

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Гурського Володимира Миколайовича
«Синтез нелінійних полічастотних вібраційних машин з резонансними
режимами роботи», поданої на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство

Актуальність теми дисертації. Підвищення ефективності функціонування машин та обладнання є важливим науково-технічним напрямком розвитку машинобудування. Особливої уваги в цьому напрямку потребують вібраційні технологічні машини, що широко застосовуються в будівельній, гірничій, переробній та інших галузях. Найбільш технологічно ефективні віброударні машини складні за структурним виконанням, адже для них характерні складні динамічні процеси, можливість існування яких повинна узгоджуватися технологічними, енергетичними, конструктивними вимогами. Багатопараметричність згаданих систем спричинює проблеми їхнього синтезу, а наявні прикладні методи їх розрахунку є не достатньо досконалими, оскільки не повністю задовольняють вимоги енергоефективності функціонування. Зважаючи на складні умови функціонування, широкий спектр приводів, режимів роботи і характеристик, вирішити принципові питання раціонального їх синтезу не є можливим на даному етапі без розробки методології нового підходу. В основі методології доцільно на етапі синтезу врахувати не тільки визначені вимоги до технологічних машин у вигляді показників, значень параметрів, але й закласти можливість підвищення ефективності функціонування. Узагальнені показники є надійним математичним інструментом синтезу, що сприяє розв'язуванню задач, виходячи із умов раціонального функціонування за відповідних реалізованих режимів роботи. Саме цим питанням присвячена представлена дисертаційна робота, що вказує на її важливість і актуальність.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Дослідження базуються на

фундаментальних положеннях теорії коливань і стійкості руху для отримання математичних моделей коливальних процесів; чисельних методах RADAU, BDF, AdamsBDF для розв'язування систем нелінійних диференціальних рівнянь; чисельних методах спряжених градієнтів під час розв'язування оптимізаційних задач із визначеними обмеженнями; методі скінченних елементів у аналітичній постановці та комп'ютерному моделюванні напружено-деформованих станів і визначенні власних частот коливань елементів; використанні сучасних засобів 3D проектування та розробки конструкторської документації; використанні комп'ютеризованих засобів експериментального визначення основних кінематичних і динамічних характеристик; високому ступені збіжності результатів теоретичних і експериментальних досліджень, отримана похибка не перевищує 19 %. Тому, можна вважати, що отримані результати у вигляді наукових положень, практичних висновків і рекомендацій достатньо обґрунтовані та аргументовані.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробці нового узагальненого методологічного підходу, що уможливив синтез різного класу полічастотних вібраційних машин на предмет підвищення енергетичної ефективності їхнього функціонування та забезпечення резонансних режимів роботи. При цьому **вперше** отримано;

- 1) показники, які використано для оцінки ефективності функціонування різного класу та технологічних можливостей вібраційних машин, враховують основні технологічні, динамічні, енергетичні характеристики;
- 2) аналітичні залежності для розрахунку двочастотних резонансних машин, за якими виявлено закономірності впливу визначальних параметрів і умов збурення на основні кінематичні та силові характеристики;
- 3) закономірності руху двомасових віброударних систем, що визначаються новими співвідношеннями під час розрахунку коефіцієнтів жорсткості асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик та

забезпечують їх роботу за основним резонансом чи з використанням субгармоніки;

4) закономірності реалізації тримасових віброударних систем за новими співвідношеннями для розрахунку коефіцієнтів жорсткості лінійних і асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик.

Практична цінність результатів полягає у наступному:

Розроблені методи розрахунку двочастотних резонансних вібраційних машин із електромагнітним приводом, що використовуються для тримасових систем із визначеними значеннями коливальних мас та для модернізації базових двомасових машин.

Розроблені методи розрахунку дво- та тримасових віброударних машин різного технологічного призначення, що ґрунтуються на узагальненому методологічному підході щодо синтезу пружно-інерційних і силових параметрів із урахуванням кінематичних та динамічних обмежень.

Розроблені методики: проектного та перевірного розрахунків міцності пакету плоских пружин парціального модуля за умовами реалізації двочастотного резонансного режиму, що є конструктивним засобом для модернізації типових одночастотних резонансних машин; визначення напружено-деформованого стану та перевірки міцності плоскої пружини з двома проміжними циліндричними опорами за умовами реалізації віброударних режимів роботи; уточненого вибору проектних конструктивних параметрів робочих органів вібраційних технологічних машин на базі частотно-масового показника для забезпечення необхідних динамічної жорсткості та маси.

