

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

### **Відгук**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Яцуна Володимира Володимировича на тему:  
“Динаміка двочастотних резонансних вібротомашин, що працюють на ефекті  
Зомерфельда”, подану на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук за спеціальністю  
05.02.09 – динаміка та міцність машин

#### **1. Загальна характеристика роботи.**

Дисертаційна робота виконувалася в Центральноукраїнському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 402 сторінки друкованого тексту, з них: анотація – на 10 стор., зміст – на 6 стор., основний текст – на 334 стор., список із 397 найменування – на 43 стор., додатки – на 9 стор. Дисертація містить 138 рисунків та 21 таблицю. На розгляд представлено дисертацію, автореферат дисертації, копії опублікованих робіт, автореферат дисертації кандидата наук.

#### **2. Оцінка актуальності теми дисертації.**

У роботі вирішується важлива науково-технічна проблема, що має вагомe значення для розвитку динаміки і міцності машин і полягає у розробці методів дослідження та дослідження динаміки двочастотних резонансних вібротомашин з інерційними віброзбудниками, що працюють на ефекті Зомерфельда.

Машини вібраційного типу, такі як грохоти, вібророта та сепаратори, демонструють значний потенціал при використанні двочастотних збудників вібрацій. У таких машинах коливання короба (решета, сита тощо) із нижчою частотою сприяють виконанню основного технологічного процесу, наприклад, сепарації чи просіювання. Натомість коливання з вищою частотою забезпечують самоочищення короба та змінюють механічні властивості оброблюваного матеріалу, що підвищує ефективність основного процесу.

З іншого боку, резонансні машини є більш енергоефективними. Завдяки меншій масі їхніх віброзбудників досягається коливання платформи з більшою амплітудою. Резонансні режими широко використовуються у вібраційних млинах, грохотах і столах. Для збудження таких коливань застосовуються електромагнітні або інерційні віброзбудники, причому останні відзначаються вищою потужністю та надійністю.

З прикладної точки зору актуальною є розробка машин, які об'єднують переваги двочастотних і резонансних машин з інерційними збудниками вібрацій. Одним із найпростіших методів збудження резонансних коливань інерційними віброзбудниками є використання ефекту Зоммерфельда. Однак цей метод майже не досліджений як теоретично, так і експериментально, теорія відповідних машин не розроблена.

Тому усунення цієї істотної неповноти є важливою і актуальною науково-технічною проблемою.

Робота виконувалась у відповідності до наступних проектів, які виконувалися в межах держбюджетних науково-дослідних робіт в Центральноукраїнському національному технічному університеті: "Динаміка механічних систем, до складу яких входить обертове несуче тіло із приєднаними тілами" держреєстрація № 0116U001486, період виконання 2016-2018 р.р., "Конструкція та працездатність високопродуктивних і енергоефективних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів" держреєстрація № 0117U003725, період виконання 2017-2020 р.р., автор є науковим керівником.

### **3. Оцінка наукових результатів дисертації.**

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в істотному розвитку теорії і практики збудження двочастотних і резонансних вібрацій в вібромашинах з використанням ефекту Зомерфельда. Зокрема:

*уперше:*

- запропоновано застосування пасивних автобалансирів як інерційних збудників двочастотних вібрацій. Встановлено, що автобалансир функціонує як два незалежних збудники вібрацій. Машина демонструє режими усталеного руху, близькі до двочастотних. У таких режимах вантажі в автобалансири створюють постійну неврівноваженість, залишаючись на певній частоті, близькій до резонансної. Ці вантажі діють як перший резонансний збудник, що генерує вібрації з частотою їх "застрягання". Другий збудник утворюється дебалансною масою, закріпленою на корпусі автобалансира, яка обертається із частотою ротора та забезпечує високочастотні вібрації.

- розроблено аналітико-числові методи аналізу динаміки вібромашин із пасивними автобалансирними збудниками. Ці методи базуються на елементах теорії біфуркацій, методі малого параметра та параметричному підході до розв'язання рівняння частот для визначення можливих частот "застрягання" вантажів.

