

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, доцента Дедова Олега Павловича на дисертаційну роботу Качура Олександра Юрійовича на тему:

«Обґрунтування параметрів дискретно-континуальних міжрезонансних вібраційних машин з керованим кривошипно-шатунним приводом», подану на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» (галузь знань 13 «Механічна інженерія»).

### **Актуальність теми дисертації**

Проблема енергозбереження на даний час є однією з пріоритетних, вона тісно переплітається з проблемами енергетики, екології, технічного переобладнання та структурної перебудови всієї економіки. Важливість енергозбереження підтверджується статусом державної політики та державними органами в усіх високорозвинутих країнах (Японія, США, Франція, Німеччина, Велика Британія тощо). Майже всі розвинуті країни світу прийняли відповідні законодавчі акти та створили як загальнодержавні, так і регіональні органи з управління енергозбереженням. Україна в цьому плані також не відстає, саме тому можна виокремити необхідність енергозбереження у машинобудуванні, невід'ємною частиною якого є вібраційне технологічне обладнання. Найбільш поширеним класом вібраційних машин є одно- та двомасові, що застосовуються в промисловості і загалом задовольняють технологічні потреби, але, як правило, не відповідають концепції енергозбереження так як їх конструкції вичерпали свій потенціал. Останнім часом дослідження спрямовані на вивчення багатомасових конструкцій, в яких можливе застосування низки їх внутрішніх властивостей, які спрямовані на реалізацію більш складних режимів роботи, в тому числі міжрезонансні системи, завдяки яким можна досягнути високу ефективність функціонування. Хоча існуючі машин такого класу з електромагнітним приводом мають ряд недоліків, зокрема проблему стабілізації амплітуди коливань реактивної маси, яка в резонансних режимах може набувати критичних значень, і як наслідок, причиною нестабільної роботи системи. В системах з дебалансним приводом існують труднощі проходження першого, основного резонансу, що теж обмежує їх застосування та подальший розвиток.

Зважаючи на перспективність подальших досліджень міжрезонансних вібраційних машин, коливальні системи яких можуть забезпечувати високоефективні режими роботи, існує необхідність подальших досліджень в цьому напрямку, що дозволить реалізувати дієві енергоощадні вібраційні машини для промисловості України. Тож пошук нових структур і підходів у розрахунку міжрезонансних вібраційних машин, приводи яких здатні безперешкодно входити в міжрезонансну зону та приводити в рух надлегкі реактивні маси, реалізуючи дієві високоефективні конструкції, є актуальною науково-прикладною задачею машинобудування.

### **Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри**

Дисертаційні дослідження узгоджуються із Законом України про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2012, № 19-20, ст. 166 (із змінами внесеними згідно із Законом № 5460-VI від 16.10.2012, ВВР, 2014, № 2-3, ст. 41)), де в статті 4 «Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011-2021 роки», декларується освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії.

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри робототехніки та



інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт кафедри: «Динаміка, міцність та надійність механічних систем, автоматизація виробництв і технічна діагностика обладнання».

### **Аналіз змісту дисертаційної роботи**

Дисертація складається із анотації, змісту, переліку тлумачень, переліку умовних позначень, вступу, п'ятьох розділів, висновків; списку використаних джерел з 169 найменувань, 14 додатків, 64 рисунків та 7 таблиць. Загальний обсяг роботи – 306 сторінок.

У **вступі** обгрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, сформульовано мету, задачі, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Оцінено особистий внесок здобувача в одержаних результатах показано зв'язок дисертації з науковими програмами та планами університету, де виконана робота, визначено об'єкт та предмет досліджень, наведено інформацію щодо апробації результатів дисертації, публікацій автора, структури та обсягу дисертації.

У **першому** розділі дисертаційної роботи автором проведено літературний огляд сучасного стану та напрямків удосконалення вібраційних машин з метою пошуку шляхів вирішення поставленої науково-прикладної задачі. Встановлено, що найбільш придатними для дисертаційної роботи є тримасові коливальні системи, яким властиві високі коефіцієнти динамічності. Виявлено, що тримасові міжрезонансні коливальні системи з електромагнітним приводом вичерпали свій потенціал. Тож автором обгрунтована необхідність пошуку нових структур, на основі яких можна буде розробити дієве високоефективне вібраційне обладнання.

