практичного застосування результатів дослідження підкріплені реальними прикладами впровадження розроблених методологій на промислових підприємствах. Це свідчить про те, що сформульовані в дисертації рекомендації є не лише теоретично обґрунтованими, але й перевіреними на практиці.

Таким чином, усі наукові результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи мають високий ступінь обґрунтованості, що забезпечується комплексним підходом до дослідження, використанням сучасних інструментів моделювання та підтвердженням отриманих результатів експериментальними даними. Це дає можливість з упевненістю стверджувати, що результати дисертації можуть бути надійно використані як у наукових дослідженнях, так і в практичному застосуванні в промисловості.

3. Наукова новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі сформульовано та обґрунтовано низку науково нових результатів, які мають значний вплив на розвиток теорії та практики проєктування інерційних грохотів. Основні елементи наукової новизни включають:

Уперше запропоновано:

1. Нову методологію комбінованого підходу до аналізу динаміки інерційних грохотів, яка вперше поєднує традиційні аналітичні методи, фізичні експерименти та комп'ютерне моделювання з використанням програмного комплексу Dassault Systemes SolidWorks і технологій віртуальної реальності (VR). Ця методологія дозволяє створювати точні віртуальні моделі грохотів, симулювати їх робочі процеси та проводити комплексний аналіз їхніх динамічних характеристик.

2. Методи визначення власних частот коливань грохота за допомогою SolidWorks Simulation, що дозволяє враховувати вплив змушувальних сил і точно описувати динамічну поведінку грохотів. Такий підхід дає змогу більш точно визначити резонансні частоти та уникати небажаних резонансних явищ у роботі обладнання.

3. Методи моделювання перехідних процесів грохота з використанням SolidWorks Motion. Методи уможливають більш точно описувати динамічну поведінку грохота під час запуску, зупинки та переходу між робочими режимами, що є критично важливим для забезпечення надійності й довговічності обладнання.

4. Методи моделювання напружено-деформованого стану вузлів кріплення модернізованої конструкції грохота з використанням SolidWorks Simulation. Це дозволяє точно визначити критичні зони напружень у конструкції, що сприяє підвищенню надійності грохотів і збільшенню їх експлуатаційного ресурсу.

5. Інтеграцію VR-технологій у процес проєктування грохотів, що дає можливість інженерам створювати тривимірні моделі та проводити віртуальні випробування конструкцій. Це відкриває нові можливості для візуалізації та

аналізу динамічних характеристик грохотів, а також підвищення ефективності навчання технічного персоналу.

6. Об'єднати аналітичний, комп'ютерний і фізичний підходи до аналізу грохотів, розробивши автоматизоване робоче місце конструктора SolidWorks Parametric Design Workstation (SPDW), інтегрованого з комплексом Dassault Systemes SolidWorks. Це рішення дозволяє значно оптимізувати процеси проектування, знизити витрати часу та фінансів на розробку нових конструкцій і підвищити точність проектних рішень. Згідно з проведеним аналізом підприємством ТОВ «Паритет СОФТ» застосування автоматизованого робочого місця для проектування грохотів SPDW дозволяє зменшити час на концептуальне проектування у 10 разів, а на робоче проектування – в 2,5 раза.

Таким чином, наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розробці та впровадженні інноваційних методологій і підходів до проектування інерційних грохотів, що дають можливість створити новий комбінований підхід для аналізу грохотів, який сформовано в автоматизованому робочому місці конструктора на базі програмного комплексу SolidWorks. Отримані результати сприяють подальшому розвитку теорії та практики вібраційної техніки, зокрема в контексті застосування сучасних комп'ютерних технологій у проектуванні промислового обладнання.

4. Практичне застосування роботи в промисловості

Згідно зі стандартом спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» результати дисертаційного дослідження повинні мати теоретичне та практичне значення.