- встановлено, що навіть при значній асиметрії опор автобалансир забезпечує майже ідеальні двочастотні вібрації. Відхилення від двочастотного режиму прямо пропорційні відношенню маси вантажів до маси всієї машини та не перевищують 2 % для реальних пристроїв. Кількість кутових швидкостей "застрягання" вантажів завжди непарна: одна з них близька до частоти обертання ротора, а решта формуються та зникають парами поблизу резонансної частоти. Режими "застрягання" мають

непересічні діапазони кутових швидкостей, і лише непарні з них є локально асимптотично стійкими.

- встановлено, що параметри вібрацій платформи можна налаштувати в широких межах шляхом зміни зовнішніх і внутрішніх сил опору, сумарної маси вантажів або швидкості обертання ротора.

- розроблено експериментальний метод дослідження ефекту Зомерфельда для резонансних збудників (маятничого, кульового, роликового типів) у складних умовах. Метод базується на регресійному аналізі сигналів від аналогових датчиків обертів та віброприскорень. Ефективність методу підтверджена на експериментальному стенді з ротором на ізотропних пружно-в'язких опорах і автобалансиром із однією кулею. Метод використано для аналізу динаміки одномасової вібромашини з кульовим і маятниковим збудниками.

#### **4. Оцінка практичного значення результатів роботи.**

Робота є значним внеском у розвитку практики проектування вібромашин. Вперше запропоновано використання пасивних автобалансирів як інерційних збудників двочастотних вібрацій, що відкриває нові можливості для створення ефективних вібраційних систем. Визначені технічні рішення, зокрема нові конструкції віброзбудників і вібромашин, а також розроблені рекомендації щодо проектування та забезпечення працездатності вібромашин, є важливими для удосконалення існуючих пристроїв і створення нових.

Практичне застосування результатів досліджень відбулося на численних підприємствах, що працюють у різних галузях, зокрема у будівництві (ТОВ "АЛЪЯНСБУДСЕРВІС"; ПП "ЦЕНТРВІЙСЬКБУД"), дорожньо-будівельній (Кіровоградська обласна аграрна господарська асоціація шляхобудівельних підприємств "Кіровоградоблагрошляхбуд"; Державне підприємство "Агентство місцевих автомобільних доріг", дочірнє підприємство "Управління виробничо-технологічної комплектації" асоціації КІРОВОГРАДОБЛАГРОШЛЯХБУД), видобувній (ТОВ "Травел-ВН", ТОВ "Трейд-ВВ", ТОВ "Елгран") та сільськогосподарській промисловості (ТОВ "Агропромислова компанія імені О.В. Гіталова"). Впровадження цих технологій в реальне виробництво дозволяє значно підвищити ефективність вібраційних процесів і знизити енергетичні витрати. Крім того, результати роботи знайшли своє місце в навчальному процесі кафедри деталей машин та прикладної механіки Центральноукраїнського національного технічного університету, що підкреслює їхню практичну значимість для підготовки спеціалістів у галузі механіки та машинобудування.

Виконані господарські договори з різними підприємствами, зокрема в рамках досліджень зменшення вібрацій сільськогосподарської техніки (СФГ «Личук» з обсягом фінансування 60,0 тис. грн.) та розробки нових вібромашин для сепарації насіння зернових культур (департаментом інфраструктури та промисловості КОДА з обсягом фінансування 50,0 тис. грн.), підтверджують актуальність і значущість цієї наукової роботи для

сучасної промисловості. Проектування та впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій є важливим кроком на шляху до оптимізації виробничих процесів.

## **5. Достовірність і обґрунтованість наукових результатів, положень і оцінка висновків.**

В теоретичних дослідженнях достовірність та обґрунтованість наукових результатів забезпечуються використанням фізично обґрунтованих припущень при побудові та аналізі математичних моделей одно-, дво- та трьохмасових вібротомашин. Для отримання достовірних результатів застосовано відомі методи теорії коливань, стійкості рухів механічних систем, біфуркації рухів, а також методи малого параметра, що дозволяють точно описати динамічні процеси та стійкість рухів вібротомашин.

