

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

КОВТУН Ігор Іванович



УДК 531.3:62-192:621.389(043.5)

**РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВО-ПРИКЛАДНИХ ЗАСАД ДИНАМІКИ
ТА МІЦНОСТІ НЕСІВНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ**

спеціальність 05.02.09 — динаміка та міцність машин

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Хмельницькому національному університеті

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
ДЗЮБА Анатолій Петрович,
Дніпровський національний
університет імені Олеся Гончара,
професор кафедри теоретичної та
комп'ютерної механіки;

доктор технічних наук, професор
ФІЛІМОНІХІН Геннадій Борисович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
завідувач кафедри деталей машин
та прикладної механіки;

доктор технічних наук, професор
ХАРЧЕНКО Євген Валентинович,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
завідувач кафедри опору матеріалів та
будівельної механіки.

Захист відбудеться 26 березня 2025 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, аудиторія 226.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

*Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 35.052.06*

Ю. П. Шоловій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розроблення науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури, спрямовано на вирішення актуальної проблеми – зменшення напружень і деформацій та забезпечення міцності елементів конструкцій зазначених систем, за рахунок раціонального добору їх геометричних, інерційних та пружно-дисипативних параметрів на стадіях проєктування, виробництва і експлуатації. Проблема дослідження динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури стала особливо актуальною в умовах сучасних тенденцій до зменшення ваги та збільшення щільності монтажу електронної апаратури, що призвело до суттєвого зменшення характеристик міцності та жорсткості створюваних конструкцій. Внаслідок дії технологічних і експлуатаційних навантажень в несівних системах електронної апаратури, які призначені для забезпечення електричних контактів, механічної підтримки та захисту електронних компонентів і вузлів від зовнішніх впливів, виникають статичні та динамічні напруження і деформації. Виникнення та передача деформацій на різних рівнях конструктивної складності відбувається через механічний зв'язок і взаємодію елементів конструкцій, що, створює механічне напруження і нерідко виявляється причиною руйнування електричних кіл та втрати працездатності вузлів, блоків та систем електронної апаратури.

Аналіз робіт Зінковського Ю.Ф., Уварова Б.М., Штейнберга Д.С., Терещука Р.М., Бегер Е., Перри К., Агліетті Г.С., Ульріха Р.К., Колінза Д.А., Робертсона С.Т., Емі Р.А., Матвійківа М. Д., Ройзмана В. П. і др. дозволяє зробити висновок про те, що на сьогодні застосування розрахунково-експериментальних методів оцінки напружено-деформованого стану і динамічних процесів в деталях, вузлах та блоках електронної апаратури суттєво ускладнюється через такі причини як 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 апаратури, на противагу багатьом іншим галузям техніки. Крім того, складність натурних конструкцій, які представляють собою багатозв'язкові механічні системи і спроби розрахунку їх напружено-деформованого стану часто приводять до неточності рішень і компрометують найсучасніші методики розрахунку особливо в умовах нестабільності фізико-механічних характеристик використовуваних матеріалів і технології виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати роботи є складовою частиною досліджень, які виконувались в Хмельницькому національному університеті згідно наступних держбюджетних тем: 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 рр., 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 výroбах 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 výroбах військової і невійськової техніки» (2020-2021 рр., номер держреєстрації 0120U102069) автор – відповідальний виконавець.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи полягає у розробленні науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури, спрямованих на зменшення статичних і динамічних напружень і деформацій та забезпечення працездатності елементів конструкцій на стадіях проектування, виробництва і експлуатації.

Для досягнення сформульованої мети були поставлені і розв'язані наступні основні завдання:

- провести комплексне математичне моделювання динамічних процесів у механічній системі друкованої плати, яке включає розрахунок власних частот і форм коливань плати, а також визначення амплітудно-частотних характеристик кінематично-збуджуваних коливань системи;
- провести порівняльний аналіз результатів досліджень коливальних явищ із застосуванням дискретних та континуально-дискретних розрахункових моделей

друкованої плати; побудувати наближену математичну модель вільних і вимушених коливань друкованої плати з масивним електронним компонентом і обґрунтувати доцільність її практичного застосування;

- провести аналіз внутрішніх зусиль і напружень в елементах конструкції друкованої плати за дії динамічних навантажень; дослідити вільні і вимушені коливання механічної системи друкованої плати методом імітаційного моделювання;

- здійснити оцінку ефективності застосування демпфера сухого тертя та обґрунтувати раціональний добір його пружно-дисипативних характеристик для покращення напружено-деформованого стану друкованих плат в умовах резонансного збудження;

- провести аналіз внутрішніх зусиль і напружень в елементах конструкції друкованої плати під час її випробувань в умовах статичного навантаження та в елементах конструкції із загальною герметизацією в умовах дії температурних навантажень;

