

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Гурського Володимира Миколайовича

«Синтез нелінійних полічастотних вібраційних машин з резонансними режимами роботи» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство

На рецензію представлені дисертаційна робота, автореферат та публікації за темою дисертації.

### **Актуальність теми дисертації.**

Енергозбереження та енергоефективність є стратегічним напрямком розвитку промисловості України. У енергоємних галузях, таких як машинобудування, будівельна, гірнича промисловість застосовують вібраційні машини та обладнання. Високу технологічну ефективність на виробництві забезпечують машини віброударного типу, що визначаються багаторежимністю, а тому їм притаманна певна складність у розрахунках та конструюванні.

Важливим засобом, що спрямований на підвищення ефективності роботи вібраційних машин є забезпечення резонансних режимів. Однак, наявні методи розрахунку недостатні для того, щоб підвищити ефективність функціонування віброударних машин. Це засвідчує той факт, що вони суттєво поступаються традиційним гармонійним машинам. Окрім того, що потрібно витримати комплекс технологічних вимог, варто на розрахунковому рівні закласти передумови підвищення ефективності функціонування з можливістю реалізації резонансних режимів. Відповідно це зумовлює необхідність розробки нового підходу з використанням синтезу параметрів і режимів роботи, що визначає актуальність та важливість представленої дисертаційної роботи.

## **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Виконані теоретичні дослідження базуються на класичних положеннях та методах теорії коливань, зокрема системи нелінійних диференціальних рівнянь отримано за методом Лагранжа-Максвелла. Для їхнього чисельного інтегрування використано методи Рунге-Кутта, Радау та Адамса. Розрахункові методи синтезу побудовані на алгоритмах і програмах з використанням чисельних методів спряжених градієнтів під час розв'язування оптимізаційних задач із обмеженнями.

Аналітичні залежності для розрахунку пружно-інерційних параметрів отримані в процесі розгляду вільних коливань дискретних механічних моделей лінійних тримасових коливальних систем на основі кратності їхніх частот.

Методом скінченних елементів у аналітичній постановці вирішено завдання частотно-силового аналізу плоскої пружини під час реалізації віброударних режимів роботи. З використанням класичних методів теорії пружності виконано перевірку міцності плоскої пружини з урахуванням контактної задачі Герца між плоскою пружиною та циліндричною опорою.

Дослідження вібраційних машин втілено у вигляді 3D-моделей конструкцій, додатково здійснено аналіз частот вільних коливань робочих органів, перевірено міцність плоскої пружини за умовами реалізації віброударних режимів роботи. Розбіжність між теоретичними результатами і моделюванням засобами скінченно-елементного аналізу не перевищує 6 %.

Експериментальні дослідження проведено на експериментальному зразку вібраційного модуля з частотами коливань 50 Гц, 100 Гц, 50 Гц/100 Гц із використанням обладнання для вимірювання та реєстрації основних кінематичних і енергетичних показників. Отримана розбіжність теоретичних та експериментальних досліджень, яка знаходиться у межах 19 %.

Висновки і рекомендації сформульовані відповідно до результатів теоретичних і експериментальних досліджень, вказують на адекватність та підтверджують правильних підходів і вибору методів розрахунку.

## **Наукова та практична цінність результатів дисертаційної роботи.**

*Новизна* дисертаційної роботи полягає у розробці узагальненого методологічного підходу для синтезу нелінійних полічастотних вібраційних машин із резонансними режимами роботи.

Обґрунтовано показники, за якими оцінено ефективність функціонування та проведено синтез вібраційних машин із урахуванням технологічних, динамічних, енергетичних характеристик.

Отримано аналітичні залежності для синтезу та виявлено закономірності зміни основних кінематично-силових характеристик двочастотних резонансних машин з імпульсним та комбінованим електромагнітним збуренням.

Отримані нові співвідношення: коефіцієнтів жорсткості асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик двомасових віброударних систем, що забезпечують функціонування за основним резонансом чи з використанням субгармоніки; коефіцієнтів жорсткості лінійних і асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик тримасових віброударних систем, що забезпечують існування віброударного режиму між масами, які підлягають збуренню та містять кусково-лінійну пружну характеристику.

