

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

ВІДГУК

офіційного опонента д. т. н., професора Дзюби Анатолія Петровича
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

Актуальність теми дисертації. Дослідження динамічних процесів та конструкційної міцності електронної апаратури в енергетичних, технологічних, транспортних та інших машинах, приладах і апаратах при статичних, циклічних і динамічних навантаженнях є актуальною проблемою динаміки та міцності машин. Створення розрахункових та експериментальних методів оцінки їх конструкційної міцності, довговічності та надійності на стадіях проектування, виробництва і експлуатації все ще далеке від завершення.

Важливість цієї проблеми пов'язана з тим, що недостатня міцність елементів конструкцій електронної апаратури нерідко призводить до її поломок та відмов в умовах дії зовнішніх навантажень, які виникають як в процесі експлуатації, так і на етапі виробництва. Проблема дослідження напружено-деформованого стану та динамічних процесів у конструкціях електронної апаратури є особливо актуальною в умовах нарощування конструктивної складності та збільшенням кількості елементів поряд з необхідністю зменшення їх габаритних розмірів, що неминуче впливає на характеристики міцності таких конструкцій.

На сьогоднішній день наукові публікації в цій галузі недостатньо систематизовані, що пов'язано з відсутністю загальноприйнятої термінології та методики розрахунку і вимірювання напружено-деформованого стану елементів конструкцій електронної апаратури і, як наслідок, норм міцності, за якими повинно вестись проектування, розрахунки, випробування та впровадження в серійне виробництво і експлуатацію виробів електронної апаратури.

Тому актуальність представленої дисертаційної роботи І.І. Ковтуна не викликає сумнівів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота є складовою частиною науково-дослідних проєктів, які виконувались автором у відповідності до наукової тематики і в межах 10 держбюджетних науково-дослідних тем, що виконуються впродовж значного періоду в Хмельницькому національному університеті.

Наукова новизна отриманих результатів.

- Вперше побудована досить загальна методологія системного теоретико-експериментального підходу до забезпечення міцності механічних елементів конструкцій електронної апаратури.

- Розроблені нові моделі і методи дослідження динаміки та міцності у застосуванні до несучих елементів механічних конструкцій з урахуванням їх інерційних, пружних та дисипативних параметрів.

- Запропоновано комплексне математичне моделювання динамічних та статичних процесів у функціональних вузлах електронної апаратури, яке дозволяє оцінити напружено-деформований стан елементів конструкцій та здійснити обґрунтований добір параметрів конструкцій для забезпечення потрібної міцності та жорсткості.

- Показано можливість виникнення резонансних коливань друкованої плати шляхом застосування дискретних і континуально-дискретних математичних моделей вільних і вимушених її коливань; теоретично обґрунтовано та продемонстровано вплив коливань на умови експлуатації електронної апаратури.

- Запропоновано оснащення несучої конструкції додатковим конструктивним вузлом, який виконує функцію демпферу сухого тертя в кінематичній парі, що здійснює коливання, з метою зменшення амплітуди коливань та напружень в конструкції друкованої плати. Обґрунтовано ефективність застосування конструкційного сухого тертя у порівнянні із в'язким внутрішнім тертям в матеріалах конструкції несучої системи друкованої плати.

- Удосконалено технологію монтажу електронних компонентів на друкованих платах, яка забезпечує зменшення передачі деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів, підвищує стійкість елементів конструкцій до технологічних і експлуатаційних навантажень та забезпечує необхідну міцність і жорсткість паяних з'єднань друкованої плати на відміну від стандартної технології низького наскрізного або поверхневого монтажу.

- Розвинена методика технічної діагностики елементів конструкцій електронної апаратури застосуванням методу акустичної емісії та відбором інформативних параметрів, рівень яких свідчить про придатність об'єкту дослідження до експлуатації.

