

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, доцента, директора відокремленого структурного підрозділу «Ладижинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету» **Цуркана Олега Васильовича**
на дисертаційну роботу **Качура Олександра Юрійовича** на тему:
«Обґрунтування параметрів дискретно-континуальних міжрезонансних вібраційних машин з керованим кривошипно-шатунним приводом»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
зі спеціальності 131 Прикладна механіка
галузь знань 13 Механічна інженерія

Склад і структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота Качура О.Ю. представлена в об'ємі 306 сторінок повного тесту, який включає анотацію, вступ, 5 розділів, висновки, список використаних джерел із 169 найменувань на 18 сторінках та 14 додатків на 80 сторінках, що вміщують акти впровадження розробок в промислові умови та навчальний процес, розрахунки проведені у дисертаційній роботі. Рукопис дисертації містить 172 сторінки основного тексту, в тому числі 7 таблиць та 64 рисунків.

Актуальність теми досліджень. На сучасному етапі розвитку абсолютним пріоритетом для більшості держав виступає забезпечення сталого розвитку, який передбачає генерацію стійких темпів економічного зростання за умови дотримання жорстких екологічних стандартів. У цих умовах на передній план висувається проблема ефективного споживання енергоресурсів. Сьогодні енергоефективність є ключовим критерієм якості функціонування як окремих підприємств, так і економічної моделі держави в цілому. Таким чином, питання енергозбереження та енергоефективності набувають чималої актуальності, особливо на тлі останніх тенденцій зниження імпорту енергоносіїв. В умовах дефіциту власних паливно-енергетичних ресурсів гостро виникає необхідність енергозбереження у такій галузі як машинобудування, до якої відносимо вібраційне технологічне обладнання.

Вібраційні машини, незалежно від конструкції та технологічного призначення, прийнято класифікувати за кількістю мас одно-, дво- та багатомасові. До багатомасових коливальних систем відносять і тримасові, на яких автор «загострив» свій погляд у зв'язку з тим, що в тримасових конструкціях є можливість використання одного із різновидів резонансних режимів, а саме міжрезонансного, коли частота вимушених коливань системи на частотній області розташована між двома резонансними піками. Саме міжрезонансні режими наділяють тримасові механічні коливальні системи високими коефіцієнтами динамічності й накладають на них ряд негативних умов. Однією з критичних умов є те, що амплітуда коливань малих реактивних мас в міжрезонансній зоні має стрімкоподібну характеристику й існуючі методики їх розрахунку не в стані забезпечити стійку зону коливань для них. Тож пошук нових структур та підходів у розрахунку міжрезонансних вібраційних машин є актуальною науково-прикладною задачею машинобудування.

Тому розробка сучасних, високоефективних, енергоощадних міжрезонансних вібраційних машин, які ефективно забезпечують високоефективні режими роботи, реалізуючи вузьку міжрезонансну зону з надвисокими коефіцієнтами динамічності здійснять вагомий внесок у розвиток машинобудування України в напрямку ефективного споживання енергоресурсів.

Аналіз основного змісту роботи, її наукової новизни, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій. В якості наукової новизни слід відзначити запропонований автором розвиток методології створення високоефективних міжрезонансних вібраційних машин, в яких вперше застосовано гібридні структури коливальних систем, які відрізняються від існуючих введенням у якості третьої (реактивної) маси стержня (континуальну ділянку), який володіє достатньою гнучкістю, що забезпечує значні амплітуди коливань на вільному кінці та незначними інерційними параметрами. Тож новизну роботи можна характеризувати наступним пунктами:

- 1) описана математична модель вимушених коливань континуальної ділянки з найбільш раціональною для міжрезонансних систем схемою кріплення;
- 2) обґрунтовано параметри та отримано адекватну математичну модель дискретно-континуальної міжрезонансної вібраційної машини з кривошипно-шатунним приводом;
- 3) обґрунтовано методику встановлення зведеної жорсткості та зведеної маси стержня з розподіленими параметрами для переходу від дискретно-континуальної системи до дискретної;
- 4) обґрунтовано структуру та описано кінематику керованого механізму кривошипно-шатунного привода.

Кожен з наведених пунктів новизни вважаю важливим досягненням, яке було підтверджено експериментальними дослідженнями і веде до нової гілки розвитку вібраційного технологічного обладнання.

У першому розділі дисертації проведено аналіз наукових розробок та напрямків удосконалення вібраційних машин з метою пошуку рішення науково-прикладної задачі. Проаналізовано одно-, дво- та тримасові коливальні системи в залежності від типу збурення та наведено основні аналітичні залежності їх розрахунку. Розглянуто патентні розробки конструкцій тримасових вібраційних машин в залежності від типу збурення, на основі чого попередньо вибрано тип збурення та встановлено основні конструктивні закономірності (зменшення інерційного значення реактивної маси дозволяє ефективно використовувати енергоощадні міжрезонансні режими роботи).

