

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

КОВТУНА Ігоря Івановича

«Розроблення науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем
електронної апаратури»,

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 Хмельницькому національному університеті (ХНУ) Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 427 сторінок. Дисертація містить 169 ілюстрацій, 28 таблиць, список використаних джерел із 228 найменувань, 11 додатків.

На розгляд представлено дисертацію, реферат дисертації, копії опублікованих робіт, автореферат дисертації кандидата наук.

2. Оцінка актуальності теми дисертації.

У роботі вирішується важлива науково-технічна проблема, що має вагоме значення для розвитку динаміки та міцності конструкцій радіоелектронної апаратури і полягає у розробленні науково-прикладних засад теорії і практики вібраційного захисту її несівних модулів шляхом комплексного вивчення динамічних процесів та напружено-деформованого стану несівних конструкцій і визначення їхніх інерційних та пружно-дисипативних параметрів з урахуванням експлуатаційних і технологічних навантажень.

Технічна актуальність проблеми полягає у тому, що запропоновані конструктивні і технологічні методи забезпечення міцності деталей та вузлів електронної радіоапаратури дозволяють зменшити передачу динамічних і статичних навантажень до критичних елементів конструкцій відповідальних вузлів електронної радіоапаратури за рахунок модифікації пружних та дисипативних параметрів елементів конструкцій, які є ланками передачі зовнішніх навантажень. В роботі показано, що використання конструкційного демпфування сухого тертя, яке виникає при взаємному зміщенні поверхонь контакту, перевершує демпфування внутрішнього в'язкого тертя в матеріалі деталей. Розроблені комплексні технічні рішення, які дозволяють зменшувати передачу навантажень і забезпечувати міцність електронних компонентів, модулів та друкованих плат в несівних конструкціях електронної радіоапаратури, є простими і не вимагають дороговартісного технологічного обладнання.

Наукова актуальність проблеми виникла через наявність принципових недоліків у методологічному підході до застосування розрахунково-експериментальних методів оцінки напружено-деформованого стану і динамічних процесів в деталях, вузлах та блоках електронної радіоапаратури через відсутність загальноприйнятої термінології, методик оцінки міцності та норм міцності, за якими повинно вестись проєктування, розрахунки, випробування і впровадження у серійне виробництво та експлуатацію виробів електронної радіоапаратури на противагу багатьом іншим галузям техніки. Крім того, результати розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій електронної радіоапаратури існуючими методами часто мають значну неточності, бо ці методи не враховують нестабільність фізико-механічних характеристик використовуваних матеріалів, технологію виробництва деталей і друкованих плат, особливості несівних конструкцій тощо. Подана до захисту робота присвячена розробленню науково-прикладних засад динаміки та міцності електронної апаратури на основі одержаних закономірностей впливу геометричних та фізико-механічних параметрів конструкцій на максимальні напруження і деформації елементів несівних систем, а також на динамічні процеси, які виникають під час експлуатації блоків електронної радіоапаратури, що дало можливість здійснювати раціональний добір параметрів конструкцій для забезпечення міцності і необхідної жорсткості друкованої плати. Запропоновані моделі та методи є достатньо універсальними і можуть бути використані для широкого класу несівних конструкцій електронної радіоапаратури, які піддаються механічному, температурному та пневматичному впливу в жорстких умовах експлуатації.

Робота виконувалась у відповідності до наступних проєктів, які виконувалися в межах держбюджетних науково-дослідних робіт Хмельницького національного університету: 7Б-97 «Розробка акусто-емісійного комплексу та його застосування для неруйнівного контролю, діагностики та прогнозування міцності нових матеріалів та деталей нафтогазового обладнання» (1997-1999 рр., номер держреєстрації 0197U016018) автор – виконавець; 3Б-2000 «Розробка комплексу лінійної, площинної об'ємної локації сигналів акустичної емісії та його застосування для неруйнівного контролю, діагностики та прогнозування міцності матеріалів, деталей та електронних систем нафтогазового обладнання» (2000-2002 рр., номер держреєстрації 0100U001979) автор – виконавець; 2Б-2004 «Розробка новітніх технологій, що забезпечують підвищення міцнісної надійності машин та їх електронного обладнання» (2004-2005 рр., номер держреєстрації 0104U002103) автор – виконавець; 12Б-2011 «Забезпечення міцності і герметичності модулів, герметизованих компаундом, при термоударах» (2011-2012 рр., номер держреєстрації 0111U002304) автор – виконавець; Ф41.2/025-2011 «Дослідження електрокерованих нанорозмірних компаундів і можливості їх застосування в безрезонансних кріпильних пристроях для тестування виробів електронної техніки на вібро- та удароміцність» (2011-2012 рр., номер держреєстрації 0111U006775) автор – виконавець; 5Б-2013 «Множинні зворотні задачі механіки структурно-складних технічних систем» (2013-2015