Таким чином, в дисертації побудовані основи захисту електронної апаратури від механічних, температурних та пневматичних впливів, які включають в себе інженерні розрахункові методи оцінки динаміки та міцності несучих систем електронної апаратури, конструктивні і технологічні методи забезпечення міцності деталей і вузлів електронної апаратури та методи ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій електронної апаратури з урахуванням дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

Наукове та практичне значення отриманих результатів.

Наукове значення отриманих результатів полягає в побудові математичних моделей та методик застосування інженерних розрахунків для оцінки міцності елементів конструкцій електронної апаратури із урахуванням дії зовнішніх навантажень, що виникають в процесі експлуатації і технологічних операцій на етапі виробництва, а також в розробці системної методології теоретико-експериментальних досліджень міцності і надійності конструкцій електронної

апаратури, що є ваговим науково-методичним підґрунтям для подальших наукових досліджень в цій галузі та розробки і обґрунтування норм міцності.

Практична цінність роботи полягає в тому, що отримані результати мають суттєве прикладне значення для галузей техніки, які використовують електронну апаратуру в жорстких умовах дії зовнішніх впливів шляхом системного поєднання математичного моделювання та експериментальних випробувань функціональних вузлів електронної апаратури.

Застосування отриманих в дисертації результатів забезпечує зменшення напружень і деформацій, підвищення міцності та жорсткості елементів конструкцій і працездатності електронної апаратури на стадіях проєктування, виробництва та експлуатації.

Результати роботи дозволяють вирішувати задачу визначення фізико-механічних характеристик неоднорідних матеріалів елементів конструкцій електронної апаратури, із використанням розробленого методу пробних параметрів, який враховує напружено-деформований стан, відповідний до реальних технологічних і експлуатаційних навантажень

Створено випробувальний та вимірювальний комплекс, який може бути ефективним засобом досліджень широкого кола задач динаміки і міцності електронної апаратури. В цьому комплексі використовуються сучасні засоби і методи електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відео зйомки, що відтворюють дію механічних, температурних та пневматичних навантажень в режимах, наближених до натурних, з метою визначення основних параметрів напружено-деформованого стану елементів конструкцій електронної апаратури.

Результати роботи впроваджені на державному підприємстві «Новатор» (м. Хмельницький), в науково-дослідному інституті радіолокаційних систем «Квант-радіолокація» (м. Київ), в Подільському експертно-технічному центрі Держнаглядохоронпраці (м. Хмельницький), в ТзОВ «Альпмонтаж» (м. Хмельницький). Також наукові положення дисертації впроваджені у навчальний процес Хмельницького національного університету.

Повнота викладу результатів в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.

За результатами досліджень опубліковано 55 наукових праць, у тому числі: 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.

Кількість публікацій, їх повнота та обсяг у достатній мірі відображають основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи, а також осо-

бистий внесок дисертанта і відповідають вимогам, що висуваються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Обґрунтованість та вірогідність результатів дисертаційної роботи.

Обґрунтованість наведених в дисертації наукових положень та висновків базується на використанні фундаментальних законів механіки і математики. Методи аналітичної оцінки напружено-деформованого стану і динамічних процесів для конструкцій друкованих плат розроблені із застосуванням достатньо апробованих методів теоретичної механіки, опору матеріалів, будівельної механіки, теорії пружності та теорії механічних коливань. Опис і дослідження вільних та вимушених кінематично збуджуваних коливань друкованих плат здійснено із застосуванням методів динаміки дискретних і континуально-дискретних пружних систем. Метод ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів елементів конструкцій електронної апаратури розроблено шляхом розв'язання обернених задач міцності. Імітаційне моделювання та симуляція, як перевірка математичного моделювання, виконані за допомогою таких програмних продуктів як MathCad, Matlab та Solidworks.

Достовірність запропонованих положень забезпечується також достатньо хорошою збіжністю теоретичних висновків із результатами експериментальних досліджень, які були проведені із застосуванням методу електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії, високошвидкісної відео-зйомки. Застосовані методи були адаптовані для дослідження параметрів напружено-деформованого стану малогабаритних елементів конструкцій електронної апаратури.