*Практичне значення* роботи полягає реалізації нових конструкцій і підвищенні ефективності функціонування полічастотних вібраційних машин різного класу, зокрема двочастотних і віброударних. Цьому сприяли запроваджені методи розрахунку, що ґрунтуються на узагальненому методологічному підході для синтезу пружно-інерційних і силових параметрів із урахуванням технологічних та динамічних обмежень. Реалізовано методики проектних і перевірочних розрахунків вузлів та машин в цілому з використанням аналітичних розрахунків та засобів скінченно-елементного аналізу. Результати роботи мають перспективи подальшого використання як у традиційних виробництвах будівельної, гірничої галузей, машинобудуванні, а також у нових технологіях і процесах. Це засвідчує впровадження результатів для відновлення зносостійких шарів під час наплавлення.

## **Загальна характеристика змісту дисертації.**

**Вступ** характеризує актуальність дослідження, його зв'язок із науковими програмами та планами, мету, завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення, особистий внесок та апробацію.

**Перший розділ** містить результати аналізу досліджень за темою дисертаційної роботи. Основна увага прикута до класифікації технологічних процесів, встановленню раціональних режимів роботи вібраційних машин, перспективності системам із полічастотними коливаннями і резонансними режимами роботи. Встановлено доробок вчених у розвиток науки та практики використання вібраційних машин. Автором проведено аналіз засобів реалізації резонансних машин на базі електромагнітного приводу, обґрунтовано доцільність його використання у подальших дослідженнях. Розглянуто конструктивні схеми машин, їхні особливості та напрями їх подальшого удосконалення. Розглянуто енергетичні перетворення у вібраційних машинах, здійснено аналіз робіт у напрямку динаміки та синтезу нелінійних коливальних систем.

У **другому розділі** обґрунтовується узагальнений методологічний підхід, що передбачає формування показників ефективності функціонування різного класу резонансних вібраційних машин, формування комплексу вимог технологічних і динамічних обмежень для розв'язування оптимізаційних задач. Умовою забезпечення ефективного функціонування є максимізація показника відношення максимуму пришвидшення робочої маси до споживаної потужності. Також встановлено додаткові обмеження, що характеризують роботоздатність системи у вигляді умов на допустимий струм, коефіцієнт запас міцності пружних елементів. Запроваджено завдання синтезу машин із вибором кінематичних і динамічних обмежень відповідно до призначення, умов роботи та структури вібраційної машини. Розроблено розрахункові методи для синтезу двочастотних вібр машин на основі тримасових систем із лінійними пружними характеристиками. За результатами аналізу виявлено закономірності руху та реалізації двочастотних машин у процесі модернізації одночастотних

(двомасових) систем із збереженням резонансного режиму роботи та забезпеченням машин із визначеним складом гармонік пришвидшення робочої маси. Виявлено технологічні переваги машин із вищою стійкістю до зміни технологічних умов.

**Третій розділ** містить результати синтезу та аналізу віброударних систем, що оснований на нових співвідношеннях коефіцієнтів жорсткості асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик. Запроваджено розрахунковий метод, згідно якого використовуються два незалежні коефіцієнти у виразах для частот вільних коливань та уможливають реалізацію резонансних віброударних систем із режимом на основному резонансі та на субгармоніці. Виявлено підвищену у *3 рази* ефективність систем порівняно із класичними віброударними системами. Здійснено порівняльний аналіз різного класу резонансних систем за результатами якого: обґрунтовано використання імпульсних одноктактних схем збурення електромагнітів для синтезованих віброударних систем, що забезпечують простоту конструктивного виконання машин; підтверджено енергетичні переваги реалізації віброударних систем за новим підходом. Розроблено методику аналізу на параметричну стійкість віброударних систем, представлених у вигляді диференціальних рівнянь Хілла та Матьє. Обґрунтовано методику розв'язку рівняння типу Матьє з правою частиною за допомогою комбінації методів Бубнова-Гальоркіна та Левентберга-Марквардта. Запроваджено метод розрахунку тримасових віброударних систем за парціальними налагодженнями та відношенням коефіцієнтів жорсткості асиметричної кусково-лінійної пружної характеристики.

**Четвертий розділ** узагальнює результати розробки досліджуваних машин, розрахованих за новими методами. Представлено оцінку роботи здатності двочастотних і віброударних машин за умовами реалізації відповідних режимів роботи. Наведено методики проектних і перевірочних розрахунків, результати комп'ютерних та аналітичних розрахунків. Обґрунтовується нова схема реалізації віброударних режимів із двома проміжними опорами, що дозволяє

коригувати режими роботи, забезпечувати різноманітні кусково-лінійні пружні характеристики. Також розглянуто вирішення проблеми забезпечення динамічної жорсткості робочих органів вібраційних технологічних машин на основі аналізу власних форм і частот коливань.