Проведений огляд попередніх досліджень та виконаний їх аналіз дозволив автору сформулювати ідею та гіпотезу, згідно яких попередньо прийнята структурна схема механічної коливальної системи вібраційної машини з континуальною ділянкою та кривошипно-шатунним механізмом для збурення системи. Визначені завдання та поставлені задачі подальших досліджень.

У **другому** розділі наведено методологію досліджень континуальної ділянки (стержня), розглянуто диференціальне рівняння зігнутої осі стержня, з якого отримано відомі аналітичні залежності згинального моменту та поперечної сили, з яких були встановлені поперечні прогини. Розглянуто методика формування диференціального рівняння згинальних коливань стержня для опису його вимушеного руху та визначення власної частоти коливань. Наведено метод Релея-Рітца, з допомогою якого можна наближено визначити власну частоту стержня. Проаналізовано методологію встановлення параметрів дискретної тримасової міжрезонансної коливальної системи, що стала еталонною при аналізі дискретно-континуальної. Запропонована методика пошуку зведеної швидкості стержня, що надало змогу виокремити точку, в яку здобувач зводить інерційно-жорсткісні параметри, що стало ключовим для чіткого встановлення зведених маси і жорсткості, які задіяні в коливальному процесі. Саме на основі методу Релея-Рітца проведено встановлення зведених маси і жорсткості.

У **третьому** розділі проведено обгрунтування інерційно-пружних та силові параметрів високоефективної дискретної тримасової міжрезонансної коливальної системи вібраційного транспортера-сепаратора, яка стала еталонною моделлю для формування дискретно-континуальної системи. Встановлено основні технологічні та конструктивні параметри еталонної системи, а саме: обгрунтовано використання низькочастотних режимів роботи; визначені параметри активної та проміжної коливальних мас; з метою забезпечення необхідного додаткового динамічного підсилення коливань вибрано розташування резонансних піків;



встановлене інерційне значення реактивної маси та жорсткостей двох резонансних пружних вузлів. Розглянута математична модель еталонної дискретної коливальної системи, побудовані амплітудно-частотні характеристики на яких виявлено, що активна та проміжна маси в міжрезонансній зоні мають сідлоподібний характер, а реактивна маса – стрімкоподібний, а її амплітуда коливань (без врахування дисипації) досягає декількох десятків міліметрів. Опираючись на отриманий результат, автор звертає увагу на недоцільність використання електромагнітного збурення для такої коливальної системи, оскільки повітряний проміжок між якорем та осердям з котушками вібробуджувача в процесі коливань рівний амплітуді. У такому випадку дійсно має місце застосування кривошипно-шатунного механізму. Підтверджена ефективність функціонування еталонної тримасової дискретної системи у порівнянні з аналогічною двомасовою резонансною. Визначено парціальну частоту коливань реактивної маси, яка є визначальною під час підбору континуальної ділянки. Записано диференціальне рівняння 2-го порядку для опису еталонної дискретної моделі лінійної механічної коливальної системи з використанням методу Д'Аламбера. Одержані параметри системи, дозволили отримати чисельний розв'язок диференціальних рівнянь за допомогою методу Рунге-Кутта. Проведено імітаційне моделювання руху активної маси дискретної тримасової коливальної системи.

У **четвертому** розділі розглянуто вільні згинальні коливання континуальної ділянки з використанням колових та гіперболічних функцій Крилова і встановлено її першу власну частоту коливань. Розглянуто вимушені коливання континуальної ділянки та сформовано на основі функцій Крилова математичну модель у вигляді системи рівнянь, що описує її рух. Сформовано математичну модель дискретно-континуальної коливальної системи вібраційної машини, в якій через реакції в опорах континуальної ділянки поєднано дискретну частину системи з континуальною. Побудовано амплітудно-частотну характеристику дискретно-континуальної коливальної системи, яка узгодилась із характеристикою еталонної дискретної тримасової. Побудовано схему прогинів континуальної ділянки та розраховано її на міцність. Власну частоту коливань перевірено наближеним методом Релея-Рітца. Встановлено зведену масу та зведену жорсткість континуальної ділянки, які узгодилися із розрахунковими значеннями.