- модифікувати методи експериментального визначення напружень і деформацій з урахуванням особливостей дослідження параметрів напружено-деформованого стану малогабаритних елементів конструкцій електронної апаратури;

- експериментально перевірити основні результати теоретичних досліджень та обґрунтувати методи зменшення напружень і деформацій для забезпечення міцності елементів несівних конструкцій електронної апаратури в умовах дії технологічних та експлуатаційних навантажень;

- розробити способи ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій друкованих плат та електронних модулів із загальною герметизацією компаундом в умовах, наближених до експлуатаційних;

- обґрунтувати практичні рекомендації, засновані на розробленні інженерних методів оцінки та конструктивних і технологічних методів забезпечення міцності несівних систем електронної апаратури в умовах дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

Об'єкт дослідження: динамічні процеси у несівних системах електронної апаратури і напружено-деформований стан її компонентів та вузлів.

Предмет дослідження: моделі і методи динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури з урахуванням дії технологічних і експлуатаційних навантажень.

Методи дослідження. Обґрунтованість та вірогідність наукових результатів забезпечені використанням фундаментальних законів механіки, математики та математичної фізики.

Дослідження вільних і кінематично збуджуваних вимушених коливань друкованої плати (ДП) проведено із застосуванням методів динаміки дискретних і континуально-дискретних пружних систем. Розроблення методів аналітичної оцінки напружено-деформованого стану і динамічних процесів виконано для конструкцій друкованих плат, що перебувають під дією статичних і динамічних навантажень із застосуванням методів теоретичної механіки, опору матеріалів, будівельної механіки, теорії пружності та теорії

механічних коливань; розрахунки кріпильних вузлів друкованих плат на міцність і деформативність проведено методом сил, дослідження міцності елементів електронних компонентів (ЕК), що мають форму тіл обертання, використовуються в конструкціях із загальною герметизацією та перебувають під дією термоударів, – із застосуванням теорії Ламе-Гадоліна про взаємодію складених товстостінних циліндрів; дослідження динамічної поведінки конструкцій друкованих плат в умовах кінематичного збудження – із застосуванням теорії обернених задач динаміки, методу Мора тощо. Розроблення методу ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів елементів несівних конструкцій електронної апаратури в умовах, наближених до експлуатаційних, здійснено шляхом розв’язання обернених задач міцності. Перевіркові розрахунки та симуляція напружено-деформованого стану і динамічних процесів друкованих плат виконані методом скінченних елементів в системі автоматизованого проєктування Solidworks із застосуванням системи аналізу конструкцій Solidworks Simulation, та методами числового аналізу в системах автоматизації математичних розрахунків MathCad та Matlab із застосуванням модуля візуального програмування Simscape Multibody.

Для експериментального визначення напружень і деформацій в несівних конструкціях електронної апаратури різного рівня конструктивної складності із врахуванням особливостей дослідження параметрів напружено-деформованого стану малогабаритних елементів конструкцій були модифіковані і адаптовані такі методи експериментального дослідження як метод електротензометрії, метод акустичної емісії, методи віброметрії: метод виявлення резонансних частот; метод коливальної частоти та метод фіксованих частот, метод високошвидкісної відео-зйомки та метод Гука-Хладні. Випробування об’єктів дослідження здійснювалось під дією механічного, температурного та пневматичного навантажень в статичному, циклічному та динамічному режимах.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури, спрямованих на зменшення напружень і деформацій в елементах конструкцій за рахунок раціонального добору їх геометричних, інерційних та пружно-дисипативних параметрів систем. Зокрема:

уперше:

- із застосуванням методу скінченних елементів для моделювання напружено-деформованого стану і коливальних процесів у друкованій платі теоретично обґрунтовано розрахункову модель друкованої плати у вигляді багатопрогової балки із зосередженими та розподіленими масами, шарнірно-закріпленої на кінцях, що дає можливість значно спростити динамічний аналіз механічної системи;

- запропоновано низку дискретних і континуально-дискретних математичних моделей вільних і кінематично-збуджуваних коливань друкованої плати, із застосуванням яких проілюстровано істотний вплив вібрацій на умови експлуатації електронної апаратури;

– теоретично обґрунтовано можливість виникнення резонансних коливань друкованої плати під час експлуатації не лише на нижчій, а й на більш високих власних частотах. Усунення цих небезпечних явищ може бути здійснено лише на основі детального аналізу динамічних процесів у механічній системі плати;

– встановлено закономірності впливу геометричних та фізико-механічних параметрів друкованої плати, а також характеристик динамічних процесів, що виникають під час експлуатації блоків електронної апаратури, на максимальні напруження і деформації елементів несівної системи, що дає можливість здійснювати раціональний добір параметрів конструкцій для забезпечення міцності і необхідної жорсткості друкованої плати;