**П'ятий розділ** містить результати розробки нових конструкцій вібраційних модулів, що можуть бути покладені в основу реалізації технологічних машин. Проведено експериментальні дослідження з використанням розроблено вібраційного модуля, на якому реалізовано одночастотні 50 Гц і 100 Гц режими, класичний та новий віброударні режими. Підтверджено роботу здатність реалізованих режимів, оцінено їхню ефективність за впровадженим показником. Результати досліджень повністю підтверджують основні положення запровадженого методологічного підходу, збігаються з теоретичними дослідженнями з розбіжністю у 19 %.

**Висновки** подано з врахуванням отриманих вагомих результатів дослідження. Додатки містять акти впровадження та розрахункові програми на яких отримано основні та проміжні результати.

**Автореферат** повністю відображає суть та основні результати дисертаційної роботи.

### **Основні зауваження до роботи та автореферату.**

1. Більшість технологічних машин працюють із середовищами, що мають складні фізико-механічні властивості, які суттєво змінюються під дією коливань. Використані автором показники для оцінки резонансних вібраційних машин не дають достатньої інформації про властивості оброблюваних систем, а тому не дозволяють встановити технологічну ефективність машин, що є визначальним фактором її впровадження.

2. У першому розділі дисертант перерахував основні параметри, що використовуються для опису віброударних процесів. Однак, до показників за якими здійснено оцінку вибрано тільки коефіцієнт асиметрії пришвидшення, а інші залишилися поза увагою. Авторіві потрібно додатково аргументувати

доцільність використання одного показника, що характеризує віброударні системи.

3. У першому розділі, більше уваги приділено класифікації, конструктивним особливостям, методам аналізу вібраційних машин. Доцільно було зосередитись на існуючих методах розрахунку та синтезу, в чому їх недоліки та необхідність подальшого розгляду.

4. Автором розглядав відому модель технологічних середовищ віброущільнення на рівні двочастотних моделей, а для віброударних машин чомусь це не розглядалося. Хоча саме останні більшою мірою доцільно застосовувати для більш складних за властивостями будівельних сумішей.

5. У розділі 3 автор розглядає вільні коливань віброударних систем із кусково-лінійними пружними характеристиками за методом припасовування, наводить отримані ним амплітудно-частотні залежності. Втім, такі задачі є вирішеними, а тому розгляд цієї задачі не є необхідним.

6. Електромагнітні процеси у віброзбуджувачі подано у спрощеній формі та не враховують втрати на перемагнічування та вихрові струми Фуко. Тому, проблематика приводу визначена недосконало, що не гарантує правильність отримання енергетичних характеристик.

7. Додатки занадто громіздкі, оскільки містять розрахункові програми, що повторюються для моделювання різних режимів. Варто було систематизувати додатки за типовістю розроблених програм.

8. Висновки до розділів громіздкі, містять недостатньо рекомендацій щодо використання результатів дослідження на практиці.

9. Автором розглянуто синтез вібраційних систем на моделях з лінійним в'язким тертям. У реальних технологічних системах тертя нелінійне та складне, тому невідомо, яким чином покажуть себе результати в дійсності на моделях із високим значенням дисипації.

10. У текстах дисертації зустрічають некоректності, неточності, стилістичні помилки.

**Загальний висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.**

1. Дисертаційна робота Гурського Володимира Миколайовича «Синтез нелінійних полічастотних вібраційних машин з резонансними режимами роботи» вирішує важливу наукову проблему синтезу параметрів і режимів роботи полічастотних вібраційних машин, забезпечення резонансних режимів роботи та підвищення ефективності функціонування. Результати мають високу наукову та практичну цінність, можуть бути використані під час розробки та модернізації вібраційних машин у різних галузях промисловості.

2. У 57 наукових працях повністю та змістовно представлено основні результати дисертаційної роботи.

3. Дисертаційна робота є завершеною, змістовною, виконаною відповідно до вимог ДАК і пп. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», за суттю відповідає паспорту обраної спеціальності 05.02.02 – машинознавство, а її автор, безумовно заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри машин та обладнання  
технологічних процесів  
Київського національного  
університету будівництва і архітектури,  
доктор технічних наук, професор,  
Заслужений дія науки і техніки України



I. I. Назаренко

Підпис доктора технічних наук, професора  
Назаренка Івана Івановича засвідчую:

Вчений секретар Вченої ради  
Київського національного  
університету будівництва і архітектури



О. С. Петренко