

До спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06  
при Національному університеті  
«Львівська політехніка»  
079013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

## **ВІДГУК**

офіційного опонента доктора технічних наук, доцента,  
професора кафедри трибології, автомобілів і матеріалознавства  
Хмельницького національного університету  
Драч Ілони Володимирівни  
про дисертаційну роботу Яцуна Володимира Володимировича  
на тему «Динаміка двочастотних резонансних вібротомашин,  
що працюють на ефекті Зоммерфельда»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

### **Актуальність теми дисертаційної роботи**

Вібраційні машини, які призначені для класифікації (розділення за крупністю), сухого розсіву або сепарації сипких матеріалів, використовуються в процесах переробки мінеральної та техногенної сировини. Найбільшого поширення набули машини, в яких коливання робочого інструменту (короба, решета, сита тощо) збуджуються механічним (дебалансним) збудником коливань – незрівноваженим ротором, що приводиться в обертання електродвигуном. Такими машинами є вібраційні грохоти, вібросита, конвеєри та живильники, різні технологічні вібротомашини.

Перспективними є машини із двочастотними збудниками вібрацій, характерною особливістю яких є виконання основних технологічних процесів за коливань робочого інструменту з більш низькою частотою ніж у випадку виконання допоміжних операції (самоочищення несівного тіла або зміни механічних властивостей оброблюваного матеріалу для підвищення інтенсивності основного технологічного процесу).

Необхідно відзначити, що сьогодні доволі широко використовується вібраційне обладнання на основі інерційного приводу, що працює в білярезонансних режимах. Особливістю таких установок є те, що вони у собі поєднують переваги інерційного та електромагнітного приводів, внаслідок чого механічна коливальна система розвиває високі динамічні зусилля при порівняно невеликих габаритах приводу.

Однак, резонансні системи мають недоліки, головними з яких є нестабільність робочого режиму при зміні завантаження вібротомашини, а також при зміні власної частоти коливань. Ця нестабільність часто спричиняє порушення технологічного процесу, що перешкоджає широкому впровадженню високоефективних резонансних вібротомашин. Незважаючи на достатньо численні дослідження параметрів і режимів розглянутих вібротомашин

актуальною залишається проблема підвищення ефективності їх роботи шляхом пошуку нових конструктивних рішень.

Володимиром Яцуном запропоновано з прикладної точки зору актуальне рішення – розробити вібромашину, що суміщає у собі переваги двочастотних і резонансних вібромашин з інерційними збудниками вібрацій.

Для збудення двочастотних вібрацій резонансних вібромашин автором запропоновано оригінальний метод, заснований на ефекті Зоммерфельда, з використанням пасивних автобалансирів кулькового, роликового або маятникового типів.

Таке дослідження є цікавим з точки зору економічної доцільності. Якщо для забезпечення руху вібраційної установки є можливість поставити нові віброзбудники, не виконуючи порівняно складного конструювання, розрахунків та налагоджень обладнання, то безумовно, цей шлях створення обладнання є пріоритетним. До того ж установка матиме меншу собівартість.

Дисертаційна робота є складовою частиною проєктів, які виконувались у відповідності до наукової тематики і в межах держбюджетних науково-дослідних тем в Центральноукраїнському національному технічному університеті: “Динаміка механічних систем, до складу яких входить обертове несуче тіло із приєднаними тілами” (2016-2018, № держреєстрації 0116U001486); “Конструкція та працездатність високопродуктивних і енергоефективних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів” (2017-2020, № держреєстрації 0117U003725).

Дисертація В. Яцуна є логічним продовженням зазначених науково-дослідних робіт. Автором розроблено та практично реалізовано теоретичні й експериментальні методи дослідження динаміки двочастотних резонансних вібромашин, що працюють на ефекті Зоммерфельда; обґрунтовано та застосовано комплексний підхід до досліджень, що, на відміну від відомих, містить математичне і комп’ютерне 3D-моделювання динамічних процесів роботи пасивних автобалансирів, як збудників резонансних коливань, обчислювальні та натурні експерименти динаміки дослідних зразків вібромашин.