пр., номер держреєстрації 0113U002064) автор – виконавець; 4Б-2015 «Розвиток наукових та інженерних основ надійності електронної техніки шляхом удосконалення технології її тестування на вібрації та удари» (2015-2016 рр., номер держреєстрації 0115U000225) автор – виконавець; 2Б-2017 «Розробка наукових основ захисту виробів радіоелектроніки, закріплених на об'єднувальних платах, від деформацій плат, а плат від динамічних і теплових навантажень» (2017-2019 рр., номер держреєстрації 0117U001168) автор – відповідальний виконавець; госпдоговірної теми 02-2019 «Розробка методів контролю, діагностики та прогнозування міцності та герметичності корпусів інтегральних модулів надвисоких частот в умовах перепадів тиску та температури» (2019 р., номер держреєстрації 0119U101419) автор – відповідальний виконавець; 1Б-2020 «Наукові основи перетворення критичних обертів в некритичні, резонансних частот в нерезонансні і критичних сил по Ейлеру в некритичні в виробках військової і невійськової техніки» (2020-2022 рр., номер держреєстрації 0120U102067) автор – виконавець; 3Б-2020 «Неруйнівний контроль, діагностування та прогнозування технічного стану електронних систем методом акустичної емісії в виробках військової і невійськової техніки» (2020-2021 рр., номер держреєстрації 0120U102069) автор – відповідальний виконавець.

3. Оцінка наукових результатів дисертації.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розвитку науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем електронної радіоапаратури, спрямованих на зменшення статичних та динамічних напружень і деформацій та забезпечення міцності елементів конструкцій за рахунок добору їхніх пружно-дисипативних параметрів. Зокрема:

уперше:

- запропоновано низку дискретних і континуально-дискретних математичних моделей вільних і кінематично-збуджуваних коливань друкованої плати, застосуванням яких теоретично обґрунтовано визначення максимальних напружень і переміщень та резонансних коливань друкованої плати під час експлуатації. Усунення цих небезпечних явищ може бути здійснено лише на основі детального аналізу динамічних процесів у механічній системі плати;
- одержано закономірності впливу на максимальні напруження і деформації елементів несівних систем, а також на динамічні процеси, які виникають під час експлуатації блоків електронної радіоапаратури, інерційних та пружно-дисипативних параметрів конструкцій, що дало можливість здійснювати добір параметрів конструкцій для забезпечення міцності і необхідної жорсткості друкованої плати;
- теоретично обґрунтовано ефективність застосування конструкційного сухого тертя для зменшення динамічних напружень і деформацій друкованої плати. Розроблена математична модель дозволяє обґрунтовувати значення коефіцієнту жорсткості та проводити інженерний розрахунок конструктивних параметрів демпфера сухого тертя запропонованого у вигляді пів-еліптичної балки прямокутного поперечного перерізу;

удосконалено:

- методологію зменшення коефіцієнта передачі деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів та підвищення стійкості елементів конструкцій друкованих плат до технологічних і експлуатаційних навантажень за рахунок збільшення довжини монтажних виводів електронних компонентів, на відміну від технології низького наскрізного або поверхневого монтажу. Ефективність методології обґрунтовано математичним моделюванням напружено-деформованого стану конструкції друкованої плати у вигляді статично невизначуваної плоскої стрижневої системи в умовах дії експлуатаційного навантаження;
- методологію контролю площинності друкованої плати за показником допустимого короблення, що полягає у забезпеченні допустимого напруження та міцності паяних з'єднань, на відміну від стандартизованого показника площинності, для оцінки якого застосовують геометричні характеристики згинання та скручування основи друкованої плати;
- методологію визначення максимального напруження елементів електронного модуля із загальною герметизацією компаундом із представленням його сполучених елементів у вигляді складених товстостінних циліндрів з урахуванням дії перепаду температур. Встановлено, що радіальні напруження досягають максимальних значень на межі контакту циліндрів, а колові – на внутрішній поверхні кожного циліндру в умовах усталеної температури;

набули подальшого розвитку:

- теорія вібраційного захисту електронної радіоапаратури за рахунок застосування комплексного підходу до математичного моделювання вільних і кінематично-збуджуваних коливань друкованих плат;
- методика технічної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної радіоапаратури, зокрема їх паяних та зварних з'єднань, із застосуванням методу акустичної емісії, яка полягає у відборі інформативних параметрів та їхніх допустимих рівнів, які свідчать про придатність об'єкту дослідження до експлуатації.