У експериментальних дослідженнях висока достовірність і обґрунтованість результатів досягається завдяки використанню стандартного вимірювального і балансувального обладнання, яке відповідає міжнародним та державним стандартам. Проведені експерименти здійснюються з дотриманням вимог цих стандартів, що дозволяє забезпечити високу точність вимірювань. Також важливим є візуальне спостереження за поведінкою системи при стробоскопічному освітленні, що дає змогу чітко фіксувати коливання і робить результати більш надійними.

Висновки теоретичних та експериментальних досліджень узгоджуються між собою, що підтверджує правильність обраних підходів і методів. Оцінка цих результатів свідчить про їх практичну застосовність і наукову обґрунтованість у проектуванні та розробці нових вібротомашин, що підтверджує вірність основних положень і висновків роботи.

Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових результатів підтверджується апробацією результатів роботи на наукових семінарах та міжнародних науково-технічних конференціях, а також впровадженням результатів роботи на численних підприємствах, що працюють у різних галузях промисловості.

За результатами виконаних робіт опубліковано 22 статті у фахових виданнях категорії А, зокрема 22 – у виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus, одержано 2 патенти України (20 р.) і 7 патентів України на корисну модель, опубліковано 9 тез науково-технічних конференцій, зокрема, 1 – у виданні, що індексується у Scopus.

Кількість публікацій, їх повнота та обсяг у достатній мірі відображають особистий внесок автора і відповідають вимогам, що висуваються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

## **6. Оцінка змісту, оформлення дисертації та автореферату.**

У дисертації систематично розглянуто окремі аспекти досліджуваної проблеми та запропоновано ефективні методи її вирішення.

У **першому** розділі, на основі критичного огляду літератури щодо конструкції, принципів дії, областей застосування та теоретичних і

експериментальних досліджень динаміки двочастотних і резонансних вібромашин, оцінюється сучасний стан теорії і практики цієї теми. Обґрунтовано мету та завдання дослідження.

У **другому** розділі вперше запропоновано застосування кульових, роликкових та маятникових автобалансирів як збудників двочастотних вібрацій. Розглянуті нові конструкції віброзбудників і методи збудження двочастотних вібрацій, а також надано приклади їх використання в одно-, дво- та тримасових вібромашинах з різними кінематичними схемами руху платформ. Також розроблено наближену теорію двочастотних вібромашин, що працюють на основі ефекту Зомерфельда.

У **третьому** розділі побудовано узагальнену модель одномасової вібромашини з поступальним рухом платформи і кульовим, роликковим чи маятниковим віброзбудником. Знайдено двочастотні режими руху вібромашини. Досліджено кількість, умови існування та стійкість цих режимів, а також енергоефективність вібромашини. Розроблено методи дослідження динаміки дво- та трьохмасових вібромашин.

У **четвертому** розділі побудовано узагальнену модель двомасової вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформ і віброзбудником шарового, роликкового чи маятникового типу. Динаміка цієї машини досліджена аналітично.

У **п'ятому** розділі побудовано узагальнену модель трьохмасової вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформ і віброзбудником кульового, роликкового чи маятникового типу. Аналітично досліджено динаміку цієї машини та синтезовано трьохмасову антирезонансну вібромашину, досліджену за допомогою числових методів.

У **шостому** розділі проведено експериментальні дослідження динаміки вібромашин. Розроблено експериментальний метод для дослідження ефекту Зомерфельда в збудниках резонансних вібрацій маятникового, кульового чи роликкового типу, коли спостереження за рухом дебалансних мас ускладнене. Метод ґрунтується на регресійному аналізі сигналів, що надходять від аналогових датчиків обертів і віброприскорень.