– теоретично обґрунтовано ефективність зменшення динамічних навантажень, напружень і деформацій друкованої плати за рахунок оснащення несівної системи демпфером сухого тертя та раціонального добору його пружно-дисипативних характеристик. Розроблена математична модель дає можливість обґрунтовувати значення коефіцієнту жорсткості та проводити інженерний розрахунок конструктивних параметрів демпферу сухого тертя у вигляді пів-еліптичної балки прямокутного поперечного перерізу;

удосконалено:

– технологію наскрізного монтажу електронних компонентів із збільшенням довжини монтажних виводів на друкованій платі, що забезпечує зменшення коефіцієнта передачі деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів, на відміну від технології низького наскрізного, або поверхневого монтажу. Ефективність технології обґрунтовано математичним моделюванням напружено-деформованого стану конструкції друкованої плати у вигляді статично невизначуваної плоскої стрижневої системи в умовах дії експлуатаційного навантаження;

– технологію визначення допустимого короблення друкованої плати, яка полягає у забезпеченні допустимого параметру напружено-деформованого стану паяних з'єднань, що відповідає відношенню границі текучості паяного з'єднання до коефіцієнту запасу короблення, на відміну від стандартизованого показника якості друкованої плати – площинності, для оцінки якого застосовують характеристики згинання та скручування основи друкованої плати;

– методологію аналізу напружено-деформованого стану елементів герметизованого електронного модуля у вигляді складеного товстостінного циліндра з урахуванням особливостей взаємодії керамічного сердечника з композитним захисним шаром за перепаду температур фізичних тіл. Встановлено, що в матеріалі електронного компоненту і в оточуючому шарі герметика радіальні напруження досягають максимальних значень на межі їх контакту, а колові – на внутрішній поверхні кожного циліндру за відсутності перепаду температур;

набули подальшого розвитку:

– теорія вібраційного захисту електронної апаратури за рахунок застосування комплексного підходу до математичного моделювання вільних і кінематично-збуджуваних коливань друкованих плат;

– акустико-емісійна методика неруйнівної діагностики міцності нероз’ємних елементів конструкцій електронної апаратури, зокрема їх паяних та зварних з’єднань, відмінність якої від існуючих полягає у відборі таких інформативних параметрів як амплітуда та сумарний рахунок сигналів акустичної емісії, обмеження яких щодо порогового рівня в умовах циклічного навантаження свідчить про придатність об’єкту дослідження до експлуатації.

Практичне значення одержаних в дисертації результатів. В дисертаційній роботі подано розроблення науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури, спрямованих на зменшення напружень і деформацій та забезпечення міцності елементів конструкцій на стадіях проектування, виробництва і експлуатації. Отримані результати мають суттєве значення для електронної промисловості. Практичні рекомендації містять: інженерні розрахункові методи оцінки динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури; конструктивні та технологічні методи забезпечення міцності деталей та вузлів електронної апаратури та методи ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій електронної апаратури з урахуванням дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

Запропоновано низку дискретних і континуально-дискретних математичних моделей, що являють собою методику розрахунку частот і форм вільних та амплітуд вимушених коливань друкованої плати. Методика ґрунтується на застосуванні методу початкових параметрів, що сприяє систематизації обчислювальних процесів та полегшенню числової реалізації математичних моделей за допомогою комп’ютерів.

Розроблено математичну модель для інженерного розрахунку максимальних напружень і переміщень в друкованих платах. Математична модель може бути використана в процесі розроблення та обґрунтування параметрів конструкцій друкованих плат.

Оснащення несівної системи друкованої плати демпфером сухого тертя дозволило зменшити динамічні навантаження, напруження і деформації плати за рахунок раціонального добору пружно-дисипативних характеристик демпферу. Розроблена математична модель дає можливість визначення коефіцієнту жорсткості демпферу сухого тертя, виконаного у вигляді пів-еліптичної балки прямокутного поперечного перерізу.

Удосконалено технологію наскрізного монтажу електронних компонентів із зазором в 2-3 мм, за рахунок збільшення довжини монтажних виводів, на друкованій платі забезпечує трикратне зменшення коефіцієнта передачі деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів та підвищує стійкість елементів конструкції друкованої плати до технологічних та експлуатаційних навантажень. Удосконалена технологія визначення допустимого короблення друкованих плат забезпечує допустиму величину напружено-деформованого стану паяних з’єднань друкованих плат.

Запропоновано технологічні методи захисту електронних компонентів, герметизованих компаундом, від дії температурних напружень за рахунок створення додаткових пружно-дисипативних зв’язків між електронними

компонентами та герметиком. Максимальні значення коефіцієнту демпфування, досягнуті застосуванням поліетиленових кембриків, становлять 3,66, а застосуванням поліхлорвінілових термозбіжних трубок – 3,42.