Розроблено: нові конструкції вібраційних двочастотних машин і резонансних модулів із електромагнітним і інерційним приводами із одночастотними і віброударними режимами роботи, захищені патентами України; експериментальний зразок резонансного вібраційного модуля з частотами коливань 50 Гц, 100 Гц, 50 Гц/100 Гц.

Результати дослідження впроваджено у вигляді: конструкторської документації для модернізації базового резонансного вібраційного стола із частотою коливань 100 Гц; методики розрахунку власних частот коливань, напружено-деформованого стану та уточненого вибору проектних параметрів робочих органів довгомірних конвеєрів та вібраційних столів для забезпечення їх жорсткості та зменшення маси з використанням частотно-масового показника; прикладних програм, алгоритмів розрахунку і аналізу вібраційних машин.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота містить вступ, 5 розділів, висновки, список використаних літературних джерел із 350 найменуваннями, додатки. Робота викладена на 475 сторінках, з них 365 стор. основного тексту.

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

У ***розділі 1*** виконано аналіз вібраційних технологічних процесів, наведено раціональні значення основних кінематичних і динамічних параметрів, узагальнено системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують коливальні процеси у вібраційних машинах з одно- та двотактним електромагнітним приводом. Встановлено, що для реалізації двочастотних резонансних вібраційних машин доцільно використати тримасові коливальні системи та імпульсні закони збурення на основі електромагнітних віброзбуджувачів. Автором зауважено, що необхідним є обґрунтувати їхні пружно-інерційні параметри, умови збурення та вивчити вплив параметрів на визначальні кінематичні та енергетичні характеристики.

Для раціональної побудови віброударних машин потрібно використовувати кусково-лінійні пружні характеристики, що на думку дисертанта потребують додаткового обґрунтування з точки зору підвищення ефективності функціонування та забезпечення різноманітних резонансних

режимів роботи. Встановлено, що вирішення поставлених завдань є неможливим без формування нового підходу, що уможливило раціональний синтез вібраційних машин різного технологічного призначення.

У *розділі 2* обґрунтовано показники, що покладено в основу узагальненого методологічного підходу для розгляду завдань синтезу і багатокритеріального аналізу вібраційних машин різного класу та технологічного призначення. Встановлено визначальний показник ефективності функціонування, технологічні показники для оцінки стійкості та наявності віброударного режиму, додаткові та конструктивні показники для оцінки роботоздатності машин.

Для реалізації двочастотних резонансних вібраційних машин із кратними частотами вільних коливань, отримано аналітичні залежності за якими визначаються пружно-інерційні параметри тримасових коливальних систем.

Отримано формули, що дозволяють модернізувати існуючі одночастотні резонансні машини з електромагнітним приводом введенням у структуру двомасової системи парціальний модуль із визначеними пружно-масовими характеристиками. Розроблено методику розрахунку модуля для модернізації машин за умовами реалізації двочастотних коливань. Виявлено особливості впливу маси парціального модуля на основні кінематичні та енергетичні характеристики модернізованої машини та дозволяє наперед синтезувати систему із визначеним складом гармонік робочого органа.

У *розділі 3* запроваджено методологію синтезу віброударних систем на основі визначення коефіцієнтів жорсткості асиметричної кусково-лінійної пружної характеристики відповідно до забезпечення найвищої ефективності функціонування та заданого набору кінематичних і динамічних обмежень. Останні використовують для реалізації віброударних систем із режимами роботи на основному чи субгармонійному резонансі. У процесі дослідження встановлено, що отримані системи різняться значеннями гармонік, відповідно дозволяє наперед їх синтезувати згідно технологічних вимог. Оцінено ефективності функціонування віброударних систем, розрахованих

відповідно до нового методу та підтверджено у Зрази вищу ефективність відносно машин з традиційним методом розрахунку. Проведено аналогічну задачу для синтезу коефіцієнтів жорсткості лінійних і кусково-лінійних пружних характеристик тримасових віброударних систем, які кращі за існуючі системи, оскільки їхня ефективність не суттєво залежить від інерційності коливальних мас. Загалом, даний розділ підтвердив дієвість запропонованого методологічного підходу, також обґрунтовано доцільність використання імпульсного закону збурення, що є наслідком використання однотактних схем.

Запроваджена методологія дозволила виконати багатокритеріальний аналіз різного класу (лінійних і нелінійних) вібраційних систем, визначено їхні показники та ефективності, комплексно оцінено їхні характеристики, закономірності руху та реалізації.