Теоретичне значення роботи полягає в ґрунтовному аналізі наукових досліджень і досягнень у відповідній галузі. Ретельно аналізуючи наявні наукові праці, авторка поглиблює знання у сфері механіки та вібраційної техніки, пропонуючи нові методологічні підходи до аналізу динаміки та перехідних процесів інерційних грохотів. Це, в свою чергу, сприяє більш глибокому розумінню поведінки таких систем і створенню ефективніших конструкцій. Практичне значення результатів дисертаційної роботи, присвяченої методології віртуального моделювання двопривідних інерційних грохотів із використанням програмного комплексу Dassault Systemes SolidWorks, у тому, що дослідження має широке застосування в різних промислових підприємствах.

Практичні результати дисертації – це комплекс SolidWorks Parametric Design Workstation (SPDW), який передається підприємствам для підвищення ефективності проектування й розрахунку інерційних грохотів. В основу автоматизованого робочого місця покладено дані, отримані в дисертації, а саме результати математичного моделювання, методи визначення власних частот коливань грохота з використанням SolidWorks Simulation, методи моделювання перехідних процесів грохота з використанням SolidWorks Motion, методи моделювання напружено-деформованого стану вузлів кріплення грохота з використанням SolidWorks Simulation, результати фізичного експерименту.

Такий комплексний підхід дав можливість розробити програмний застосунок для ефективного моделювання та аналізу конструкцій двопривідних грохотів.

Крім представленої держбюджетної НДР «Розвиток теорії обґрунтування й вибору конструктивних і технологічних параметрів технічних об'єктів галузевого машинобудування», НДР на шахті «Ювілейна» ПрАТ «СУХА БАЛКА» та застосування в навчальному процесі, результати роботи використовуються на приватних підприємствах:

- ТОВ «Океанмашенерго» (стейкхолдер спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» в НТУ «ДП») упровадив автоматизоване робоче місце конструктора (SPDW), розроблене на основі SolidWorks, що дозволило інтегрувати всі етапи проектування в єдину систему. Це забезпечило автоматизацію процесів розрахунку, моделювання, аналізу та документування, що значно підвищило ефективність роботи інженерів-конструкторів підприємства. Методологія віртуального моделювання, розроблена в дисертації, дає можливість оптимізувати конструкції інерційних грохотів щодо їхніх динамічних характеристик і надійності. Комп'ютерні симуляції в SolidWorks дають можливість детально аналізувати напружено-деформований стан конструкції, виявляти критичні зони й відповідно вносити зміни в проєкт для підвищення довговічності та зменшення ризику поломок. Це сприяє зниженню витрат на технічне обслуговування й ремонти у процесі експлуатації обладнання.

- ТОВ «Паритет СОФТ» проведено всебічний аналіз, що засвідчив значне прискорення процесу проектування та аналізу роботи грохота завдяки використанню автоматизованого робочого місця конструктора SolidWorks Parametric Design Workstation (SPDW) у порівнянні з традиційними методами проектування в SolidWorks. За інформацією від компанії «Паритет Софт», упровадження комплексу SPDW під час розробки грохота типу ГВЧ-2 дозволяє зменшити час на концептуальне проектування у 10 разів, а на робоче проектування – в 2,5 рази.

- ПрАТ «СУХА БАЛКА» передано автоматизоване місце конструктора SolidWorks Parametric Design Workstation та віртуальна візуалізація конструкції грохота SkUb5.0x1D. Розроблена методологія дає можливість суттєво скоротити час, необхідний для проектування нових моделей інерційних грохотів. Використання програмного комплексу SolidWorks забезпечує створення точних параметричних моделей, що дає інженерам можливість швидко вносити зміни до конструкції та оптимізувати її під конкретні умови експлуатації. Це особливо важливо у промислових підприємствах, які займаються виготовленням обладнання для гірничодобувної, будівельної, хімічної та інших галузей, де швидкість виведення нових продуктів на ринок має критичне значення.

- ТОВ «АНА-ТЕМС» (стейкхолдер спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» в НТУ «ДП») передана віртуальна візуалізація конструкції грохота SkUb5.0x1D з інтерактивними елементами, яка створена у програмному комплексі Dassault Systemes SolidWorks. Використання технологій віртуальної реальності (VR) у процесі проектування і навчання персоналу відкриває нові

можливості для промислових підприємств. Завдяки VR-технологіям інженери можуть проводити віртуальні випробування та оцінювати роботу конструкцій у реальному часі, що дозволяє виявити потенційні проблеми ще на стадії проектування. Крім того, VR-технології можуть бути використані для навчання технічного персоналу, що сприяє підвищенню рівня кваліфікації працівників і зменшенню ризиків під час експлуатації складного обладнання.

