

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 виконана в Центральноукраїнському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Структурно дисертація складається з анотації, змісту, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг роботи становить 402 сторінки друкованого тексту, з яких, анотація займає 10 сторінок, зміст – 6 сторінок, основний текст – 334 сторінки, список використаних джерел із 397 найменувань – 43 сторінки, а додаток – 9 сторінок. У роботі представлено 138 рисунків та 21 таблицю.

На розгляд подано дисертацію, автореферат, копії опублікованих робіт, а також автореферат дисертації кандидата наук.

2. Оцінка актуальності теми дисертації.

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну проблему, яка має суттєве значення для розвитку динаміки і міцності машин. Ця проблема полягає у розробці методів аналізу та дослідження динаміки двочастотних резонансних вібротомашин з інерційними віброзбудниками, що функціонують на основі ефекту Зомерфельда.

Машини вібраційного типу, зокрема, грохоти, вібросита та сепаратори, демонструють високі функціональні можливості під час застосування двочастотних збудників. У таких пристроях низькочастотні коливання платформи сприяють основному технологічному процесу, наприклад, сепарації чи просіюванню матеріалів. Водночас високочастотні коливання забезпечують очищення поверхні платформи і зміну механічних характеристик оброблюваного матеріалу, що підвищує ефективність основного процесу. Наприклад, впровадження двочастотних коливань дозволяє досягти кращої якості розділення мінеральної сировини за розмірами, ефективнішого зневоднення вугілля чи фракціонування піску.

Резонансні вібротомашини, з іншого боку, характеризуються вищою енергоефективністю. Завдяки зменшенню маси віброзбудників забезпечується амплітудне зростання коливань платформи. Резонансні режими успішно використовуються у вібраційних млинах, грохотах і вібростолах. Для створення таких коливань застосовуються електромагнітні

або інерційні віброзбудники, причому останні відзначаються більшою потужністю та надійністю.

З огляду на зазначене, актуальним завданням є створення машин, які поєднують переваги двочастотних і резонансних пристроїв з інерційними збудниками. Одним із найпростіших способів збудження резонансних коливань інерційними віброзбудниками є використання ефекту Зоммерфельда, однак цей підхід залишається недостатньо вивченим, що обумовлює актуальність і значимість виконаних досліджень.

Робота виконувалась у межах низки держбюджетних науково-дослідних проєктів, реалізованих у Центральноукраїнському національному технічному університеті, таких як:

- "Динаміка механічних систем, до складу яких входить обертове несуче тіло із приєднаними тілами" (держреєстрація № 0116U001486, період виконання 2016–2018 рр.), автор виконував обов'язки відповідального виконавця зазначеного проєкту;

- "Конструкція та працездатність високопродуктивних і енергоефективних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів" (держреєстрація № 0117U003725, період виконання 2017–2020 рр.) автор виконував обов'язки наукового керівника зазначеного проєкту.

3. Оцінка наукових результатів дисертації.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в суттєвому розвитку теоретичних основ і практичних аспектів збудження двочастотних та резонансних вібрацій у вібромашинах з використанням ефекту Зоммерфельда. До основних результатів дисертаційної роботи, що стосуються наукової новизни, слід віднести такі:

1. Запропоновано нові методи збудження двочастотних і резонансних вібрацій з використанням пасивних автобалансирів як інерційних віброзбудників. Виявлено, що автобалансир функціонує як два незалежні збудники вібрацій. У режимах усталеного руху вантажі автобалансиру створюють постійну неврівноваженість, залишаючись на частотах, близьких до резонансних. Вони діють як перший збудник, що генерує низькочастотні вібрації. Водночас дебалансна маса на корпусі автобалансира обертається із частотою ротора, формуючи високочастотні вібрації;

2. 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 рівнянь частот. Вони дозволяють визначати можливі частоти "застрягання" вантажів у автобалансирі;

3. Досліджено вплив асиметрії опор на якість двочастотних вібрацій. Встановлено, що навіть за значної асиметрії опор автобалансир забезпечує майже ідеальні двочастотні вібрації. Відхилення від режиму прямо пропорційні відношенню мас вантажів до маси машини та не перевищують 2 % для реальних пристроїв;

4. Встановлено характерні особливості режимів "застрягання" вантажів у автобалансири. Кількість кутових швидкостей "застрягання" завжди є непарною. Одна швидкість близька до частоти обертання ротора, решта формуються парами поблизу резонансної частоти. Тільки непарні швидкості є локально асимптотично стійкими;