У *четвертому розділі* дисертаційної роботи виконано силовий та динамічний аналіз схеми реалізації асиметричної кусково-лінійної пружної характеристики на базі однієї плоскої пружини з двома симетрично розташованими під пружиною абсолютно жорсткими та податливими циліндричними опорами. Під час моделювання враховано контактні напруження між циліндричною опорою та плоскою пружиною, виконано порівняльний аналіз результатів згідно теоретичних розрахунків та моделювання засобом скінченно-елементного аналізу реальних 3D-моделей. Розглянуто вплив податливості проміжних опор у вигляді комбінованих полімерно-металевих стержнів на характеристики напруженого стану, зокрема підкреслено доцільність їх використання задля покращення умов роботи плоскої пружини під час реалізації віброударних режимів, оскільки суттєво зменшуються контактні напруження. Вперше запроваджено частотно-масовий показник для забезпечення динамічної жорсткості робочих органів вібраційних технологічних машин на основі вирішення оптимізаційної задачі з обмеженнями на частотні характеристики і масу конструкції.

У *розділі 5* автором наведено технічні характеристики нових конструкцій розроблених модулів вібраційного типу, що здатні реалізовувати синтезовані віброударні та гармонійні режими роботи. Розділ містить основні результати експериментальних досліджень для режимів роботи гармонійних (50 Гц і 100 Гц) і віброударних. Експериментально підтверджено підвищену у 3 рази ефективність віброударних синтезованих систем над існуючими віброударними, у 2 рази вищу ефективність відносно гармонійних машин.

Висновки містять узагальнені результати, показники ефективності синтезованих машин. Підтверджують вагомість, новизну та значимість дисертаційної роботи для науки і практики.

У *додатках* представлено усі розрахункові програми отриманих результатів та акти їх впровадження.

Зауваження до представленої дисертаційної роботи та автореферату.

1. У першому розділі автор наводить класифікацію та залежності для різноманітних пружних характеристик. Однак, синтез виконано на прикладі асиметричної кусково-лінійної пружної характеристики без зазору. Варто було вказати, чому саме автор зупинився саме на цій характеристиці.

2. Дослідження математичних моделей динаміки синтезованих машин виконано при обмежених характеристиках і моделях навантаження. Доцільно було представити різноманітні навантажувальні характеристики та оцінити поведінку цих машин у різних умовах.

3. Під час моделювання автор використовував різні значення деяких параметрів у системах нелінійних диференціальних рівнянь, зокрема зустрічаються різні характеристики мас, демпфування, конструктивні параметри електромагнітів. Доволі зручно було б, якщо автор побудував дослідження на моделях із типовими характеристиками, наприклад для однієї маси робочого органа чи однієї маси навантаження. Це дозволило б краще зрозуміти результат впровадження того чи іншого методу розрахунку.

4. Розділ 3 дисертаційної роботи переобтяжений результатами динамічного аналізу. Авторів не потрібно було відображувати усі, отримані у процесі дослідження часові характеристики (напр. для сили струму, тягового зусилля), а зосередитись тільки на принципових.

5. Усі дослідження виконані на моделях із детермінованими характеристиками, і не відомо, яким чином зміниться ефективність реалізованих систем у випадку стохастичних параметрів, зокрема маси і коефіцієнтів жорсткості, та які допустимі межі зміни найбільш вагомих параметрів системи.

6. У 5.2.5 (с. 336) йдеться про формування методики проектування резонансних віброударних машин. Авторів варто було більш детально вказати, яким чином інтегрувати запропоновані методи до відомих інженерних задач розрахунку та проектування технологічних машин, зокрема грохотів, сепараторів, дробарок та іншого обладнання.

7. Перевірку міцності та довговічності плоскої пружини під час реалізації віброударних режимів виконано не у повній відповідності до ГОСТ 25.504-82.

8. Автор не вказав, із яким навантаженням проводилися експериментальні дослідження та які допустимі межі завантаження приймаються.

Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота Гурського Володимира Миколайовича «Синтез нелінійних полічастотних вібраційних машин з резонансними режимами роботи» є завершеною науковою працею, що вирішує актуальну науково-практичну проблему підвищення ефективності функціонування та забезпечення резонансних режимів роботи полічастотних вібраційних машин на основі наукового обґрунтування узагальненого методологічного підходу у їх синтезі.

Основні результати дисертаційної роботи повної мірою відображені в авторефераті та 57 наукових працях.

Дисертаційна робота відповідає вимогам ДАК, пп. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», паспорту спеціальності 05.02.02 – машинознавство, а її автор – Гурський Володимир Миколайович заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук.

**Офіційний опонент,
професор кафедри машинознавства
Національного авіаційного університету,
доктор технічних наук, професор**

Носко П. Л.