4. Оцінка практичного значення результатів роботи.

Результати роботи дозволяють для широкого класу несівних конструкцій, призначених для забезпечення електричних контактів і механічної підтримки відповідальних компонентів та вузлів електронної радіоапаратури, яка працює в жорстких умовах зовнішніх впливів, в енергетичних, технологічних, транспортних та інших машинах, приладах і апаратах, зменшувати напруження і деформації та забезпечувати міцність критичних елементів конструкцій за рахунок раціонального добору і розрахунку їхніх геометричних, інерційних та пружно-дисипативних параметрів.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленні низки прикладних рекомендацій щодо забезпечення вібраційної міцності критичних елементів конструкцій та вібростійкості електронної радіоапаратури. Рекомендації містять: інженерні розрахункові методи оцінки динаміки та міцності несівних систем електронної радіоапаратури;

конструктивні і технологічні методи забезпечення міцності деталей і вузлів електронної апаратури та методи ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій електронної радіоапаратури з урахуванням дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

Розроблені удосконалені технології:

- монтажу електронних компонентів, яка забезпечує зменшення коефіцієнта передачі деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів та підвищення стійкості елементів конструкцій друкованих плат до технологічних і експлуатаційних навантажень;

- контролю площинності друкованої плати за показником допустимого короблення, яка полягає у забезпеченні допустимого напруження та міцності паяних з'єднань.

Здійснено впровадження результатів наукових досліджень у вигляді: застосування демпфера сухого тертя для зменшення динамічного напружено-деформованого стану друкованих плат (акт від 12.12.2022); методу розрахунку та вимірювання напружень і деформацій та технологічних методів захисту електронних компонентів у герметизованих компаундом електронних модулях під дією термоударів (акт від 11.12.12) та конструктивних методів забезпечення міцності деталей та вузлів електронної апаратури в умовах дії динамічних навантажень (акт від 27.12.2016) на Державному підприємстві «Новатор», м. Хмельницький; застосування інженерних методів оцінки та забезпечення міцності друкованих плат в умовах вібраційних навантажень (акт від 20.12.2016) в науково-дослідному інституті радіолокаційних систем «Квант-радіолокація», м. Київ; застосування методики акустико-емісійної неруйнівної технічної діагностики та методу електротензометрії посудин, що працюють під тиском (акт від 21.12.2001) в Подільському експертно-технічному центрі Держнаглядохоронпраці, м. Хмельницький; застосування методу акустико-емісійного неруйнівного діагностування міцності і герметичності модулів та компонентів бортового радіоелектронного обладнання (корпусів модулів НВЧ, керамічних конденсаторів) під дією надмірного тиску і температури в статичному та циклічному режимі навантажень (акти від 06.09.2019 та від 08.12.2022) в ТзОВ «Альпмонтаж», м. Хмельницький.

Отримані результати роботи, методики і моделі використовуються в освітньому процесі Хмельницького національного університету при викладанні таких дисциплін, як «Конструювання та технологія виробництва електронної апаратури», «Електротехнічні матеріали», «Математичне моделювання систем і процесів» та під час виконання здобувачами вищої освіти кваліфікаційних робіт.

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

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів забезпечені використанням фундаментальних законів механіки, математики та математичної фізики. Методологічною основою роботи є системний підхід до вивчення досліджуваних явищ і процесів, що дало змогу комплексно