5. Виявлено широкі можливості регулювання параметрів вібрацій платформи. Налаштування здійснюється шляхом зміни зовнішніх та внутрішніх сил опору, сумарної маси вантажів або швидкості обертання ротора;

6. Розроблено експериментальний метод дослідження ефекту Зомерфельда для резонансних збудників (маятникового, кульового, роликового типів), зокрема в умовах неможливості спостереження за рухом відповідних вантажів. Метод базується на регресійному аналізі сигналів від аналогових датчиків обертів та віброприскорень. Його ефективність підтверджено на експериментальному стенді з ротором на ізотропних пружно-в'язких опорах і автобалансиром із однією кулею. Цей метод використано для дослідження динаміки одномасової вібромашини з кульовими та маятниковими збудниками.

4. Оцінка практичного значення результатів роботи.

Практичне значення роботи полягає у значному внеску в розвиток практики проектування вібромашин, що відкриває нові можливості для створення ефективних і енергоощадних вібраційних систем.

Основні досягнення та результати:

1. Запропоновано використання пасивних автобалансирів як інерційних збудників двочастотних вібрацій. Це рішення створює нові перспективи для конструювання вібраційних систем, які поєднують високу продуктивність і енергоефективність;

2. Розроблено нові конструкції віброзбудників та вібромашин, а також практичні рекомендації щодо їх проектування та забезпечення працездатності. Ці рішення сприяють вдосконаленню існуючих пристроїв та розробці нових зразків техніки;

3. Практичне впровадження результатів досліджень:

- будівельна галузь: реалізовано на підприємствах ТОВ "АЛЬЯНСБУДСЕРВІС", ПП "ЦЕНТРВІЙСЬКБУД";

- дорожньо-будівельна галузь: застосовано в роботі Кіровоградської аграрної асоціації "Кіровоградоблагрошляхбуд" та ДП "Агентство місцевих автомобільних доріг";

- видобувна промисловість: реалізовано на підприємствах ТОВ "Гравел-ВН", ТОВ "Трейд-ВВ", ТОВ "Елгран";

- сільськогосподарська промисловість: використано на ТОВ "Агропромислова компанія імені О.В. Гіталова".

Впровадження цих технологій дозволило значно підвищити ефективність виробничих процесів, зокрема вібраційних, з одночасним зниженням енергетичних витрат;

4. Застосування в навчальному процесі:

результати роботи інтегровано в освітній процес кафедри деталей машин та прикладної механіки Центральноукраїнського національного технічного університету, зокрема, в освітніх компонентах «Математичне моделювання та САПР», «Вантажопідйомна та транспортуюча техніка», «Основи САПР» ОПП 133 «Галузеве машинбудування». Це сприяє підготовці висококваліфікованих спеціалістів у галузі механіки та машинобудування.

5. Господарські договори та фінансування:

- дослідження зі зменшення вібрацій сільськогосподарської техніки (СФГ "Личук") з фінансуванням 60 тис. грн.;

- розробка вібротриболомашин для сепарації насіння зернових культур (департамент інфраструктури та промисловості КОДА) з фінансуванням 50 тис. грн.

Проектування та впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, розроблених під час виконання дисертаційної роботи, є важливим кроком на шляху до оптимізації сучасних виробничих процесів. Ці досягнення підтверджують актуальність наукових результатів для промисловості та сприяють сталому розвитку економіки.

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

Обґрунтованість та достовірність результатів дисертаційної роботи забезпечуються комплексним підходом, що включає використання сучасних теоретичних і експериментальних методів, підтвердження результатів апробацією та їх практичним впровадженням.

Теоретичні дослідження

1. Фізично обґрунтовані припущення:

- розроблені математичні моделі одно-, дво- та трьохмасових вібротриболомашин, що враховують ключові параметри і явища.

2. Методи аналізу:

- використано класичні підходи теорії коливань, стійкості рухів механічних систем, методи біфуркації рухів і малого параметра.

Це дозволило точно описати динамічні процеси, визначити стійкість рухів і побудувати аналітичні залежності, що характеризують поведінку вібротриболомашин.

Експериментальні дослідження

1. Сучасне обладнання:

- використання вимірювального і балансувального обладнання, що відповідає міжнародним і державним стандартам, забезпечує високу точність отриманих результатів.