**П'ятий** розділ присвячений остаточному формуванню та дослідженню дискретно-континуальної міжрезонансної вібраційної машини. В цьому розділі розглянуто керований кривошипно-шатунний привод, обґрунтовано його конструктивні та експлуатаційні параметри, наведено його переваги по відношенню до існуючих та можливі сфери застосування. За допомогою методу замкнених векторних контурів описано кінематику механізму, на основі чого отримано аналітичні вирази, які описують залежність зміни ексцентриситету від переміщення керованого повзуна. Побудовано відповідні графіки. Проведено імітаційне моделювання руху механізму, що підтвердило правильність отриманих виразів та результатів чисельного моделювання.

Проведені аналітичні розрахунки жорсткісних параметрів пружних елементів, які узгодились з дискретною математичною моделлю. Встановлені їх геометричні параметри та аналітично розраховано напруження, що виникають в них. Проведене комп'ютерне моделювання пружного елемента методом скінченних елементів. Що дозволило перевірити результати аналітичних обрахунків жорсткості та максимальних напружень, які виникають у ньому.

Встановлена необхідна частота власних коливань системи з умови віброізоляції, на основі чого вибрано відповідні виті пружини та проведено їх розрахунок на жорсткість та міцність.



Також автором здійснена перевірка розрахунків та методом скінченних елементів виконане комп'ютерне моделювання.

Виконані експериментальні дослідження, на основі яких встановлена парціальна частота коливань континуальної ділянки. На основі знятих часових залежностей руху активної та проміжної мас, побудована амплітудно-частотна характеристика, яка має аналогічний характер з характеристиками, отриманими теоретичним шляхом, що загалом вказує на правильність розробленої методології дисертаційних досліджень та адекватність використаних моделей. Варто відмітити про безперешкодний вхід у міжрезонансну зону керованого кривошипно-шатунного привода, що дозволило автору стверджувати про обґрунтованість використання запропонованих структур під час створення високоефективних міжрезонансних вібраційних машин.

На основі проведених досліджень наведена методика розрахунку дискретно-континуального міжрезонансного вібраційного транспортера-сепаратора.

У **висновках** наведені наукові та практичні результати, отримані в процесі виконання дисертаційної роботи.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

На основі вивчення матеріалів дисертації наукову новизну роботи можна сформулювати наступним чином:

– вперше отримано математичну модель вимушених коливань стержня, що встановлений на двох шарнірних опорах, один з кінців якого консольно закріплений, а другий приводиться в рух від ексцентрика;

– вперше отримано адекватну математичну модель дискретно-континуальної міжрезонансної вібраційної машини, де зведення континуальної ділянки з дискретною частиною коливальної системи проведене через реакції в опорах стержня;

– вперше обґрунтовано методику встановлення зведеної жорсткості та зведеної маси стержня з розподіленими параметрами.

### **Практична цінність результатів дослідження**

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні ефективних концепцій побудови та інженерних методик розрахунку дискретно-континуального вібраційного технологічного обладнання різноманітного технологічного призначення, здатного ефективно реалізовувати міжрезонансні режими роботи.

Слід підкреслити, що розроблені здобувачем наробки впроваджено у навчальному процесі кафедри для підготовки студентів освітнього рівня магістр спеціальності 131 «Прикладна механіка». Також одним із важливих здобутків автора є впровадження методології побудови високоефективних міжрезонансних вібраційних машин для виготовлення бетонних виробів структурою ФОП Струк М. І. (м. Миколаїв Львівської області), що підтверджено відповідними нормативно-правовими документами.

### **Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій**

Отримані результати й запропоновані автором рішення, висновки, рекомендації, сформовані в дисертаційній роботі, базуються на значному обсязі теоретичних та експериментальних досліджень з використанням методів чисельного та імітаційного моделювання, є логічними та науково обґрунтованими, апробація результатів дисертаційної



роботи відбувалася на XVII-й Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 140-річчю випуску інженерів-механіків у Львівській політехніці (Львів, 2018 р.); VI-й Міжнародній науково-технічній конференції (Львів, 2018 р.); XIV-ому Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2019 р.); Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Експлуатаційна та сервісна інженерія» (м. Харків, 2020 р.); V Міжнародній науковій конференції з нових тенденцій у науці та освіті «Theoretical and scientific bases of development of scientific thought», (м. Рим, Італія, 2021 р.), 50th International JVE Conference (м. Дубаї, Об'єднані Арабські Емірати, 2021 р.), XIX Всеукраїнська науково-технічна конференції «Потураївські читання», (м. Дніпро, 2021 р.), 51st International JVE Conference (м. Дублін, Ірландія, 2021 р.); XV-ому Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2021 р.).