Отже, подана до захисту дисертаційна робота Володимира Яцуна є актуальною, а вибір теми логічно вмотивованим.

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

Структура і будова наукової праці декларують свою оптимальність у аспектах дослідження поставленої проблеми. Дисертація складається з шести співмірних за обсягом і глибиною аналізу розділів.

У вступі визначено мету дослідження, висвітлено питання про методи реалізації поставлених завдань. Обґрунтовано актуальність роботи, її наукову новизну, вказано практичну цінність результатів дисертації.

Дослідницька стратегія дисертації ґрунтується на широкому колі наукових джерел і результатів досліджень в сучасних напрямках розвитку динаміки вібраційних машин, досліджень ефекту Зоммерфельда у вібраційних

машинах, експериментальних досліджень динаміки двочастотних (полічастотних) і резонансних вібраційних машин.

Важливим для обґрунтованості наукових положень роботи є те, що дисертант, опрацювавши увесь цей масив дослідницької літератури й аналізуючи конструкції віброзбудників і способи збурення двочастотних вібрацій з використанням ефекту Зоммерфельда, висновує власні концептуальні наукові засновки і висновки, наголошуючи, наприклад, що класичний пасивний автобалансир механічного типу працює як два незалежних інерційних збудники вібрацій; двочастотні режими руху існують і стійкі тоді й тільки тоді, коли існує і стійкий резонансний режим руху без дебалансної маси на корпусі віброзбудника; автобалансир збурює практично ідеальні двочастотні вібрації незалежно від асиметрії опор.

Слід зазначити, що автором у дисертації подано значний теоретичний доробок в галузі динаміки вібромашин. Так, у розділі 2 розроблено наближену теорію двочастотних вібромашин, що працюють на ефекті Зоммерфельда, перевірена її точність, визначені межі застосування. У розділах 3 – 5 подано розвиток цієї теорії. Визначено динамічні характеристики двочастотних резонансних машин, що дало можливість розробити і теоретично обґрунтувати технічні рекомендації з конструювання нових вібромашин і модернізації існуючих.

Здобувач доводить достовірність розроблених методів і моделей в 6 розділі, де використано експериментальний метод для дослідження динаміки запропонованих автором нових конструкцій вібромашин, зокрема, двочастотних одномасових вібромашин з кульковим віброзбудником при прямолінійному поступальному і поворотно-коливальному русі платформ.

Висновки у дисертації чіткі й обґрунтовані та відображають результати дослідницького пошуку дисертанта, опираються на багатоплановий аналіз як теоретичного так і експериментального матеріалу.

Можна стверджувати, що автор досягнув задекларованої мети.

Дисертант демонструє високу теоретичну підготовку та вміння використовувати загальнонаукові та спеціальні методи дослідження. Зокрема, в роботі вдало використано емпіричні методи для дослідження динаміки дослідного зразка двочастотної одномасової вібромашин з прямолінійним поступальним і з кутовим рухом платформи; для дослідження ефекту Зоммерфельда щодо автобалансирів як збудників резонансних вібрацій.

Дієвим є застосування:

- теоретичних методів, зокрема, аналізу енергозатрат, оцінювання енергоефективності вібромашини на чисто резонансному режимі руху; синтезу антирезонансної тримасової вібромашини, резонансної протифазної двомасової вібромашини тощо;
- системних методів, зокрема, щодо опису фізико-математичних моделей одно- дво- та тримасової вібромашин тощо;
- функціональних методів щодо розробки конструкції віброзбудників, які працюють на ефекті Зоммерфельда, і технічних рішень для їх застосування у двочастотних вібромашинах тощо.

Використання широкого спектру наукових методів забезпечує належний рівень аргументації, є позитивним для обґрунтованості одержаних результатів і підтверджує високий рівень володіння автором методологією наукових досліджень.

Отже, сформульовані в дисертаційній роботі Володимира Яцуна наукові положення, висновки та рекомендації достатньо повно обґрунтовані автором та викладені в доказовій формі.