Розроблено акустико-емісійну методику неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної апаратури, зокрема їх паяних та зварних з'єднань, яка дозволяє визначати придатність несівних конструкцій електронної апаратури до експлуатації під час циклічного випробування за пульсуючим циклом механічного та пневматичного навантаження.

Запропоновано розрахунково-експериментальний метод пробних параметрів, який дозволяє здійснювати ідентифікацію фізико-механічних характеристик друкованих плат та герметизованих модулів електронної апаратури. Ідентифікація здійснюється в режимах, які відтворюють складні, наближені до натурних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження.

Створено випробувально-вимірювальний комплекс призначений для визначення деформацій малогабаритних елементів конструкцій та компонентів електронної апаратури під дією статичних, циклічних та динамічних механічних, температурних та пневматичних навантажень, які відтворюють складні, наближені до натурних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження, із реалізацією методів електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відеозйомки.

Результати роботи впроваджені на наступних підприємствах: Державному підприємстві «Новатор», м. Хмельницький – застосування демпферу 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); науково-дослідному інституті радіолокаційних систем «Квант-радіолокація», м. Київ – застосування інженерних методів оцінки та забезпечення міцності друкованих плат в умовах вібраційних навантажень (акт від 20.12.2016); Подільському експертно-технічному центрі Держнаглядохоронпраці, м. Хмельницький – застосування методики акустико-емісійної неруйнівної технічної діагностики та методу електротензометрії посудин, що працюють під тиском (акт від 21.12.2001); ТзОВ «Альпмонтаж», 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 та температури в статичному та циклічному режимі навантажень (акти від 06.09.2019 та від 08.12.2022).

Отримані результати роботи, методики і моделі використовуються в освітньому процесі Хмельницького національного університету при викладанні дисциплін: «Конструювання та технологія виробництва електронної апаратури», «Електротехнічні матеріали», «Математичне моделювання систем і

процесів» та під час виконання здобувачами вищої освіти кваліфікаційних робіт.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі автором обґрунтовано загальну концепцію роботи, сформульовано мету і завдання досліджень та визначено підходи їх реалізації. Основні наукові положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. З робіт, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані здобувачем особисто: [1, 10, 21, 25, 30, 37] – розвинуто теорію вібраційного захисту електронної апаратури за рахунок застосування комплексного підходу до математичного моделювання вільних і кінематично-збуджуваних коливань друкованих плат; [1, 10, 21, 23, 29, 32, 37, 47] – запропоновані методи дослідження процесу передачі динамічних деформацій у структурно-складних конструкціях електронної техніки; [35–37, 49, 54] – розроблено математичну модель оцінки динамічного напружено-деформованого стану друкованих плат під дією інерційного гармонічного навантаження; [11, 36, 37] – отримано функціональні залежності динамічних напружень та переміщень від геометричних параметрів друкованих плат та обґрунтовано незалежність максимальних динамічних напружень друкованих плат від місця розташування зосередженої маси; [8, 11, 36, 37] – запропоновано метод визначення максимальних динамічних напружень конструкції друкованих плат представлених еквівалентною коливною системою із зосередженою масою; [9, 10, 11, 34, 37] – визначено вплив пружно-дисипативних характеристик на різних рівнях конструктивної складності несівних конструкцій електронної апаратури на вібраційну збудженість друкованих плат та встановлено, що конструкційне демпфування сухого тертя перевершує демпфування внутрішнього в'язкого тертя в матеріалі деталей; [9, 12, 26, 37] – теоретично та експериментально обґрунтовано ефективність застосування демпфера сухого тертя та визначено його конструктивні параметри; [1, 5, 7, 17, 18, 43, 48, 49] – визначено вплив конструктивно-технологічного виконання на передачу деформацій в конструкціях друкованих плат; [1, 5, 7, 18, 38, 42] – обґрунтовано технологічні способи зменшення передачі деформацій від друкованої плати до електронних компонентів та удосконалено методику визначення допустимого короблення друкованих плат; [4, 6, 13–16, 22, 31, 33, 38–40, 53] – подано розрахункові та експериментальні методи оцінки та забезпечення міцності герметизованих електронних компонентів під дією експлуатаційних навантажень; [13, 14, 39, 40] – отримано вираз для визначення контактного тиску на межі поділу матеріалів електронних компонентів, що мають форму тіл обертання, та оточуючого шару герметика, в умовах експлуатаційного напружено-деформованого стану; [4, 15, 16, 22, 30, 33, 38] – запропоновано створення пружно-дисипативного зв'язку між електронним компонентом та герметиком та оцінено його ефективність для захисту електронних компонентів герметизованих компаундом; [1, 3, 19, 27, 28, 41, 44–46, 50–52, 55] – розвинуто методику акустико-емісійного діагностування технічного стану дефектів