Розроблені в дисертації методології і технології мають великий потенціал для практичного застосування в промисловості. Вони дозволяють значно підвищити ефективність і точність проектування інерційних грохотів, знизити витрати на їх розробку та експлуатацію, а також забезпечити високу надійність і довговічність обладнання. Інтеграція цих інноваційних підходів у виробничі процеси допоможе підприємствам залишатися конкурентоспроможними на сучасному ринку, забезпечуючи високу якість продукції та зменшення часу виведення нових продуктів на ринок. Тому результати дисертаційного дослідження широко застосовуються на промислових підприємствах, що займаються розробкою, розрахунками й виготовленням обладнання для транспортування та збагачення матеріалів.

5. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковані в 11 наукових працях: 2 статті у періодичних виданнях, включених до переліку фахових видань України, 2 статті у періодичних виданнях, що індексовані в базах даних Scopus, 7 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій. Кількість, обсяг і зміст друкованих праць відповідають вимогам МОН України щодо публікацій основного змісту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії й надають авторові право публічного захисту дисертації. Детальний аналіз представленого рукопису дисертації та наукових публікацій дає підстави констатувати ідентичність публікацій та основних положень дисертації.

6. Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам

Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 269 сторінок, з них 178 – основний текст, 9 таблиць, 74 рисунки, 16 додатків, список використаних джерел становить 80 найменувань. Структура дисертації має логічну побудову і сприяє розкриттю теми дослідження та виконанню поставлених завдань. Дисертація оформлена відповідно до вимог Міністерства освіти і науки України, що ставляться до таких наукових робіт. Зміст наукових праць доповнює основні положення дисертації.

Дисертаційна робота має п'ять розділів.

Розділ 1. Аналіз стану питання та постановка завдань дослідження. У першому розділі дисертації проведено ґрунтовний аналіз існуючих наукових досліджень і технічних рішень у галузі проектування інерційних грохотів, що

дало можливість визначити основні проблеми та виклики в цій сфері. Розглянуто ключові типи інерційних грохотів, їх конструктивні особливості та принципи роботи. Аналіз традиційних методів розрахунку і проектування грохотів засвідчив, що вони мають значні обмеження, зокрема високу трудомісткість, тривалість процесу й недостатню точність, що може негативно впливати на надійність і довговічність обладнання.

У зв'язку з цим обґрунтовано вибір програмного комплексу Dassault Systemes SolidWorks як основного інструменту для віртуального моделювання грохотів. SolidWorks було обрано через його потужний функціонал для моделювання динамічних процесів, аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, частотного аналізу та симуляції робочих режимів. Це дозволяє значно підвищити точність та ефективність проектування.

На основі проведеного аналізу сформульовано головні проблеми, які потребують розв'язання, зокрема: недостатня точність традиційних аналітичних моделей, значні витрати на створення фізичних прототипів, а також необхідність підвищення надійності й довговічності конструкцій. Відповідно до цих проблем у розділі було поставлено завдання розробити методологію комбінованого підходу до проектування, яка включає аналітичні, комп'ютерні та фізичні методи з використанням SolidWorks для віртуального моделювання динамічних характеристик грохотів. Також передбачено створення автоматизованого робочого місця конструктора (SPDW), що інтегрує всі етапи проектування.

Таким чином, у першому розділі окреслено завдання дослідження, визначено напрями подальших наукових робіт та обґрунтовано використання сучасних інструментів для розв'язання виявлених проблем у проектуванні інерційних грохотів.