Аналіз конструкцій вібраційного обладнання надав можливість встановити подальший напрямок наукових досліджень по підвищенню енергоощадності систем, дозволив висунути *ідею*: синергія дискретних та континуальних коливальних систем здатна надати гібридним структурам вібраційних машин нових властивостей по ефективності функціонування та *гіпотезу*, яка звелася до введення в дискретну коливальну систему тіла з розподіленими параметрами (континуальної ділянки у вигляді стержня, пластини тощо), яке одночасно наділене надлегкими інерційними та надмалими жорсткісними параметрами.

Другий розділ можна без сумніву назвати логічним продовженням аналізу літературних джерел. В ньому наведено методологію досліджень стержня, який виступає у новоствореній конструкції континуальною ділянкою; розглянуто диференціальне рівняння зігнутої осі стержня, для встановлення поперечних прогинів; методику формування диференціального рівняння згинальних коливань стержня; встановлення його власної частоти коливань з допомогою колових та гіперболічних функцій Крилова; описано метод Релея-Рітца для встановлення власної частоти стержня; проаналізовано методологію встановлення параметрів дискретної тримасової коливальної системи.

Основна цінність розділу та роботи в цілому зосереджені у запропонованій методиці пошуку зведених маси і жорсткості континуальної ділянки, які задіяні в коливальному русі. Як було зазначено у розділі, наведений метод бере за основу методу Релея-Рітца і дозволяє

встановити точніше їх значення, що було підтверджено у наступних розділах.

У **третьому** розділі проведено обґрунтування інерційно-жорсткісних та силових параметрів дискретної тримасової міжрезонансної коливальної системи, яка стала еталонною моделлю для дискретно-континуальної системи. Розглянута математична модель дискретної коливальної системи, побудовано відповідні амплітудно-частотні характеристики для дво- та тримасової коливальної системи із відповідно встановленими інерційно-жорсткісними та силовими параметрами. Проаналізовано амплітудно-частотну характеристику тримасової коливальної системи, встановлено недоцільність використання електромагнітного збурення для такої коливальної системи. Вибрано комплексний параметр, який відображатиме інерційно-жорсткісні параметри еталонної дискретної системи в континуальній ділянці – парціальну частоту коливань реактивної маси.

Записано диференціальне рівняння 2-го порядку дискретної моделі лінійної механічної коливальної системи з використанням методу Д'Аламбера. Згідно встановлених параметрів системи отримано чисельний розв'язок диференціальних рівнянь за допомогою методу Рунге-Кутта та проведено імітаційне моделювання руху активної маси дискретної тримасової коливальної системи в програмному продукті SOLIDWORKS в модулі Motion.

У **четвертому** розділі автором розглянуто запропоновану схему кріплення континуальної ділянки з чітко обумовленими геометричними параметрами стержня. Обґрунтовано необхідність збурення стержня на першій власній частоті коливань, що обумовлене найвищою амплітудою коливань консолі. Як наслідок було встановлено вільні згинальні коливання стержня з використанням колових та гіперболічних функцій Крилова та встановлено його першу власну частоту коливань. Розглянуто вимушені коливання стержня та складено математичну модель, яка описує його рух.

Сформовано математичну модель дискретно-континуальної коливальної системи та побудовано відповідну амплітудно-частотну характеристику дискретно-континуальної коливальної системи з однією та двома континуальними ділянками, підтверджено можливість введення другої континуальної ділянки при умові зміни її ширини при решті сталих параметрів. Побудовано її схему прогинів та проведено розрахунок на міцність.

Перевірено власну частоту коливань методом Релея-Рітца і встановлено, що отримані значення практично тотожні (близькі). Отримано значення зведеної маси та жорсткості континуальної ділянки, які узгодилися із розрахунковими в третьому розділі.

У **п'ятому** розділі розглянуто керований кривошипно-шатунний привод, обґрунтовано його конструктивні та експлуатаційні параметри; описано кінематику механізму; отримано аналітичні вирази, які описують залежність ексцентриситету від переміщення керованого повзуна й побудовано відповідні графіки; проведено імітаційне моделювання руху механізму, результати якого узгодилися з чисельним моделюванням.

Встановлено геометричні параметри пружних елементів, проведено аналітичний розрахунок напружень, що виникають в них. Проведено імітаційне моделювання пружного елемента методом скінченних елементів, що підтвердило достовірність аналітичних розрахунків.

Згідно умови передачі динамічних навантажень на фундамент встановлена необхідна частота власних коливань системи на віброізоляторах. Опираючись на отримані результати вибрано виті пружини. Проведено аналітичний розрахунок на жорсткість та міцність. Достовірність отриманих результатів було підтверджено імітаційним моделюванням.

В експериментальній частині розділу на основі знятих часових залежностей руху активної

та проміжної мас підтверджено парціальну частоту коливань континуальної ділянки та наявність закладених розрахункових амплітудно-частотних характеристик, що продемонструвало правильність методології дисертаційних досліджень.