паяних з'єднань друкованих плат та [1, 20, 31, 44, 55] – герметичності корпусів модулів надвисоких частот.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, викладені в дисертації, доповідались і обговорювались на міжнародних, всеукраїнських конференціях, симпозиумах, семінарах: XI World Congress in Mechanism and Machine Science (Tianjin, China, 2004); The Ukraine IEEE international Conferences on Electrical and Computer Engineering (Kiev, 2017, Lviv, 2019); The IEEE International Conferences on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (Odessa, 2017, 2018, 2019, Kyiv, 2021); V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки (Київ, 2017); The 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (Lviv – Slavske, 2018); The 38th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology (Kiev, 2018); The International Conferences Diagnostics of Machines and Vehicles : MATEC Web of Conferences, (Bydgoszcz, Poland, 2018, 2019, Bydgoszcz-Poledno, Poland, 2021); The First International Conference on Advances in Smart Sensor, Signal Processing and Communication Technology (Goa, India, 2021); The 25th International scientific conference «Mechanika 2021» (Kaunas, Lithuania, 2021); MATEC Web of Conferences «Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment» (Tomsk, Russia, 2016); 33 Міжнародній науковій конференції «Математические методы в технике и технологиях» (Казань, Росія, 2020); XVII міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (м. Одеса, 2017); III міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (м. Одеса, 2002); VI міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення якості, надійності та довговічності технічних систем і технологічних процесів» (м. Хургада, Єгипет, 2007); Міжнародних наукових конференціях «Наука і освіта» (м. Коломбо, Шрі-Ланка, 2010, Дубай, ОАЕ, 2011, Рим, Італія, 2017, Осло, Норвегія, 2018); Міжнародних наукових конференціях «Сучасні досягнення в науці і освіті» (Єрусалим, Ізраїль, 2016, Нетанія, Ізраїль, 2018); науково-технічних конференціях викладачів Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, 1999–2021).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 55 наукових праць, у тому числі: 2 монографії; 1 розділ монографії, що 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 та Scopus; 1 патент України на корисну модель; 11 матеріалів доповідей на міжнародних конференціях у виданнях, що реферуються науково-метричними базами даних Web of Science, Scopus; 12 праць апробаційного характеру; 6 праць, які додатково відображають наукові результати докторської дисертації.

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

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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 та завдань досліджень на основі аналізу результатів наукових досліджень динаміки та міцності деталей, вузлів, блоків та систем електронної апаратури (ЕА) з урахуванням технологічних і експлуатаційних навантажень.

Аналіз робіт Зінковського Ю.Ф., Уварова Б.М., Штейнберга Д.С., Терещука Р.М., Бегер Е., Перри К., Агліетті Г.С., Ульріха Р.К., Колінза Д.А., Робертсона С.Т., Емі Р.А., Матвійківа М. Д., Ройзмана В. П. і др. дозволяє зробити висновок про те, що на сьогодні застосування розрахунково-експериментальних методів оцінки напружено-деформованого стану і динамічних процесів в деталях, вузлах та блоках електронної апаратури суттєво ускладнюється через такі причини як відсутність загальноприйнятої термінології, методик оцінки міцності та норм міцності, за якими повинно вестись проектування, розрахунки, випробування і впровадження у серійне виробництво та експлуатацію виробів електронної апаратури, на противагу багатьом іншим галузям техніки. Крім того, складність натурних конструкцій, які представляють собою багатозв'язкові механічні системи і спроби розрахунку їх напружено-деформованого стану часто приводять до неточності рішень і компрометують найсучасніші методики розрахунку особливо в умовах нестабільності фізико-механічних характеристик використовуваних матеріалів і технології виробництва.

У розділі здійснено огляд, аналіз та обґрунтування розрахунково-експериментальних методів дослідження динамічних процесів у несівних системах електронної апаратури і напружено-деформованого стану її компонентів та вузлів на стадіях проектування, виробництва і експлуатації.

Другий розділ присвячено розвитку теорії вібраційного захисту електронної апаратури на основі комплексного підходу до математичного моделювання динамічних процесів та напружено-деформованого стану у несівних конструкціях електронної апаратури.

Модальний аналіз коливань механічної системи друкованої плати був виконаний методом скінченних елементів в системі автоматизованого проектування Solidworks із застосуванням системи аналізу конструкцій Solidworks Simulation. Для прикладу на рис. 1 подано форми коливань для двох із досліджених варіантів коливних систем. Порівняльний аналіз значень масової участі систем в коливальному процесі показав, що найбільше значення фактора участі ефективної маси (effective mass participation factor (EMPF)), яке сягало значень від 53 % до 92 %, спостерігається на першій резонансній частоті і

відповідає максимальній амплітуді переміщення плати відносно вертикальної осі. Якщо розглядати вертикальні переміщення друкованої плати, то власні форми коливань друкованої плати, представлені пластиною, подібні до власних форм коливання балки (рис. 3).

