

ВІДГУК

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

Актуальність теми дисертації, її відповідність сучасним напрямкам розвитку науки і техніки. Характеристика об'єкту та предмету дослідження.

Розвиток технологій формує новий комплекс підвищених вимог до якості поверхонь, що досягається механічною обробкою, поверхневим зміцненням, нанесенням покриттів, зміною структури та модифікацією внутрішніх поверхневих шарів виробів і деталей машин тощо. Ці операції частково забезпечуються вібраційними технологічними машинами. Поширені в промисловості вібраційні машини з одночастотними режимами роботи мають низьку технологічну ефективність в згаданих процесах, тому доцільніше застосовувати машини, що генерують більше число гармонік – полічастотні. В світовій практиці наразі домінують високочастотні системи, а реалізація віброударних систем полягає саме у можливості генерації кратних відносно частоти збурення високочастотних складових. Окрім забезпечення вимог технологічного характеру потрібно підвищувати якість та ефективність роботи вібраційних машин нового типу. Відповідно дослідження ефективності функціонування таких систем наразі є актуальним. Вирішення цієї проблеми доцільно здійснювати на основі узагальненого підходу, що дозволяє враховувати технологічні та енергетичні вимоги під час синтезу вібраційних машин.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до вимог “Державної цільової науково-технічної програми розвитку машинобудування на 2012–2017 рр.”, що спрямована на впровадження ресурсозберігаючих технологій, створення нових зразків сучасних машин і обладнання, модернізацію існуючих моделей машинобудівної продукції.

Об'єктом дослідження в дисертації є резонансні режими роботи полічастотних вібраційних машин. Предметом – параметри, характеристики, показники ефективності функціонування вібраційних машин.

Оцінка змісту роботи, характеру викладення матеріалу та суті досліджень.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів досліджень, висновків, додатків і списку використаних літературних джерел із 350

найменувань. Зміст роботи викладено на 475 сторінках, з них 365 стор. основного тексту, 110 стор. додатків.

У вступі подано актуальність теми, її зв'язок з науковими програмами, мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення, апробацію та особистий внесок здобувача.

У першому розділі наведено внесок вчених у розвиток науки та практики застосування вібраційних машин. Узагальнено технологічні процеси та встановлено відповідні їм раціональні режими роботи вібраційних машин. У результаті аналізу встановлено, що машини із полічастотними коливаннями є найбільш технологічно ефективними в енергоємних процесах виробництва. Наведено принципові кінематичні, динамічні та енергетичні параметри, що використовують для оцінки віброударних процесів, а також особливості використання основних типів приводів вібраційних машин. Обґрунтовано використання імпульсного електромагнітного віброзбуджувача для реалізації машин із полічастотними коливаннями та резонансними режимами роботи, що реалізують енергоефективні принципи їх роботи.

Узагальнено системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують коливальні процеси в системі електромагнітний привод – коливальна система дво- та тримасових вібраційних машин з одно- та двотактною схемами живлення. Проаналізовано енергетичні перетворення та динаміку нелінійного привода за якими встановлено закономірності розподілу втрат.

Визначено засоби реалізації вібраційних машин із полічастотними коливаннями, зокрема двочастотними та віброударними режимами. Установлено, що раціональним рішенням для реалізації двочастотних резонансних режимів є використання тримасових систем з кратними власними частотами на основі імпульсного електромагнітного збурення. Проте, наявні дослідження не містять кінцевих аналітичних формул для реалізації двочастотних систем, а також невирішеним є завдання синтезу параметрів за умови забезпечення заданих амплітудних значень гармонік пришвидшення робочої маси.

Встановлено, що ефективним способом реалізації резонансних віброударних систем є застосування кусково-лінійних пружних характеристик. Проте, для таких суттєво-нелінійних систем характерна недосконалість аналітичних методів розрахунку та синтезу, що ускладнює шляхи їх практичної реалізації. Зокрема, наявні методи розрахунку не дозволяють закласти принципи підвищення ефективності функціонування (за рахунок урахування співвідношень пружно-інерційних і силових параметрів), що неможливо без використання принципів узагальненого підходу, на основі яких на стадії аналізу та синтезу враховується визначений

комплекс вимог технологічного характеру у вигляді кінематичних і динамічних обмежень.