#### **Достовірність, новизна висновків та рекомендацій.**

Достовірність наукових положень дисертаційної роботи підтверджується коректною постановкою задач дисертаційного дослідження; використанням в роботі математично обґрунтованих та широко апробованих на практиці методів; відповідністю наукових положень основним законам і явищам природи, їх зрозумілим фізичним змістом.

Оригінальні теоретичні дослідження мають за основу фундаментальні положення динаміки машин, теорії коливань, прикладної математики.

Достовірність результатів теоретичних досліджень обумовлена використанням: фізично обґрунтованих припущень при побудові й аналізі фізико-математичних моделей одно-, дво- і тримасових вібротомашин; основних методів теорії стійкості рухів механічних систем, теорії біфуркацій динамічних систем, зокрема методу малого параметру; методів розв'язання параметричних рівнянь для аналітичного визначення можливих частот застрягання вантажів.

В експериментальних дослідженнях достовірність результатів обумовлена використанням: стандартного вимірювального та балансувального обладнання; проведенням експериментів з дотриманням вимог міжнародних і державних стандартів; візуального спостереження за поведінкою динамічної системи при стробоскопічному освітленні. Обробка результатів експериментальних досліджень ефекту Зоммерфельда в збудниках резонансних вібрацій маятникового, кулькового чи роликотого типу в умовах, коли спостереження за рухом дебалансних мас неможливе або ускладнене, реалізована методами математичної статистики, зокрема, регресійного аналізу. Одержані експериментальні дані показали добру узгодженість з теоретичними результатами.

Відтак дисертант коректно використав фундаментальні науки у розв'язанні науково-прикладної проблеми – дослідженні динаміки двочастотних резонансних вібротомашин, в основу роботи яких покладено ефект Зоммерфельда; дані експериментальних досліджень є правильними та достатніми. Отож отримані автором результати не є помилковими.

Наукове значення результатів роботи полягає в розробці основ теорії та конструювання резонансних полічастотних вібротомашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів механічного типу.

Найбільш істотні наукові результати, уміщені в роботі, можна означити такими положеннями:

– уперше запропоновано використовувати пасивні автобалансири механічного типу в якості інерційних збудників двочастотних вібрацій;

– науково-обґрунтовано кількість, умови існування та стійкість двочастотних режимів руху; стійкість режимів застрягання; енергоефективність вібромашини;

– розроблено нові аналітико-числові методи дослідження динаміки одно-, дво-, тримасової вібромашини з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів, які ґрунтуються на елементах теорії біфуркацій рухів, методі малого параметра, ідеї параметричного розв'язання рівняння частот, яке призначене для пошуку можливих частот застрягання вантажів.

– для дослідження динаміки двочастотних резонансних вібромашин з новими віброзбудниками побудовано та чисельно проаналізовано моделі одно- дво- та тримасової вібраційної машини з поступальним рухом платформи й кульковим, роликотим або маятниковим збудником вібрацій, що дозволило аналітично синтезувати та дослідити числовими методами двомасову резонансну протифазну вібромашину, тримасову антирезонансну вібромашину.

– розроблено експериментальний метод дослідження ефекту Зоммерфельда для збудників двочастотних вібрацій маятникового, кулькового та роликотого типу в умовах, коли спостереження за вантажами у віброзбуднику неможливе чи ускладнене. Метод ґрунтується на регресійному аналізі масиву сигналів аналогових датчиків обертів і віброприскорень. Метод верифіковано на спеціально створеному стенді ротора на ізотропних пружно-в'язких опорах, що здійснює просторовий рух, з автобалансиром з однією кулею. Встановлено, що незважаючи на сильну асиметрію опор, автобалансир збуджує практично ідеальні двочастотні вібрації. Відхилення від двочастотного закону пропорційні відношенню маси вантажів до маси всієї машини. Тому для реальних машин вони не перевищують 2 %.

Технічну новизну запропонованих розробок захищено 2 патентами України та 7 патентами на корисні моделі на конструкції нових віброзбудників і вібромашин та на технічні рекомендації з проектування нових машин і забезпечення їх працездатності.