2. Візуальні спостереження:

- додатково застосовувалося стробоскопічне освітлення для фіксації поведінки системи, що підвищує надійність результатів.

Узгодженість результатів

- висновки теоретичних і експериментальних досліджень узгоджуються

між собою на прикладі одномасової вібромашини з кульовими і маятниковими віброзбудниками, підтверджуючи правильність застосованих методів та підходів;

- проведені дослідження доводять наукову і практичну значущість результатів для проектування нових вібромашин.

Апробація та впровадження

1. Апробація:

- результати роботи представлені на наукових семінарах і міжнародних конференціях, де отримали позитивну оцінку.

2. Практичне застосування:

- впроваджено на низці промислових підприємств у різних галузях, що підтверджує практичну корисність отриманих результатів.

Публікації та патенти

1. Наукові статті:

- опубліковано 22 статті у фахових виданнях категорії А, всі з яких індексуються у наукометричній базі Scopus.

2. Патенти:

- одержано 2 патенти України та 7 патентів України на корисну модель.

3. Тези:

- опубліковано 9 тез конференцій, включно з 1 тезою у виданні, що індексується у Scopus.

Відповідність вимогам

Кількість, повнота та якість публікацій повністю відображають внесок автора і відповідають вимогам до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

6. Оцінка змісту, оформлення дисертації та автореферату.

Структура та зміст дисертації

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні завдання, методи їх досягнення, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів досліджень. Наведено відомості щодо структури та обсягу роботи.

В *першому розділі* на основі наукових літературних джерел проведено критичний аналіз сучасних наукових досліджень щодо конструкції, принципів дії, областей застосування та динаміки двочастотних і резонансних вібромашин. Оцінено переваги застосування резонансних вібромашин. Встановлено, що найбільш простий спосіб генерації резонансних вібрацій ґрунтується на ефекті Зомерфельда. Визначено недоліки вібромашин з інерційними віброзбудниками, в яких застосовано зазначений ефект, і методів їх дослідження та обґрунтовано напрямок, мету та завдання дослідження.

В *другому розділі* вперше запропоновано застосування кульових, роликкових і маятникових автобалансирів як збудників двочастотних вібрацій. Розроблено нові конструкції віброзбудників, методи збудження ними

вібрацій та наближену теорію двочастотних вібромашин, робота яких заснована на ефекті Зомерфельда. Підтверджені основні припущення наближеної теорії, зокрема, що після пуску вібромашини, незважаючи на сильну асиметрію опор, з часом встановлюється майже ідеальний двочастотний режим руху механічної системи. Крім того, зазначені певні недоліки наближеної теорії, які пов'язані з похибками, яку вносить резонансна складова коливань. тому теорія двочастотних вібромашин, що працюють на ефекті Зомерфельда, потребує подальшого розвитку.

В *третьому розділі* наведено створену узагальнену модель одномасової вібромашини з поступальним рухом платформи й кульовим, роликотвим чи маятниковим віброзбудником. Досліджено двочастотні режими руху, умови їх існування, стійкість режимів застрягання та енергоефективність. Отримані результати дослідження дозволили розробити методи дослідження динаміки дво- та тримасових вібромашин. Так доведено, що ефективним для дослідження режимів застрягання є розроблений метод, що заснований на параметричному розв'язку рівняння пошуку частот застрягання та теорії біфуркації рухів.

В *четвертому розділі* побудовано модель двомасової вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформ і різного типу віброзбудників. Застосовано розроблений аналітико-числовий метод для дослідження резонансних вібрацій двомасових вібромашин зі збудниками різних типів. Досліджено вплив в'язкого опор на виникнення частот застрягання вантажів, стійкість режимів застрягання, зокрема у випадку дії малих сил опор у вібромашині, внутрішніх сил в'язкого опор між платформами, сил в'язкого опор, що діють на вантаж, а також протифазний режим.

В *п'ятому розділі* побудовано узагальнену модель тримасової вібромашини з прямолінійним рухом платформ і віброзбудниками різних типів. Проведено аналітичні та числові дослідження динаміки зазначеної вібромашини. Проведено аналітичний синтез і дослідження числовими методами динаміки трьохмасової антирезонансної вібромашини. Оцінено стійкість антирезонансного режиму.

В *шостому розділі* неведені експериментальні дослідження двочастотних одномасових машин, що працюють на ефекті Зомерфельда з прямолінійним поступальним та кутовим рухом платформи. Розроблено експериментальний метод для дослідження ефекту Зомерфельда в збудниках резонансних вібрацій, який засновано на регресійному аналізі сигналів від аналогових датчиків, що забезпечує високу точність в умовах складного спостереження за рухом дебалансних мас.