У другому розділі визначено набір показників, що потрібно використовувати для оцінювання ефективності функціонування різного класу та призначення вібраційних резонансних машин: 1) частотно-масовий показник – для уточненого вибору конструктивних параметрів робочих органів вібраційних технологічних машин; 2) коефіцієнт асиметрії пришвидшення робочої маси – для встановлення наявності віброударного режиму роботи та його відповідність до технологічного призначення машини; 3) ширина резонансної зони – як фактор стійкості резонансної машини до зміни технологічних умов; 4) ККД вібраційної системи – для оцінки ефективності функціонування приводу та вибору номінального повітряного проміжку між якорем та осердям; 5) відношення максимуму пришвидшення робочої маси до споживаної потужності – ключовий енергетичний показник ефективності функціонування, що застосовується як цільова функція оптимізаційних задач.

На підставі уточнених і запроваджених показників сформовано узагальнену оптимізаційну задачу для синтезу відповідних резонансних вібраційних машин.

За результатами аналізу вільних коливань визначено розрахункові формули для забезпечення кратних двочастотних резонансних режимів тримасових лінійних систем. Реалізовано формули, що покладено в основу методу розрахунку двочастотних резонансних вібраційних машин. Здійснено порівняльний аналіз синтезованих машин з вивченням впливу умов збурення на гармонійний склад двочастотного режиму. Отримано формули для реалізації двочастотних резонансних систем для модернізації одночастотних двомасових резонансних систем. Проведено динамічний аналіз на предмет впливу інерційних параметрів модернізованої системи на її енергетичні та динамічні характеристики. За результатами досліджень модернізовано у двочастотний базовий вібраційний стіл для ущільнення бетонних сумішей та формування виробів за умови забезпечення заданого відношення кратних амплітудних значень гармонік пришвидшення.

У третьому розділі реалізовано розрахунковий метод для проведення на його основі синтезу віброударних резонансних систем із визначеним набором технологічних і динамічних обмежень. Для виконання синтезу асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик, передусім коефіцієнтів жорсткості, запроваджено два коефіцієнти Θ і Λ , що входять у значення частот вільних коливань. Даний підхід суттєво спростив процедуру синтезу. Аналітично встановлено, що для реалізації резонансних віброударних систем із визначеним значенням резонансного налагодження оптимальні значення

коефіцієнтів $\Theta = 0,75$ і $\Lambda = 2$ забезпечують максимальне значення пришвидшення робочої маси, що переважає синтезоване для класичних віброударних систем, розрахованих за $\Theta = 1$ і $\Lambda = 2$. Обґрунтовано вищим значенням ключового енергетичного показника використання однократної схеми вмикання електромагнітів віброударної системи з навантаженням у вигляді моделі сухого тертя відносно гармонійних машин із двотактною схемою живлення. Для пружних характеристик зі збільшенням попереднього натягу оцінено вплив на амплітудні значення гармонік пришвидшення робочої маси, зокрема встановлено, що суттєвого впливу зазнає амплітудне значення першої гармоніки. Розглянуто вплив номінального значення зусилля збурення на значення коефіцієнта асиметрії пришвидшення, який залишається сталим для беззазорних пружних характеристик та лінійно зростає для систем із зазором. Також встановлено, що системи без зазору в пружних характеристиках володіють АЧХ типовою для лінійних систем, а системи із зазором мають вид нелінійних АЧХ за типом систем із м'якою характеристикою. Для обох типів пружних характеристик наявна кратна субгармоніка порядку $\frac{1}{2}$.

Розроблено метод розрахунку та алгоритм синтезу пружно-інерційних і силових параметрів віброударних систем, згідно якого аналітична складова методу визначена використаннями формул з врахуванням коефіцієнтів Θ і Λ у системах нелінійних диференціальних рівнянь у функціональній залежності відповідно до синтезованих параметрів.