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

Структура, оцінка мови, стилю та оформлення дисертації.

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

У *вступі* обґрунтовано актуальність роботи, поставлені мета та завдання досліджень, визначені наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведені дані щодо апробації і впровадження.

Перший розділ присвячено постановці проблеми і завдань досліджень на основі аналізу сучасного стану динаміки і міцності деталей, вузлів, блоків та систем електронної апаратури з урахуванням технологічних і експлуатаційних навантажень. Звертає на себе увагу глибока ґрунтовність аналітичного аналізу стану справ за темою дисертації

Другий розділ присвячено розвитку теорії вібраційного захисту електронної апаратури на основі комплексного підходу до математичного моделювання динамічних процесів у несучих конструкціях та напружено-деформованого стану їхніх елементів. Як результат розв'язано такі завдання дисертаційного дослідження:

- здійснено комплексне математичне моделювання коливальних явищ із застосуванням дискретних та континуально-дискретних розрахункових моделей друкованої плати;
- досліджено вільні і вимушені коливання механічної системи друкованої плати методом імітаційного моделювання;
- обґрунтовано ефективність застосування демпферу сухого тертя та його пружно-дисипативних характеристик для зменшення основних параметрів напружено-деформованого стану друкованих плат в умовах резонансного збудження;
- здійснено аналіз напружено-деформованого стану елементів конструкції друкованої плати під дією статичного навантаження та елементів конструкції із загальною герметизацією під дією температурних навантажень.

Третій розділ присвячено створенню випробувального та вимірювального комплексу, в якому використовуються методи електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відеозйомки. Комплекс використовується для визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій електронної апаратури і відтворює дію механічних, температурних та пневматичних навантажень в режимах, наближених до натурних. Вимірювальні прилади та випробувальне обладнання комплексу пройшли модифікацію і адаптацію відповідно до малогабаритних об'єктів дослідження.

Четвертий розділ присвячено експериментальній перевірці основних результатів теоретичних досліджень і обґрунтуванню методів зменшення напружень і деформацій та забезпечення міцності елементів конструкцій несучих систем електронної апаратури із урахуванням дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

У **п'ятому** розділі викладені практичні рекомендації щодо забезпечення міцності несучих систем електронної апаратури. До практичних рекомендацій відносяться інженерні розрахункові методи оцінки динаміки та міцності несучих систем електронної апаратури, конструктивні і технологічні методи забезпечення міцності деталей і вузлів електронної апаратури та методи ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій електронної апаратури з урахуванням дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

На підставі отриманих результатів дисертаційної роботи сформульовано відповідні **висновки** та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення.

У **додатках** наведені методики налаштування використаного обладнання, результати вимірювань напружено-деформованого стану та динамічних процесів, матеріали щодо впровадження результатів роботи, лістинги комп'ютерних програм та результати моделювання.

Текст дисертації подано українською мовою. Оформлення дисертації відповідає вимогам до оформлення дисертації (затв. Наказом Міністерства освіти і науки України 12.01.2017 №40 за змінами внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки №759 від 31.05.2019) та вимогами державного стандарту ДСТУ 8302:2015 «Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання». Дисертація включає перелік умовних

позначень, що дійсно необхідно у зв'язку з новизною термінології для спеціальності будівельна механіка, та написана хорошою технічною мовою. Стил дисертації характеризується стислістю і логічністю викладення суті проблеми, та супроводжується поясненнями запропонованих розв'язків.

За структурою, мовою і стилем викладення дисертаційна робота відповідає вимогам МОН України, які ставляться до докторських дисертацій.