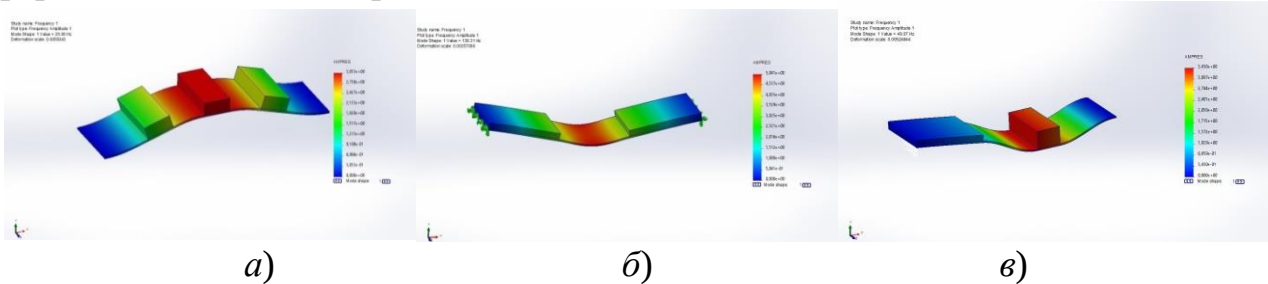


Рис. 1. Форми коливань ДП із зосередженими (а), розподіленими (б), або зосередженими і розподіленими (в) інерційними параметрами ЕК в різних комбінаціях

Застосуванням методу скінченних елементів для моделювання напружено-деформованого стану і коливальних процесів у друкованій платі теоретично обґрунтовано розрахункову модель друкованої плати у вигляді багатопрогонувої балки із зосередженими та розподіленими масами, шарнірно-закріпленої на кінцях, що дає можливість значно спростити динамічний аналіз механічної системи.

Для уточнення результатів модального аналізу друкованої плати розглянуто континуально-дискретну модель цієї системи. Розрахункову схему основи друкованої плати у вигляді прямокутної пластини з шарнірно закріпленими паралельними краями розглянуто як балку, встановлену на двох шарнірних опорах (рис. 2). Електронні компоненти, закріплені на основі, подано у вигляді точкових тіл масами $m_1, m_2, \dots, m_{n-1}$ і центральними моментами інерції $I_1, I_2, \dots, I_{n-1}$. Центри мас електронних компонентів ділять балку (модель основи) на відрізки (прогони) довжинами $l_1, l_2, \dots, l_n$, що є проєкціями відрізків, які сполучають центри мас електронних компонентів, на площину, перпендикулярну до шарнірно закріплених країв основи плати. Напружено-деформований стан прогонів балки розглянуто у координатних системах x_i, w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) з початками у центрах лівих крайніх поперечних перерізів відповідних прогонів, причому, $w_i(x_i, t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) – прогини балки.

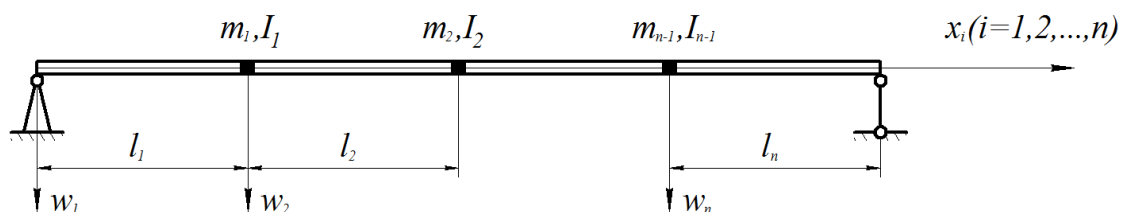


Рис. 2. Розрахункова схема аналізу вільних поперечних коливань друкованої плати як континуально-дискретної механічної системи

Рівняння поперечних коливань прогонів основи друкованої плати із застосуванням технічної теорії згину:

$$\frac{\partial^4 w_i}{\partial \xi_i^4} + \frac{\mu_i l_i^4}{EI_i} \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

де E – модуль пружності матеріалу основи друкованої плати; I_i , μ_i – осьовий момент інерції поперечного перерізу і погонна маса прогону плати; $\xi_i = x_i/l_i$ – відносна поздовжня координата прогону; t – час.

У випадку гармонічних коливань механічної системи розв'язки рівнянь (1) шукано у вигляді:

$$w_i(\xi, t) = W_i(\xi_i) \sin \omega t \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

де $W_i(\xi_i)$ – амплітудні функції прогинів прогонів основи плати.