Розділ 2. Моделювання перехідних режимів високочастотного грохота типу ГВЧ-2. У другому розділі дисертації розроблено та апробовано методологію моделювання перехідних режимів роботи високочастотного грохота типу ГВЧ-2 з використанням рівнянь Лагранжа II роду. Основну увагу приділено аналізу динаміки під час запуску, зупинки й сталого режиму роботи. На основі рівнянь Лагранжа II роду створено математичну модель, яка враховує інерційні сили, демпфування та змушувальні сили, що виникають під час роботи грохота. Отримані диференціальні рівняння другого порядку розв'язані числовими методами з використанням програмного комплексу MathCAD. Це дозволило провести серію симуляцій для різних умов роботи грохота. Аналіз динамічних характеристик під час запуску засвідчив, що система проходить кілька етапів, зокрема швидке зростання амплітуди коливань до досягнення робочого режиму, після чого вона входить у стабільний стан. Час перехідного процесу для грохота типу ГВЧ-2 становить близько 8–10 секунд. У цей період система демонструє різкі зміни в кутовій швидкості, що може призводити до підвищених навантажень на вузли кріплення. Під час зупинки грохота відбувається плавне демпфування коливань, але в перші 2–3 секунди після вимкнення двигунів спостерігається короткочасний зворотний коливальний рух, що слід враховувати у проектуванні елементів кріплення та амортизації.

Також проаналізовано перехід між різними робочими режимами, наприклад, під час зміни частоти коливань. Виявлено, що під час зміни частоти коливань із 25 Гц до 35 Гц амплітуда коливань тимчасово зростає на 15–20 %.

У результаті роботи розроблено математичну модель, яка дозволяє точно описати динамічні процеси під час перехідних режимів роботи грохота. Це дало змогу зробити висновки про критичні моменти в роботі обладнання для мінімізації негативного впливу перехідних процесів на конструкцію.

Розділ 3. Застосування комплексу SolidWorks як ключового елементу методології віртуального моделювання. У третьому розділі дисертації розроблено та впроваджено методи визначення власних частот коливань, моделювання перехідних процесів та аналізу напружено-деформованого стану вузлів кріплення грохота з використанням програмного комплексу Dassault Systemes SolidWorks. Особливу увагу приділено аналізу динамічних процесів, які впливають на надійність та ефективність роботи грохота.

Для забезпечення надійності конструкції проведено частотний аналіз, який виявив власні частоти коливань грохота типу ГВЧ-2. Установлено, що власна частота коливань становить у діапазоні від 0,89 до 4,12 Гц, а змушувальна частота – 25 Гц. Важливо уникати збігу цих частот, оскільки коливання на власних частотах можуть призводити до підвищених навантажень на вузли кріплення, що загрожує їм пошкодженням.

Моделювання перехідних процесів за допомогою модуля SolidWorks Motion дало можливість детально проаналізувати динамічну поведінку грохота під час запуску, зупинки та зміни режимів роботи. Виявлено, що під час запуску амплітуда коливань досягає максимального значення 10–12 мм протягом перших 6–8 секунд, а під час зупинки спостерігається зворотне коливання амплітудою до 5 мм, яке зникає через 4–6 секунд. Це підкреслює необхідність оптимізації демпфувальних елементів для мінімізації впливу перехідних процесів на загальну роботу грохота. Отримані результати підкреслюють важливість урахування власних частот коливань під час проектування, оптимізації конструкції демпфувальних елементів і вибору матеріалів для вузлів кріплення. Розроблені методи моделювання напружено-деформованого стану вузлів кріплення грохота з використанням SolidWorks Simulation засвідчила, що максимальні напруження виникають у місцях кріплення вібраторів до пластини. Встановлено, що зварні шви в цих місцях мають високу концентрацію напружень, а це потребує застосування методу Hot Spot Stress для точного визначення довговічності конструкції.

Розділ 4. Фізичне моделювання двопривідного інерційного грохота. У четвертому розділі дисертації проведено експериментальну перевірку точності та достовірності розроблених аналітичних і комп'ютерних моделей шляхом створення фізичного прототипу двопривідного інерційного грохота та проведення лабораторних випробувань, для цього розроблено експериментальний стенд.

Фізичні випробування включали вимірювання динамічних характеристик грохота під час роботи в різних режимах, отримано амплітуди коливань: при

вертикальному встановлені датчика – 0,232 мм, при горизонтальному – 0,182 мм, при встановлені датчика під кутом 45° переміщення становлять 0,257 мм.