Запропоновані технічні рішення проваджені на підприємствах будівельної (виробництва будівельних матеріалів), дорожньо-будівельної, видобувної, сільськогосподарської промисловостей, що підтверджено наявністю актів, копії яких наведено у дисертації (додаток А, стор. 393-402), і на які в рефераті посилається здобувач (стор. 6). В актах наведено аргументи на користь того, що двочастотні резонансні вібромашини, що працюють на ефекті Зоммерфельда, мають кращі характеристики працездатності у порівнянні з існуючими конструкціями

Результати роботи щодо проектування та розрахунку параметрів широкого класу нових вібромашин і модернізації існуючих грохотів, вібросит, вібромлинів, вібростолів тощо застосовано при виконанні НДР за господарчими договорами з загальним обсягом фінансування 110,0 тис. грн., про що вказує дисертант (стор. 6 у рефераті, стор. 35 в тексті дисертації).

Це є підтвердженням достовірності висновків і рекомендації, які наведені в дисертаційній роботі Володимира Яцуна.

Прикладний характер одержаних результатів та основних ідей наукового дослідження бачиться у тому, що матеріали роботи знайдуть застосування в освітньому процесі та при виконанні кваліфікаційних робіт для відповідних спеціальностей у закладах вищої освіти.

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

Докторська дисертація Яцуна В.В. є кваліфікаційною науковою працею, виконаною здобувачем самостійно, в якій висвітлені власні ідеї і розробки автора, що дозволили вирішити поставлені завдання. Робота містить теоретичні та практичні положення і висновки, сформульовані дисертантом особисто. Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання та використані лише для підкріплення ідей здобувача.

Нові наукові результати та положення повністю відображені у 40 працях, зазначених здобувачем, а саме: 22 статтях, що входять до наукометричних баз Web of science та Scopus, 2 патентах України, 7 патентах на корисну модель, 9 тезах доповідей у збірниках міжнародних конференцій. Кількість публікацій, їх повнота та обсяг у достатній мірі відображають особистий внесок автора і відповідають вимогам, що висуваються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук. Результати наукового пошуку широко апробовано на загальноукраїнських і міжнародних наукових конференціях.

У дослідженні Володимира Яцуна отримані наукові результати цілком відповідають задекларованій меті та завданням дисертації.

Використані в дисертації основні теоретичні положення, припущення, спрощення є коректними і не містять протиріч.

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, достовірні, а їх обґрунтування проведено з необхідною повнотою.

У викладені дисертаційного дослідження дотримано усіх вимог до логіко-структурної схеми наукової роботи. Дисертаційна робота містить анотацію, вступ, шість розділів, загальні висновки, список використаних джерел, який складається з 397 найменувань, та додаток з актами впровадження науково-прикладних результатів дисертації на українських підприємствах. Основний зміст викладено на 354 сторінках друкованого тексту. Робота написана в науковому стилі. Автор підтверджує свої ідеї ілюстративним, табличним матеріалом та рисунками.

Реферат за своїм змістом відповідає основним положенням, висновкам і рекомендаціям, які наведені в дисертаційній роботі, відображає її структуру.

### **Дискусійні положення та зауваження.**

Як і будь-яка наукова робота, дисертація Володимира Яцуна є підставою для дискусій, пропозицій, обміном думок. Не применшуючи дослідницького здобутку дисертації, слід зазначити декілька зауважень до роботи:

1. При викладенні матеріалів першого розділу дисертаційної роботи автором наведено детальний аналіз автобалансирів механічного типу класичних і некласичних (стор. 83 – 87). В інших розділах розглядаються двочастотні резонансні вібростани з пасивними класичними АБ (кульковим, роликотним або маятниковим) в якості незалежних вібробудників. Як стверджується

автором (стор. 94 – 98), у неklasичного АБ з двома зв'язаними КВ експериментально виявлений ефект Зоммерфельда. У зв'язку з цим відкритим залишилось питання чи можуть у якості збудників двочастотних вібрацій використовуватись неklasичні автобалансири? Чи будуть вони мати перевагу перед класичними?