Розв'язування систем нелінійних диференціальних рівнянь здійснено числовими методами Radau, BDF, Adams, а оптимізаційної задачі – методом спряжених градієнтів із врахуванням технологічних і динамічних обмежень. Розв'язано ряд задач для різних оптимізаційних умов як для класичних віброударних систем $\Theta = 1$, так і для синтезованих за новим принципом $\Theta \neq 1$.

Синтезовано нові віброударні системи із кінематичними обмеженнями за основним резонансом та за субгармонійним принципом. Ефективність функціонування синтезованих систем оцінена показниками на частоті як для основного режиму, так і для роботи на субгармоніці.

Розв'язано задачу аналізу динамічної стійкості синтезованих віброударних систем, зведених до рівнянь типу Хілла та Мать'є з використанням програмного продукту Maple та спеціалізованих функцій для аналізу стійкості за діаграмою Айста-Стретта. Для аналізу вимушених коливань параметричних рівнянь з розкладом пружної характеристики в ряд Фур'є із визначеним числом гармонік використано методи Бубнова-Гальоркіна та Левентберга-Марквардта. Здійснено порівняння та кореляційний аналіз розв'язків за методами Бубнова-Гальоркіна та Рунге-

Кутти з адаптивним кроком. Залежно від числа гармонік, за якими шукався розв'язок нелінійного рівняння, наведено значення коефіцієнтів кореляції Пірсона для усіх кінематичних параметрів для обґрунтованого вибору числа гармонік у розкладі пружної характеристики та числа гармонік у шуканому розв'язку.

Розроблено алгоритм синтезу коефіцієнтів жорсткості тримасових віброударних систем з лінійними та кусково-лінійними пружними характеристиками. У результаті встановлено, що віброударний режим існує на коливальних масах, що зазнають силового збурення та між якими реалізовано кусково-лінійну пружну характеристику, а із збільшенням інерційності реактивної маси синтезовані віброударні системи практично не втрачають ефективності, на відміну від лінійних. Здійснено порівняльний аналіз віброударних систем, синтезованих за розробленим методом із накладеними кінематичними обмеженнями та підтверджено вищу в 1,5 рази ефективність тримасових конструкцій над двомасовими.

Проведено багатокритеріальний аналіз резонансних систем із встановленим набором показників за імпульсного та гармонійного збурень. Здійснено оцінку за технологічним, енергетичним принципом та комплексно. Встановлено енергетичні переваги за показниками максимум пришвидшення / споживана потужність (більш як у 2 рази) віброударної системи з оптимальною пружною характеристикою за імпульсного збурення. Використання імпульсного збурення є цілком виправданим із конструктивних міркувань. Використання двотактного привода для таких систем не дає суттєвих переваг. На противагу їй двотактна схема вмикання є принциповою для реалізації тримасових високоефективних систем. Зокрема, віброударна система з оптимальною пружною характеристикою за імпульсного збурення рівноцінна за енергетичним показником до тримасової високоефективної, а за двотактного дещо переважає її.

У четвертому розділі розглянуто проектування та забезпечення працездатності досліджуваних машин. Запропоновано схему реалізації асиметричної кусково-лінійної пружної характеристики на базі однієї плоскої пружини з двома, симетрично розташованими під пружиною циліндричними опорами з урахуванням їх жорсткості. Методом скінченних елементів отримано розрахункові формули для визначення частот вільних коливань, а також місць розташування проміжних опор для забезпечення заданого відношення частот коливань. Здійснено силовий аналіз плоскої пружини під час забезпечення віброударних режимів, побудовано епюри пружно-деформованих станів, визначено реакції між циліндричною опорою та плоскою пружиною. Розглянуто аналіз напружено-деформованого стану з врахуванням контактної задачі між плоскою пружиною та циліндричною

опорою, визначено контактні напруження за використання абсолютно жорстких металевих пружних стержнів. Встановлено вплив податливості проміжних опор на значення власної частоти коливань. Розглянуто динаміку напруженого стану та визначено орієнтовне значення коефіцієнта запасу міцності та довговічність пружини за умовами реалізації віброударного режиму. Проведено аналогічні розрахунки напружених станів плоскої пружини за допомогою модуля Simulation програми SolidWorks. Збіжність результатів знаходиться в межах 94%.