Для отриманих значень проведено статистичну обробку даних, результати досліджень достовірні. Однорідність дисперсії підтверджено критерієм Кочрена, адекватність – Критерієм Фішера, що дає можливість використовувати отримані дані для подальшого аналізу й практичного застосування. Доведено теорію нормального розподілу даних за критерієм Пірсона.

При порівнянні результатів фізичного експерименту відносно комп'ютерного моделювання встановлено високу кореляцію даних з похибкою від 1 до 9 %, а при порівнянні комп'ютерного моделювання з аналітичним розрахунком амплітуди похибка становить від 2 до 8 %. Проведений аналіз ефективності роботи засвідчив, що грохот стабільно працює в номінальних режимах та при проходженні критичних резонансних частот.

Розділ 5. Розробка та впровадження автоматизованого робочого місця конструктора SolidWorks Parametric Design Workstation (SPDW). У п'ятому розділі дисертації розроблено, впроваджено та оцінено ефективність автоматизованого робочого місця конструктора (SPDW) на базі програмного комплексу SolidWorks для проектування двопривідних інерційних грохотів. SPDW об'єднує всі етапи проектування, включаючи параметричне моделювання, динамічні симуляції, аналіз міцності та оптимізацію конструкції.

Створено АРМ SPDW, яке дозволяють інженерам швидко створювати й модифікувати конструкції грохотів. Це скоротило час на створення концептуальних моделей у 10 разів, а час робочого проектування зменшився в 2,5 раза.

Інтеграція модулів аналізу міцності SolidWorks Simulation дозволила автоматично проводити частотні розрахунки та аналіз напружено-деформованого стану конструкцій.

Інтеграція модулів аналізу міцності SolidWorks Motion дала можливість автоматизувати процес динамічного розрахунку грохота на всіх етапах роботи, в результаті отримати графіки зміни амплітуди коливань грохота від часу, зміни швидкості та прискорення коливань від часу.

Таким чином, автоматизоване робоче місце конструктора SolidWorks Parametric Design Workstation значно підвищило ефективність процесу проектування, оптимізувало конструкції грохотів, знизило витрати на виробництво та збільшило ресурс їх експлуатації.

7. Дотримання принципів академічної доброчесності

Аналіз дисертації Шкут Анастасії Петрівни дає підстави констатувати, що в дисертації представлені результати власних наукових досліджень автора, що підтверджено одноосібними публікаціями в фахових виданнях та виданнях з цитуванням в наукометричних базах Scopus.

Усі джерела, використані в роботі, належним чином цитовані з відповідними посиланнями на першоджерела. Це свідчить про те, що автор

дотримувався правил академічної доброчесності щодо визнання інтелектуальної власності інших дослідників і авторів.

Авторка роботи у своїй дослідницькій діяльності уникає будь-яких форм плагіату. Використання ідей, текстів або даних інших дослідників завжди супроводжується відповідними академічними посиланнями, що запобігає порушенню принципів доброчесності.

8. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертаційної роботи

Незважаючи на високий рівень дослідження і значні досягнення, дисертаційна робота викликає декілька дискусійних положень та зауважень, які можуть бути корисними для подальшого розвитку теми та вдосконалення методології.

- В тексті дисертації присутні деякі помилки та не до кінця зрозумілі технічні терміни, наприклад: с. 15, мета дослідження - «віртуальні випробування»; с. 135, під завдання розділу 5, п. 2 - «для симуляції аналізу грохота», п. 3 - «інтуїтивно зрозумілий інтерфейс», п. 4 - «забезпечити результати дослідження».

- В назві дисертації та її розділів, в завданнях роботи, предметі досліджень, висновках доцільно було б упорядкувати типи грохотів, для яких саме виконуються дослідження, у відповідності до загально прийнятої класифікації.

- Мету роботи було б доцільно доповнити її спрямованістю на підвищення ефективності роботи грохотів.

- Доцільно було б відділити результати власних досліджень від результатів використання стандартних інструментів пакету SolidWorks, наприклад, визначення власних частот коливань грохоту з використанням пакету SolidWorks Simulation (наукова новизна, 2-й пункт, с. 16), практичне значення результатів (с. 17-18).