Завершується розділ методологією побудови дискретно-континуального міжрезонансного вібраційного транспортера-сепаратора, що є логічним підсумком проведеної роботи в дисертації.

Висновки узагальнюють отримані в дисертаційній роботі наукові та практичні результати.

Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри. 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».

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.

Практична цінність результатів дослідження підтверджується результатами експериментального дослідження, проведеного в 5-му розділі дисертаційної роботи та інженерною методикою розрахунку дискретно-континуального вібраційного обладнання різноманітного технологічного призначення. Дана методика розрахунку надала чітке розуміння послідовності дій при створенні обладнання гібридних структур, які дозволили ефективно забезпечувати енергоощадні міжрезонансні режими роботи, розкривши прихований потенціал синтезованих систем.

Результати дослідження автора впроваджено у навчальному процесі та на підприємстві Львівської області, для виготовлення бетонних виробів, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях. Основні результати дисертаційної роботи здобувача оприлюднені у 19 наукових працях, з яких: 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. Матеріали, оприлюднені та представлені здобувачем у наукових публікаціях, відповідають темі та змісту дисертаційної роботи та достатньо повно відображають отримані у ній результати наукових досліджень. Зміст особистого внеску здобувача у друкованих працях, опублікованих у співавторстві, не має повторювань, дублювання та конфліктів з іншими співавторами. Робота має належний рівень апробації на наукових та науково-практичних конференціях різного рівня.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій. Достовірність і наукова новизна положень, висновків та рекомендацій викладених в дисертаційній роботі Качура О.Ю. не викликає сумнівів, оскільки підтверджується достатнім обсягом виконаних теоретичних, практичних досліджень і експериментів, з правильною їх постановкою, використанням широкого кола сучасних методів та засобів досліджень, які пройшли апробацію на міжнародних симпозиумах та конференціях, а також впровадженням результатів роботи в промисловості.

Ідентичність змісту анотацій та основних положень дисертації. Зміст анотацій українською та англійською мовами відображає зміст дисертації та в цілому обсязі висвітлює її основні результати і висновки.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності. За результатами перевірки дисертаційної роботи на наявність ознак академічного плагіату встановлено коректність посилань на першоджерело для текстових та ілюстрованих запозичень. Навмисних ілюстрованих спотворень не виявлено, що дозволяє зробити висновки про відсутність порушень в роботі академічної доброчесності.

До зауважень дисертації слід віднести:

1) В другому розділі дисертаційної роботи вказаний коефіцієнт додаткового динамічного підсилення коливань D порівняно з класичною двомасовою, що рівний 6,9. Виходячи з цієї величини встановлено інерційне значення реактивної маси. Тож чим обумовлена конкретна величина і чи існує можливість збільшення величин коефіцієнта D в даній коливальній системі?

2) При записі постійних (A, B) та реакцій в опорах (R_1, R_2) (вирази (4.51)-(4.54)) слід було б записати їх як функцію від колової частоти, так як це відображено в додатках.

3) В системі (4.55) коректно було б реакції в опорах R_1 та R_2 відобразити як функції багатьох змінних, адже складається враження, що це проста системи двох диференціальних рівнянь 2-го порядку, записана в амплітудних значеннях. У такому випадку можна вважати, що реакції в опорах постійні і континуальна ділянка адекватно не впливає на дискретну систему.

4) В роботі відсутні рекомендації щодо вибору геометричних розмірів континуальної ділянки, а також розміщення шарнірних опор, що є ключовим при побудові даного типу обладнання.

5) Крім розрахунку на міцність континуальної ділянки потрібно було провести ще її розрахунок на втому.

6) Відсутня блок-схема роботи програми керування керованим кривошипно-шатунним приводом, яка б надала чітке розуміння алгоритму роботи програми, відсутня сама програма, а також не наведено принципову блок-схему блока керування приводом.

7) В експериментальній частині варто було б приділити більше уваги опису давачів та програмного продукту, який опрацьовував отримані дані амплітуди та частоти коливань мас.

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

Висновок

Результати аналізу дисертації, анотацій українською та англійською мовами, опублікованих праць дають підстави для висновку про те, що дослідження Качура Олександра

Юрійовича «Обґрунтування параметрів дискретно-континуальних міжрезонансних вібраційних машин з керованим кривошипно-шатунним приводом», є завершеним самостійним науковим дослідженням.

За рівнем наукової новизни отриманих результатів та їхнього практичного значення дисертація на тему «Обґрунтування параметрів дискретно-континуальних міжрезонансних вібраційних машин з керованим кривошипно-шатунним приводом» 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, галузь знань 13 Механічна інженерія.

Офіційний опонент,
директор ВСП «Ладжинський фаховий коледж
Вінницького національного аграрного університету»,
доктор технічних наук, доцент



Олег ЦУРКАН