розглянути питання, пов'язані із віброзахистом функціональних вузлів електронної радіоапаратури. Теоретичні дослідження здійснювались з використанням сучасних методів аналітичного, числового та імітаційного моделювання. У теоретичних дослідженнях достовірність результатів ґрунтується на застосуванні методів динаміки дискретних і континуально-дискретних пружних систем, методів теоретичної механіки, опору матеріалів, будівельної механіки, теорії пружності та теорії механічних коливань. Для реалізації математичних моделей використано систему автоматизованого проектування MathCad, для розрахунків методом скінченних елементів – систему автоматизованого проектування Solidworks із застосуванням системи аналізу конструкцій Solidworks Simulation, для реалізації числового аналізу – систему автоматизації математичних розрахунків Matlab із застосуванням модуля візуального програмування Simscape Multibody. Експериментальні дослідження динамічних процесів та напружень і деформацій в конструкціях електронної апаратури на різних рівнях їх конструктивної складності були виконані із врахуванням специфіки малогабаритних елементів конструкцій, для чого були модифіковані і адаптовані такі методи експериментального дослідження, як метод електротензометрії, метод акустичної емісії, метод віброметрії, метод високошвидкісної відеозйомки. Випробування об'єктів дослідження здійснювалось під дією механічного, температурного та пневматичного навантажень в статичному, циклічному та динамічному режимах. Правомірність отриманих результатів досліджень ефективності вібраційного захисту доведена встановленням відхилення значень в допустимих межах в процесі порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів підтверджується апробацією результатів роботи на наукових семінарах та міжнародних науково-технічних конференціях, а також впровадженням на ДП «Новатор» (м. Хмельницький), в Подільському експертно-технічному центрі Держнаглядохоронпраці (м. Хмельницький), в науково-дослідному інституті радіолокаційних систем «Квант-радіолокація» (м. Київ) та в ТзОВ «Альпмонтаж» (м. Хмельницький).

Нові наукові результати та положення повністю відображені у 55 наукових працях, серед яких: 2 монографії; 1 розділ монографії, який опубліковано у закордонному виданні; 13 публікацій, включених до Переліку наукових фахових видань України; 3 статті у наукових періодичних виданнях інших держав; 6 публікацій у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science і Scopus; 1 патент України на корисну модель; 11 матеріалів доповідей на міжнародних конференціях у виданнях, що реферуються науково-метричними базами даних Web of Science і Scopus; 12 праць апробаційного характеру; 6 праць, які додатково відображають наукові результати докторської дисертації.

6. Оцінка змісту, оформлення дисертації та автореферату.

У дисертації розв'язані такі завдання:

- здійснено комплексне математичне моделювання динамічних процесів та напружено-деформованого стану несівних систем електронної радіоапаратури;
- проведено порівняльний аналіз результатів досліджень коливальних явищ із застосуванням дискретних та континуально-дискретних розрахункових моделей друкованої плати;
- здійснено аналіз динамічних внутрішніх зусиль і напружень в елементах конструкції друкованої плати; досліджено вільні і вимушені коливання механічної системи друкованої плати методом імітаційного моделювання;
- здійснено оцінку ефективності застосування демпфера сухого тертя та обґрунтовано раціональний добір його пружно-дисипативних характеристик для покращення напружено-деформованого стану друкованих плат в умовах резонансного збудження;
- проведено аналіз статичних внутрішніх зусиль і напружень в елементах конструкцій друкованих плат під час їх випробувань та в елементах конструкції із загальною герметизацією компаундом під час термоударів.
- модифіковано та адаптовано методи експериментального визначення напружень і деформацій з урахуванням особливостей дослідження малогабаритних елементів конструкцій електронної апаратури;
- експериментально перевірено основні результати теоретичних досліджень та обґрунтовано методи зменшення напружень і деформацій для забезпечення міцності елементів несівних конструкцій електронної радіоапаратури в умовах дії технологічних та експлуатаційних навантажень;
- розроблено способи ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій друкованих плат та електронних модулів із загальною герметизацією компаундом в умовах наближених до експлуатаційних;
- обґрунтовано практичні рекомендації, засновані на розробленні інженерних методів оцінки та конструктивних і технологічних методів забезпечення міцності несівних систем електронної радіоапаратури в умовах дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

В результаті розроблено теорію і практику зменшення напружень і деформацій та забезпечення міцності елементів конструкцій несівних систем електронної апаратури за рахунок раціонального добору їх геометричних, інерційних та пружно-дисипативних параметрів на стадіях проєктування, виробництва і експлуатації із врахуванням дії експлуатаційних та технологічних навантажень.

На основі розгляду матеріалів дисертації можна зробити позитивний висновок про повноту розв'язання поставленої науково-технічної проблеми.

Дисертація оформлена у відповідності до вимог ДСТУ, належним чином ілюстрована, стиль та послідовність викладення матеріалу відповідають вимогам до написання наукових робіт. В тексті дисертації є посилання автора на свої роботи.

Наукові положення дисертації, що складають наукову новизну і виносяться на захист, не повторюють цих положень у дисертації кандидата технічних наук.