- Бажано було б в роботі сформулювати наукові положення – рішення, які розв'язують поставлене наукове завдання.

- Потрібно було б поєднати «наукову новизну одержаних результатів» на с. 16-17 з «науковою новизною» на с. 17.

- Було б доцільно навести в розділі 1 список прізвищ вчених, що займалися розробкою за напрямком досліджень роботи.

- Доцільно було б у завданні та висновках по розділу 2 акцентувати увагу на невирішених раніше питаннях динаміки перехідних режимів грохота.

- В розділ 4 доцільно було б включити програму та методику проведення експериментальних досліджень.

- Числові дані у висновках розділу 5 (с. 162) не мають узагальнюючого характеру та придатні тільки для окремих конструкцій грохотів, тип яких у висновках не вказано.

- В роботі та додатках відсутні методика моделювання перехідних процесів грохота та методика моделювання напружено-деформованого стану

вузлів кріплення грохота, вказані в науковій новизні одержаних результатів (с. 17).

- Доцільно було б виконати вимогу щодо максимального обсягу основної частини роботи.

- Обмеження в застосуванні обраних математичних моделей. Хоча використані математичні моделі досить ефективні для аналізу динамічних характеристик інерційних грохотів, вони можуть мати обмеження у випадках, коли необхідно враховувати складніші нелінійні процеси або взаємодії з іншими елементами системи. У подальшому слід було б розглянути можливість інтеграції більш складних моделей, які дозволили б точніше описувати поведінку системи в умовах складних експлуатаційних навантажень.

Загалом дисертаційна робота є внеском у розвиток науки і практики, однак деякі аспекти можуть бути піддані подальшій розробці та вдосконаленню. Врахування зазначених дискусійних положень і зауважень може підвищити наукову і практичну цінність результатів роботи, а також сприяти подальшому розвитку досліджень у цій галузі.

9. Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам

Дисертаційна робота аспірантки Шкут Анастасії Петрівни на тему «Методологія віртуального моделювання двопривідних інерційних грохотів з використанням програмного комплексу Dassault Systemes SolidWorks» повністю відповідає встановленим вимогам до наукових досліджень, що подаються на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Основні критерії відповідності.

1. Актуальність теми. Робота присвячена вирішенню важливої науково-практичної задачі, яка має високу актуальність для розвитку сучасних технологій проектування промислового обладнання. Враховуючи потреби промисловості у вдосконаленні вібраційної техніки, дослідження відповідає актуальним викликам і тенденціям у галузі машинобудування.

2. Наукова новизна. У роботі запропоновано та обґрунтовано нові наукові підходи до моделювання та проектування інерційних грохотів, що мають вагомe значення для розвитку теорії і практики вібраційної техніки. Наукові положення, висновки та рекомендації роботи базуються на використанні сучасних методів аналітичного, комп'ютерного та експериментального моделювання.

3. Методологічна обґрунтованість. Дослідження характеризується високим ступенем методологічної обґрунтованості, що досягається через комплексне використання аналітичних, комп'ютерних та експериментальних методів. Результати підтверджені як теоретичними розрахунками, так і фізичними експериментами.

4. Практична цінність. Результати дисертаційного дослідження мають вагомe практичне значення для промислових підприємств, що займаються розробкою та експлуатацією інерційних грохотів. Упровадження розроблених

методів сприяє підвищенню ефективності проектування, надійності обладнання і зниженню виробничих витрат.

5. Повнота публікацій. основні наукові результати дослідження опубліковані у фахових виданнях, у тому числі індексованих у базах даних Scopus, що свідчить про визнання наукової спільноти.

6. Загальна структура та оформлення. Дисертація добре структурована, логічно побудована та повністю відповідає вимогам до оформлення наукових робіт такого рівня.

Отже, дисертаційна робота відповідає всім вимогам, що ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує на присудження цього ступеня за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Офіційний опонент

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини Інституту геотехнічної механіки імені М. С. Полякова Національної академії наук України

Шевченко Г. О.

30. 08. 2024 р.