Кут повороту поперечного перерізу і внутрішні силові чинники прогонів плати:

$$\varphi_i(\xi, t) = \Phi_i(\xi_i) \sin \omega t; \quad M_i(\xi, t) = M_i^*(\xi_i) \sin \omega t; \quad Q_i(\xi, t) = Q_i^*(\xi_i) \sin \omega t \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

де $\Phi_i(\xi_i)$, $M_i^*(\xi_i)$, $Q_i^*(\xi_i)$ – амплітудні функції обертального переміщення поперечного перерізу та відповідних внутрішніх силових чинників.

Частотне рівняння механічної системи має вигляд:

$$w_\varphi m_q - w_q m_\varphi = 0. \quad (4)$$

Величини w_φ , w_q , m_φ та m_q є функціями циклічної частоти коливань ω . Форми коливань прогонів основи друкованої плати знайдено за залежністю:

$$F_i(\xi_i) = B_{1i} S_i(\xi_i) B_{2i} F_i(0) \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Для того, щоб сформувати матрицю-колонку $F_1(0)$, яка містить початкові параметри першого прогону плати, визначено з точністю до сталого множника невідомі однорідної системи рівнянь:

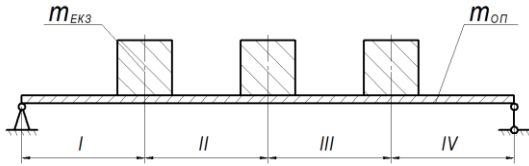
$$w_\varphi \Phi_1(0) + w_q Q_1^*(0) = 0; \quad m_\varphi \Phi_1(0) + m_q Q_1^*(0) = 0. \quad (6)$$

Початкові параметри інших прогонів знайдено за співвідношеннями:

$$F_i(0) = \prod_{j=i-1}^1 (R_j B_{1j} S_j(1) B_{2j}) F_1(0) \quad (i = 2, 3, \dots, n), \quad (7)$$

Розглянута методика розрахунку частот і форм вільних коливань друкованої плати ґрунтується на застосуванні методу початкових параметрів, що сприяє систематизації обчислювального процесу та полегшенню числової реалізації математичної моделі за допомогою комп'ютера. Для прикладу в табл. 1 подано форми коливань одного з досліджених варіантів коливної системи.

Таблиця 1 – Розраховані форми вільних коливань моделі друкованої плати

Схема, форми коливань	Параметри
	$m_{EK3} = 0,05$ кг. $J_{EK3} = 11,1 \times 10^{-9}$ м ⁴ . Ділянка I: $l^I = 0,045$ м; $b^I = 0,05$ м; $h^I = 0,0015$ м. $m_{OP}^I = 0,0125$ кг; Ділянка II: $l^{II} = 0,045$ м; $b^{II} = 0,05$ м; $h^{II} = 0,0015$ м.