Розглянуто доцільність впровадження частотно-масового показника для забезпечення динамічної жорсткості за мінімальної маси різного роду стержневих систем. Ефективність використання частотно-масового показника апробовано під час проектування та вибору оптимальних конструктивних параметрів робочих органів вібраційних технологічних машин. Його використання зумовлено забезпеченням високої динамічної жорсткості та 3-4 кратного запасу за значенням першої власної частоти коливань як системи з розподіленими параметрами. Розв'язок та аналіз оптимізаційних рішень здійснено постановкою відповідних оптимізаційних задач в прикладних програмах частотного аналізу. Уточнено конструктивні параметри я робочих органів 100 Гц вібростола та довгомірного вібраційного конвеєра із частотою коливань 25 Гц.

У п'ятому розділі розроблено уніфіковані конструкції вібраційних модулів із змінними налагодженнями режимів – одночастотних і віброударних, наведено їхні технічні характеристики. Реалізовано експериментальний зразок вібраційного модуля з можливістю реалізації як традиційних одночастотних ($\Theta = 1$ і $\Lambda = 1$) і віброударних режимів ($\Theta = 1$ і $\Lambda \neq 1$), так і синтезованого ($\Theta = 0,8$ і $\Lambda = 2,2$) за новим розрахунковим методом. Остання конструкція характеризується підвищеною ефективністю функціонування та переважає за енергетичним показником одночастотні у 2 рази, віброударні класичні у 3 рази. Наведено експериментальні віброграми пришвидшення робочого органа та здійснено їхній спектральний аналіз для оцінки величини амплітудно-частотних гармонік. Практику застосування розробленого резонансного вібраційного модуля апробовано та отримано підвищення зносостійкості під час технології наплавлення шарів покриття на металеві листи. Сформульовано загальні висновки, їх новизна та значимість за результатами дисертаційної роботи. Стиль та мова в дисертаційній роботі на належному технічному рівні.

Достовірність, новизна висновків та рекомендацій.

Дисертаційна робота базується на фундаментальних законах та методах теорії коливань, стійкості руху, динаміки машин, теорії пружності та міцності. Розв'язування математичних моделей у вигляді систем нелінійних

диференціальних рівнянь, що описують коливальні процеси у вібраційних машинах здійснено чисельними методами RADAU, BDF, AdamsBDF.

Дослідження вібраційних машин супроводжено розробленням їхніх 3D-моделей та конструкторської документації. Метод скінченних елементів використано для розрахунку: напружено-деформованого стану та перевірки міцності плоскої пружини за умовами реалізації віброударного режиму; власних частот коливань плоских пружин, парціальних модулів, робочих органів, а також синтезу конструктивних параметрів під час проектування вібраційних машин.

Висновки по результатах досліджень є новими, обґрунтовані введенням конкретних припущень, застосуванням ефективного теоретичного апарату та підтвердженням розроблених положень експериментальними дослідженнями. Достовірність результатів підтверджена дослідною перевіркою розроблених пристроїв та позитивним досвідом впровадження результатів досліджень.

Наукова новизна виконаної роботи полягає у наступному, де вперше:

1) науково обґрунтований узагальнений методологічний підхід для синтезу різного класу полічастотних вібраційних машин, що розширює наші уявлення про властивості систем та можливості підвищення енергетичної ефективності їхнього функціонування у резонансних режимах роботи;

2) запропоновано показники, які використано для оцінки ефективності функціонування різного класу та технологічних можливостей вібраційних машин, де враховуються основні технологічні, динамічні, енергетичні характеристики, а також є необхідними для їхнього синтезу і багатокритеріального аналізу;

3) отримано аналітичні залежності для розрахунку двочастотних резонансних машин з імпульсним електромагнітним збуренням, за якими виявлено закономірності впливу пружно-інерційних параметрів і умов збурення на основні кінематичні та силові характеристики;

4) встановлено закономірності руху двомасових віброударних систем, які полягають у можливості їх функціонування за основним резонансом чи з використанням субгармоніки, та базуються на отриманих нових співвідношеннях для розрахунку коефіцієнтів жорсткості асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик;

5) встановлено закономірності руху тримасових віброударних систем на основі отриманих нових співвідношень для розрахунку коефіцієнтів жорсткості лінійних і асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик, що забезпечують існування віброударного режиму між масами, які зазнають силового збурення та використовують кусково-лінійну пружну характеристику.