Зміст реферату, який складається з 48 сторінок (51 рисунок, 6 таблиць), є ідентичним основним положенням дисертації. Реферат за своїм змістом відповідає основним положенням і висновкам, які наведені в дисертаційній роботі, та відображає її структуру. Реферат написаний за встановленою формою, у повній мірі розкриває сутність виконаної роботи, відображає загальний зміст та є ідентичним основним положенням дисертації

Як зауваження, слід зазначити:

1) В дисертації не подана оцінка похибки методу визначення фізико-механічних характеристик матеріалу плат, що ґрунтується на оберненому підході, в якому експериментально (на моделях) визначаються (з певною похибкою) окремі параметри НДС, а далі застосовуються наближені інженерні залежності для їх розрахунку. Це може привести до накопичення певної помилки. Слід зазначити, що результати ряду наукових публікацій для анізотропних (ортотропних) середовищ вказують на можливість суттєвого впливу відхилень (різного походження) вхідних значень фізико-механічних характеристик матеріалу від своїх номінальних значень на результат розрахунку.

2) Прикрасою дисертації була б наявність в ній більш широкого спектру розрахункових схем, як класифікатора проблемних задач розрахунку міцності елементів електронної апаратури.

Слід зазначити, що елементи електронної апаратури мають значну кількість причин (як доповнення до досліджених в дисертації) бути зруйнованими в умовах екстремальних навантажень, а інженерні (наближені) розрахунки їх міцності приводять до необхідності завищення коефіцієнтів запасу міцності, збільшення маси та габаритів і, як наслідок, до небажаного зниження їх конкурентоздатності.

Серед таких актуальних задач слід назвати проблеми розшарування друкованих плат; появи і розвитку тріщин, зокрема, для п'єзоелектриків; електропровідних тріщин, міцності багаточарових елементів з різних матеріалів, зокрема, за наявності паяльних та зварювальних з'єднань, концентрації напружень в місцях закріплення більш масивних елементів при динамічному та повторно-змінному навантаженні, закріплення кінців електропровідних елементів в платі (як анкерів в геомеханіці чи в будівництві) та ін.

Наявність такої збірки проблемних задач, в яких відчувається висока компетентність здобувача, була б надзвичайно важливою і корисною для розвитку фундаментальних та прикладних напрямків механіки деформівного твердого тіла, а, з іншого боку, напрацювання в зазначених суміжних областях могли б бути успішно застосовані і для вирішенні проблемних задач міцності еле-

ктронної апаратури.

3) В оцінці новизни результатів дисертаційної роботи слід було б все ж такі розрізнити «вперше...» і «нові...». «Вперше» – це більш відповідально....

4) Текст дисертації містить недоречності:

- замість «несівні», що в принципі термін зрозумілий, але правильно «несуча здатність», «несучі конструкції» і т. п.;
- «Заснована на...» – краще «що ґрунтується на...» (стор. 36, 57 та ін.);
- «деформуємих...» – доречно «деформівних...» (стор. 71);
- «повинна володіти...» – доцільно «повинна мати ...» (стор. 48 та ін..)

Вказані недоліки не впливають на актуальність, наукове та практичне значення результатів і не змінюють позитивної оцінки дисертаційної роботи у цілому.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Ковтуна Ігоря Івановича «Розроблення науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури» є завершеною науковою працею, що в сукупності вирішує актуальну науково-технічну проблему в галузі динаміки та міцності машин щодо зменшення напружень і деформацій та забезпечення конструкційної міцності несучих систем електронної апаратури на стадіях проектування, виробництва і експлуатації. Реферат відповідає змісту дисертації.

Тема, зміст та результати дисертації повністю відповідають формулі та паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин та вимогам пунктів 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук ...», затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р., а її автор Ковтун Ігор Іванович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент:

Заслужений діяч науки і техніки України.

професор кафедри теоретичної

та комп'ютерної механіки

Дніпровського національного університету

імені Олеся Гончара МОН України,

доктор технічних наук, професор



А. П. Дзюба

Підпис професора Дзюби А. П. засвідчую

Вчений секретар Вченої ради

Дніпровського національного

університету імені Олеся Гончара



Т. В. Ходанен