Реферат в достатній мірі відображає зміст дисертації, а наукові положення та результати, що наведені в ньому ідентичні викладеним у дисертаційній роботі.

В рефераті і дисертації відзначений особистий внесок Ковтуна І. І. в наукові публікації із співавторами. Завдяки цьому внеску одержані всі наукові результати, які складають наукову новизну досліджень і виносяться на захист.

7. Основні зауваження.

1. Доцільно конкретизувати, що наукова проблема стосується, переважно, несівних конструкцій модульного рівня 0 (підшарок (підкладка), корпус електрорадіовиробу, мікросхема), рівня 1 (плата печатна (плата) з передньою панеллю або без неї) відповідно до ДСТУ 3040-95 «Апаратура радіоелектронна. Конструкції базові несівні уніфіковані. Типи і розміри».

2. Доцільно більш докладно обговорити основні конструктивні особливості як самих друкованих плат, так і особливостей їх кріплення у модулях рівня 2 (відповідно до ДСТУ 3040-95). Доцільно більш докладно обґрунтувати переваги у моделюванні друкованих плат балками з розподіленими і зосередженими параметрами у порівнянні з моделями у вигляді пластин.

3. Не достатньо розкрито для яких електронних компонентів (деталей, модулів рівня 0) застосовні побудовані моделі: п.п. 2.2.1, рис. 2.69; п.п. 2.2.2., рис. 2.75; п.п. 4.3, рис. 4.22, п.п. 5.2.1, рис. 5.2, 5.3.

4. В описі лабораторної бази, обладнання (Розділ 3 чи Додатки В, Г) доцільно вказати країну - виробника обладнання. В описах не вказаний тип і не наведені технічні характеристики «датчиків для вимірювання вібрацій», зокрема не описані датчики (акселерометри) АВС 032, ДН-5.

5. Доцільно довести удосконалення «технології наскрізного монтажу електронних компонентів...», «технології визначення допустимого короблення друкованої плати...» до технічних рішень, захищених патентами на винаходи чи корисні моделі.

6. Наукова новизна, заявлена у 1-му і 2-му абзацах підпункту «удосконалено» більше стосується підпункту «практичне значення одержаних в дисертації результатів» і майже повністю дублюються у цьому підпункті. Так і деякі елементи наукової новизни майже дублюються в підпункті «практичне значення».

7. У рефераті недоцільне повторення цілого абзацу «Аналіз робіт...» с. 1, та с. 10. Невдалий термін вібродатчик (використовувалися акселерометри). Не описано як за допомогою акселерометра АВС 032 вимірювалися вібропереміщення (автореферат, с. 27).

Зроблені зауваження не впливають на загальну високу оцінку роботи, стосуються її кращому позиціюванню і розумінню.

8. Загальна оцінка роботи.

Дисертація Ковтуна І. І. є закінченою науковою працею і відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин (конструкційна міцність машин, приладів і апаратури при статичних, циклічних і динамічних навантаженнях; експериментальні методи й засоби досліджень міцності машин, приладів і апаратури). У дисертаційній роботі на основі отриманих науково обґрунтованих результатів вирішено актуальну в галузі динаміки та міцності машин науково-прикладну проблему вібраційного захисту радіоелектронної апаратури шляхом комплексного вивчення динамічних процесів та напружено-деформованого стану конструкцій і визначення їхніх інерційних та пружно-дисипативних параметрів з урахуванням експлуатаційних і технологічних навантажень. В результаті отримані нові науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, що в сукупності є значним досягненням для розвитку розрахункових та експериментальних методів оцінки конструкційної міцності, довговічності та надійності радіоелектронної апаратури, встановленої в енергетичних, технологічних, транспортних та інших машинах, приладах і апаратах, на стадіях проектування, виробництва й експлуатації.

Таким чином, дисертація Ковтуна І. І. 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, Ковтун Ігор Іванович, заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри деталей машин

та прикладної механіки

Центральноукраїнського національного
технічного університету

(м. Кропивницький),

доктор технічних наук, професор

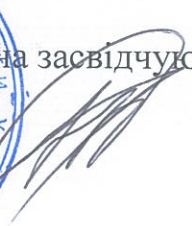


Геннадій ФІЛІМОНІХІН

Підпис д.т.н., професора Г. Б. Філімоніхіна засвідчую:

Проректор з наукової роботи

та міжнародних зв'язків

Андрій ТИХИЙ