На підставі отриманих в дисертаційній роботі результатів сформульовано *висновки*, які мають як теоретичне, так і практичне значення.

У *додатку* наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Оцінка змісту дисертації:

- дисертація є науково обґрунтованою та практично значущою роботою, оскільки вирішує ключові завдання у проектуванні та розробці теорії

створення нових вібромашин;

- оформлення роботи, за винятком деяких відхилень, відповідає вимогам ДСТУ, матеріали ілюстровані, а виклад послідовний і доступний;

- наукові положення, які становлять новизну, не повторюють результати кандидатської дисертації та підтверджують унікальність досягнень автора;

- автореферат відображає основні положення роботи, а особистий внесок автора у публікації зі співавторами чітко визначений.

Дисертація є завершеним і якісним науковим дослідженням, що вносить значний вклад у розвиток теорії та практики вібраційних систем. Наукові положення й результати відповідають вимогам до дисертаційних робіт, а досягнення автора заслуговують на підтримку.

7. Основні зауваження.

1. Зустрічається неоднозначне використання термінів, як-от «вібропришвидшення», «пришвидшення» «віброприскорення» (с. 4, 34) і «прискорення» (с. 43, 164, 187, 270). Аналогічно, «масло» і «мастило», «збудник» і «збуджувач» вібрацій тощо. Є деякі граматичні та стилістичні помилки в роботі, а також відхилення від вимог ДСТУ 3008:2015, який регламентує оформлення дисертаційних робіт;

2. У розділі 6 не зазначено, як отримуються сигнали з декількох датчиків, послідовно чи паралельно, і як це впливає на результати експериментів.

3. На частині рисунків не зазначені українською мовою одиниці вимірювання механічних величин (наприклад рис. 6.29), а також назви елементів стендів (наприклад, рис. 6.30), що іноді ускладнює сприйняття матеріалу;

4. В розділах 3, 4, 5 побудовані математичні моделі вібромашин у припущенні, що електродвигун має достатню потужність для обертання корпусу віброзбудника з будь-якою сталою кутовою швидкістю обертання, але у подальших розділах не подано рекомендації щодо підбору потужності електродвигуна;

5. Не розроблено рекомендацій з розрахунків на міцність і циклічну втому пружин, зокрема, плоских (пластинчатих), елементів рамної конструкції вібромашин;

6. Не розроблено рекомендацій з підбору мастила, що випускається, зокрема, автомобільною промисловістю для отримання бажаних параметрів вібрацій, забезпечення стабільної роботи вібромашини;

7. У роботі представлені публікації наукових статей, що індексуються в наукометричній базі Scopus, які опубліковані в одному науковому виданні, що дещо обмежує оцінку отриманих результатів роботи широкого кола науковців;

8. У дисертаційній роботі допущено посилання на російськомовні джерела;

9. Приклади розрахунків за розробленими в роботі методиками бажано було б подати не в основному матеріалі дисертації, а в додатках.

:
Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Висвітлення та врахування цих зауважень у дисертації може вплинути лише на краще сприйняття поданого матеріалу чи бути об'єктом подальших досліджень.

8. Загальна оцінка роботи.

Дисертація Яцуна В.В. є завершеною науковою роботою, що відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. У ній вирішено актуальну науково-прикладну проблему щодо дослідження динаміки двочастотних резонансних вібр машин з інерційними віброзбудниками, які функціонують на основі ефекту Зомерфельда.

Робота містить нові науково обґрунтовані результати як теоретичного, так і експериментального характеру. Вона характеризується науковою новизною, практичним значенням, обґрунтованістю та достовірністю отриманих результатів. Ці результати є значним внеском у розвиток теорії збудження двочастотних і резонансних вібрацій у вібр машинах із використанням зазначеного ефекту.

Дисертація Яцуна В.В. відповідає вимогам, визначеним положеннями п.п. 7 та 9 "Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук", затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року., а її автор, Яцун Володимир Володимирович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент:
завідувач кафедри галузевого машинобудування
Вінницького національного технічного університету,

доктор технічних наук, професор



Л. К. Поліщук

Підпис д.т.н., професора Поліщука Л.К. засвідчую:

Вчений секретар ВНТУ
к.т.н., доцент



І. В. Віштак