**Повнота викладу матеріалів дисертації в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.**

Основні положення та результати дисертаційних досліджень відображено у 19-ти наукових працях, з них 5 статей у фахових виданнях України, з яких 2 статті у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International; 3 статті у періодичних виданнях інших держав, які включено до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS; 10 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях; 1 патент України на корисну модель.

#### **Відсутність порушення академічної доброчесності**

За результатами аналізу дисертаційної роботи, публікацій автора та документів, що засвідчують перевірку роботи на плагіат на основі відкритих інтернет-ресурсів, ознак академічного плагіату не виявлено. У тексті дисертації здобувачем застосовано посилання на наукові публікації як власні, так і інших авторів. Елементів фальсифікації чи фабрикації тексту у роботі також не виявлено. Це дає можливість зробити висновок про відсутність порушень академічної доброчесності у дисертаційній роботі Качура О. Ю.

#### **До зауважень дисертації слід віднести:**

1. У першому розділі розглядаються лінійні одно- дво- та тримасові механічні коливальні системи, однак аналізуючи наведені структурні схеми цього стверджувати не можна, так як на них не відображено на малюнках відповідні обмеження від «розгойдування».

2. Під рис. 1.4 відсутні пояснення нумерації, що присутні на всіх інших малюнках. Слід було б і його доповнити відповідним описом.

3. На рис. 2.5 та рис. 3.1 напрямок коливання проміжної маси вказаний неправильно по відношенню до математичної моделі.

4. У виразі (3.9) були встановлені відповідні значення жорсткостей пружних вузлів. Для чого тоді були проведені розрахунки у виразах (3.10), (3.11), якщо отримуємо той самий результат?

5. Чим обумовлена друга частина п. 4.2, а саме встановлення першої власної частоти коливань стержня з лівим шарнірно опертим кінцем?

6. В п. 4.4 варто було б навести розрахункову схему дискретно-континуальної коливальної системи з двома континуальними ділянками.

7. В п. 4.7 крім розрахунку на міцність варто було б провести ще розрахунок на втому.

8. Чим обґрунтовано використання методу Релея-Рітца для наближеного встановлення



першої власної частоти коливань континуальної ділянки (п. 4.8), якщо перед тим були отримані точні значення з використанням колових та гіперболічних функцій Крилова (пункти 4.2 та 4.3) ?

9. Для чого встановлювати значення частки зведеної маси правої ділянки стержня від її провертання (вирази (4.72), (4.75), (4.78), (4.81), (4.91), (4.94), (4.97), (4.100)), якщо отримані значення відносяться до віртуально введеної мізерної частини і є відповідно незначними ?

10. В п. 5.1 після проведення кінематичного аналізу механізму варто було б провести силовий аналіз.

Однак вказані зауваження не зменшують значимості отриманих у роботі наукових і практичних результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## Висновок

Дисертація Качура Олександра Юрійовича «Обґрунтування параметрів дискретно-континуальних міжрезонансних вібраційних машин з керованим кривошипно-шатунним приводом» є завершеною науковою працею, у якій розв'язане конкретна наукова задача з пошуку нових рішень у створенні вискоефективного вібраційного технологічного обладнання, що має важливе значення для галузі знань 13 «Механічна інженерія», відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167), а здобувач Качур Олександр Юрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Офіційний опонент,  
професор кафедри машин і  
обладнання технологічних процесів  
Київського національного університету  
будівництва і архітектури,  
доктор технічних наук, доцент

О.П. Дєдов

Підпис Дєдова О. П.  
З А С В І Д Ч У Ю  
Проректор з наукової роботи та  
інноваційного розвитку КНУБА,  
доктор економічних наук, професор



О.І. Шкуратов