2. У моделях розділів 3 – 5 дисертації правомірно введено безрозмірний коефіцієнт  $k$  (формули (3.12) – (3.14) у тексті дисертації, (7) – реферату), який характеризує відповідний тип КВ (кульки, ролики, маятники). Чи є можливість у розроблених автором моделях вібротомашин урахувати особливості роботи пасивних АБ механічного типу, зокрема, те, що вони викликають значне зношування робочих поверхонь – поверхонь контакту й тертя – на елементах АБ, а наслідком зношування є збільшення дебалансу? Можливо, у роботі варто було б окреслити питання розрахунків на міцність і зношування вантажів і бігової доріжки вібротомашин; визначити і обґрунтувати умови безвідривного кочення куль і роликів біговою доріжкою.

3. Доречно було б висвітлити питання про запобігання витоків масла з корпусу вібротомашини, яке стає вкрай актуальним при великих швидкостях обертання корпусу.

4. У розділі 2 дисертації розроблено наближену теорію двочастотних вібротомашин, що працюють на ефекті Зоммерфельда, перевірена її точність, визначені межі застосування. Однак, усі висновки до розділу носять якісний характер. Бажано було б подати також кількісні оцінки похибок наближеної теорії.

5. Можливо вартувало б узагальнити теоретико-механічні моделі одно-, дво- і тримасових вібротомашин з вібротомашинами нового типу на випадок довільної кількості мас, а розроблені моделі розглянути як часткові випадки зі своїми властивостями.

6. Було б доцільним відзначити, що протифазні й антирезонансні вібротомашини майже не передають вібрації на фундамент. Такі вібрації виникають тільки при використанні цих машин в якості одночастотних резонансних вібротомашин (без вантажу в корпусі вібротомашини).

7. В рефераті й у вступі дисертації відсутнє формалізоване визначення сутності наукової проблеми дослідження в галузі технічних наук. Але слід відмітити, що задачі дослідження у дисертації (стор. 30 - 31) і в рефераті (стор. 4) сформульовано чітко та однозначно.

8. Дисертація успішно доповнена елементами візуалізації – таблицями, ілюстраціями, схемами, діаграмами. Однак, є недоліки в їх оформленні. Так, у назві рисунка 1.1 в тексті дисертації (стор. 50) неправомірно вказано посилання до літературних джерел; позначення на рис. 5.8 (стор. 282) не відповідають зазначеним у назві рисунка; у підпису рисунку та в тексті реферату не вказано розшифрування пронумерованих позначень на рисунку реферату 2 (стор. 10).

9. У тексті дисертаційної роботи та реферату є неточності редакційного характеру та трапляються деякі синтаксичні та стилістичні похибки і помилки.

### Загальний висновок.

Наукова робота Володимира Володимировича Яцуна є оригінальним та самостійним дослідженням. У ній представлено науково обґрунтовані положення, вона містить новизну висновків і рекомендацій, їх прикладне значення. Заявлена тема є актуальною, розкрита повністю. Робота є завершеною. Вважаю, що ця дисертація є вагомим науковим внеском в розвиток технічних наук в галузі динаміки та міцності машин – вона розширює, узагальнює й поглиблює знання про дослідження динаміки та проектування двочастотних резонансних вібр машин з інерційними збудниками у вигляді пасивних автобалансирів механічного типу, що працюють на ефекті Зоммерфельда.

Дисертація Володимира Яцуна на тему «Динаміка двочастотних резонансних вібр машин, що працюють на ефекті Зоммерфельда» відповідає вимогам п. п. 7, 8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 502 від 19.05.2023 і № 507 від 03.05.2024), а її автор, Яцун Володимир Володимирович, заслуговує на присвоєння йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент:

професор кафедри трибології, автомобілів і матеріалознавства  
Хмельницького національного університету,

доктор технічних наук, доцент

Ілона ДРАЧ

Підпис д.т.н., доцента Драч І.В. засвідчую:

Учений секретар Вченої ради ХНУ

доктор економічних наук, професор



Ольга ГОНЧАР