На підставі наведених матеріалів можна зробити висновок про повне та всебічне розв'язання поставленої науково-технічної проблеми. Дисертація оформлена відповідно до вимог ДСТУ, добре ілюстрована, а стиль та послідовність викладення матеріалу відповідають вимогам наукових робіт. У тексті є посилання автора на власні публікації. Наукові положення дисертації, що становлять наукову новизну, не повторюють положень, викладених у дисертації кандидата технічних наук. Автореферат чітко відображає зміст дисертації, а наукові положення та результати в ньому збігаються з матеріалами основної роботи. Визначено особистий внесок Яцуна В.В. в наукові публікації із співавторами, завдяки чому досягнуті наукові результати, що становлять новизну і виносяться на захист. новизну досліджень і виносяться на захист.

## **7. Основні зауваження.**

Разом з позитивною оцінкою поданої до опанування дисертаційної роботи вважаю за необхідне відзначити наступні зауваження (побажання).

1. У другому розділі комп'ютерним моделюванням перевірено розроблену теорію вібромашин, що працюють на ефекті Зомерфельда. Для цього наводяться параметри вібромашини, але не вказуються параметри електродвигуна. Проте, як відомо, ефект Зомерфельда має місце в динамічних системах з двигуном обмеженої потужності і, отже, моделювання з використанням ідеальних кінематичних характеристик джерела енергії може давати досить наближені результати.
2. Виникає питання практичної цінності висновку: «Амплітуда повільних коливань прямопропорційна сумарній масі куль», оскільки визначальним для амплітуди резонансних коливань є близькість частоти застрягання до власної частоти та величина демпфування в коливній системі.
3. Доцільно було більш докладно обґрунтувати висновок: «Наближена теорія і запропоновані технічні рішення дозволяють проектувати вібромашини з майже незмінними динамічними характеристиками навколорезонансного режиму». Зокрема, стосовно впливу істотних коливань швидкості віброзбудника, які мають місце при прояві ефекту Зомерфельда, а також впливу зміни технологічного навантаження і, відповідно, зміни власної частоти та частоти застрягання.
4. Чи була потреба наводити повний вивід рівнянь руху одно масової та двомасової вібромашин з поступальним рухом платформи й кульовим, віброзбудником (3, 4 розділ), оскільки їх можна знайти в літературі, наприклад, в монографії И. Блехмана «Синхронізація динамічних систем».
5. Було б доцільно формули (3.88) і (3.90) для визначення сумарної потужності, що витрачається на усталений рух вібромашини явно ув'язати з підбором потужності електродвигуна.
6. Бажано дослідити чи можливі в нових вібромашинах (механічних системах) параметричні резонанси, що їх посилює чи послабляє.
7. У розділах 3, 4, 5 бажано явно вказати наскільки істотним є алгоритм розгону електродвигуна для забезпечення потрібного режиму руху вібромашини.

Зауважу також, що у тексті дисертаційної роботи та реферату є неточності редакційного характеру і трапляються деякі синтаксичні і стилістичні огріхи і помилки.

## **8. Загальна оцінка роботи.**

Дисертація Яцуна В.В. є закінченою науковою працею і відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 - динаміката міцність машин. У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішено актуальну в галузі динаміки та міцності машин науково-прикладну проблему дослідження динаміки двочастотних резонансних вібромашин з інерційними віброзбудниками, що працюють на ефекті Зомерфельда. В результаті отримані нові науково обґрунтовані

теоретичні і експериментальні результати, що в сукупності є значним досягненням для розвитку прикладної теорії коливань, зокрема, теорії збудження двочастотних і резонансних вібрацій в вібромашинах з використанням ефекту Зомерфельда.

Таким чином, дисертація Яцуна В.В. відповідає вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, відповідно до положень п. п. 7 та 9 "Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук", затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р., зокрема, вимогам щодо наукової новизни і практичного значення, обґрунтованості і достовірності сформульованих наукових положень, висновків, рекомендацій, повноти та завершеності, а її автор Яцун Володимир Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент  
професор кафедри  
галузевого машинобудування  
Луцького національного  
технічного університету  
доктор технічних наук, професор

М.П. Ярошевич



ВІРНО:  
Начальник відділу кадрів  
"02." 02. 2025 р.