Практичне значення отриманих результатів.

1. 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.

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

3. 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.

4. Розроблено нові конструкції двочастотних машин і резонансних модулів для реалізації на їхній основі вібраційних технологічних машин з електромагнітним і інерційним приводами із одночастотними і віброударними режимами роботи, що захищені патентами України.

5. Розроблено експериментальний зразок резонансного вібраційного модуля з частотами коливань 50 Гц, 100 Гц, 50 Гц/100 Гц, який використано для наплавлення зносостійких шарів із порошкових дротів на кафедрі зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій Національного університету “Львівська політехніка”.

6. Впроваджено конструкторську документацію та практичні рекомендації для модернізації базового резонансного вібраційного стола; 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 на ПрАТ “Конвеєр”; прикладні програми, алгоритми розрахунку, моделювання, методики синтезу і динамічного аналізу вібраційних машин і систем.

Зауваження по роботі та автореферату.

1. Автором не обґрунтовано, якого типу синтез повинен розглядатися, його суть явно не виходить ні з назви роботи, ані з результатів аналізу літературних джерел. Очевидно, що мова йде тільки про параметричний синтез машин.

2. Авторіві доцільно було сформулювати інтегральний критерій якості на основі запроваджених показників ефективності, що дало б можливість запроваджувати синтез із урахуванням усіх часткових показників.

3. Використаний метод спряжених градієнтів під час розв'язування оптимізаційних задач є не зовсім вдалим для завдань такого типу, оскільки його розв'язок суттєво залежить від вибору початкових наближень.

4. Експериментальні дослідження не містять повної інформації про метрологічні характеристики вимірювальних приладів, а самі дослідження обмежуються аналізом кінематичних параметрів. У роботі відсутній експериментальний аналіз деформацій і міцності, зокрема для плоскої пружини.

5. Назви розділів дисертаційної роботи є занадто громіздкими та передбачають розгляд широкого кола питань. Тому, в основній частині дисертаційної роботи наведено багато інформації, що є ілюстративною або довідковою для формулювання основних висновків та положень щодо розробки методології синтезу вібраційних систем. Її варто було б представити у додатках.

6. Дисертаційна робота перенасичена графічним матеріалом, кількість якого можна було зменшити за рахунок подачі залежностей для різних режимів роботи на одному графічному полі.

7. Результати дисертаційної роботи не містять детальної економічної оцінки ефективності та доцільності впровадження отриманих результатів, зокрема для модернізації машин відповідного класу.

Висновок про відповідність дисертації вимогам «Порядку присудження наукових ступенів».

1. Дисертаційна робота Гурського Володимира Миколайовича «Синтез нелінійних полічастотних вібраційних машин з резонансними режимами роботи» має наукову і практичну цінність, полягає у розв'язанні важливої науково-прикладної проблеми для різноманітних галузей промисловості, зокрема машинобудування, будівельна, гірничо-промисловості – розробленні узагальненого методологічного підходу для синтезу пружно-інерційних, силових параметрів і частотних характеристик полічастотних вібраційних

машин для забезпечення резонансних режимів роботи та підвищення ефективності функціонування.

2. Автореферат дисертації повністю відображає зміст дисертації і структурований відповідно до розділів дисертаційної роботи. У 57 наукових працях повністю відображено суть та результати дисертаційної роботи відповідно до вимог ДАК України.

3. Дисертаційна робота відповідає вимогам ДАК України, зокрема пп. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р., №567, а її автор Гурський Володимир Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – «Машинознавство».

ОФЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

Завідувач кафедри технологій
та автоматизації машинобудування
Вінницького національного технічного університету
доктор технічних наук, доцент



Козлов Л. Г.

Підпис *Козлова Л. Г.*
ПОСВІДЧУЮ
Зав. канцелярією *[Signature]*