Продовження табл. 1

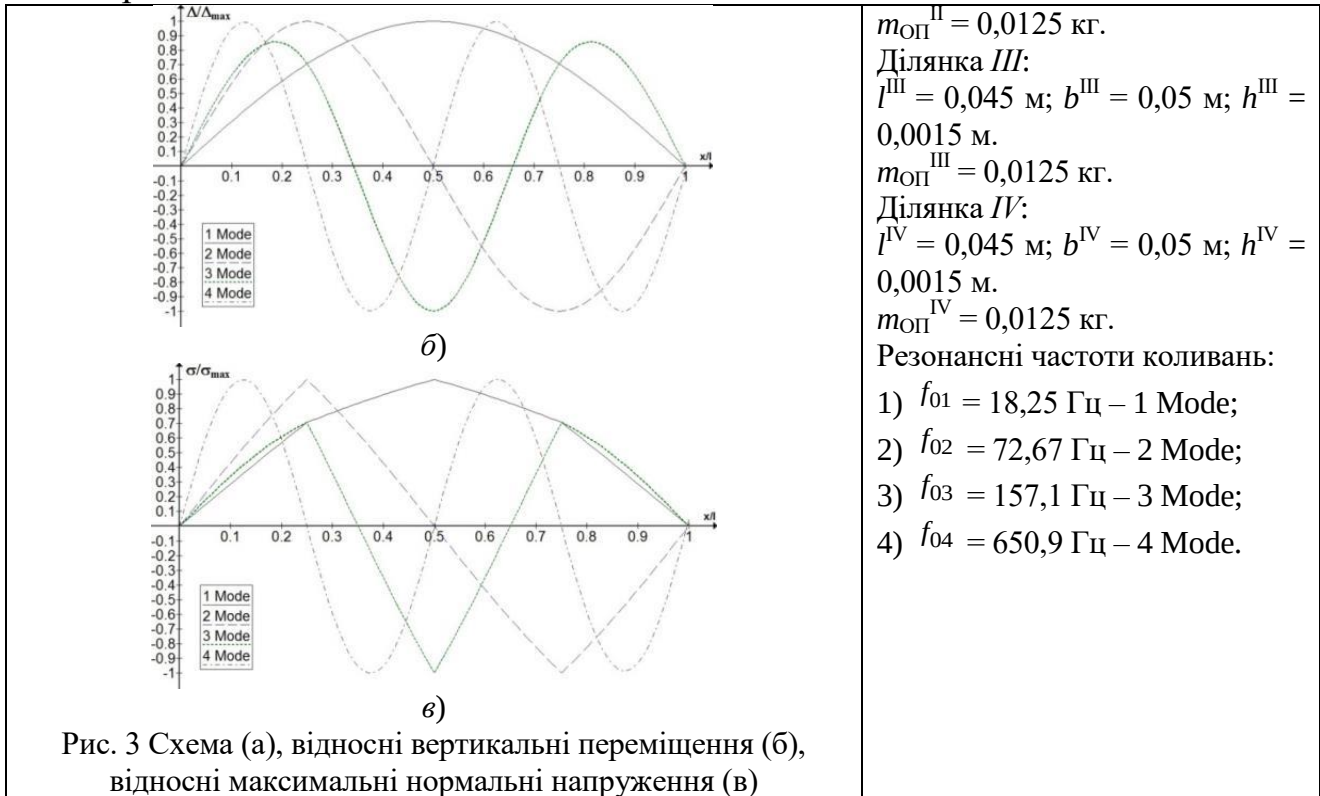


Рис. 3 Схема (а), відносні вертикальні переміщення (б), відносні максимальні нормальні напруження (в)

Континуально-дискретна математична модель може використовуватись для уточненого аналізу динамічних процесів та напружено-деформованого стану несівних конструкцій друкованих плат, тоді як для інженерних обрахунків можна запропонувати більш прості – дискретні математичні моделі коливної системи друкованої плати.

Вільні коливання друкованої плати із шарнірно закріпленими торцями розглянуті для розрахункової схеми, яка подана у вигляді балки, встановленої на шарнірних опорах (рис. 4), де l – довжина плати; $m_1, m_2, \dots, m_n$ – маси електронних компонентів, визначені з урахуванням зведених мас основи плати; $a_1, a_2, \dots, a_n$ – горизонтальні координати центрів мас електронних компонентів, що відраховуються від опори A у напрямі осі x ; $y_1, y_2, \dots, y_n$ – вертикальні переміщення центрів мас електронних компонентів; R_A, R_B – реакції опор плати.

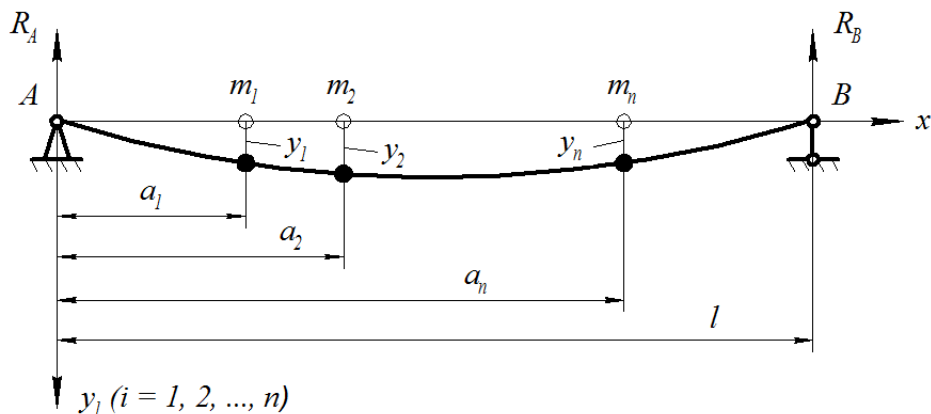


Рис. 4. Розрахункова схема друкованої плати для визначення власних частот і форм коливань

Рівняння динамічної рівноваги механічної системи плати в оберненій формі:

$$\begin{aligned} y_1 &= -m_1 \delta_{11} \ddot{y}_1 - m_2 \delta_{12} \ddot{y}_2 - \dots - m_n \delta_{1n} \ddot{y}_n; \\ y_2 &= -m_1 \delta_{21} \ddot{y}_1 - m_2 \delta_{22} \ddot{y}_2 - \dots - m_n \delta_{2n} \ddot{y}_n; \\ &\dots\dots\dots \\ y_n &= -m_1 \delta_{n1} \ddot{y}_1 - m_2 \delta_{n2} \ddot{y}_2 - \dots - m_n \delta_{nn} \ddot{y}_n. \end{aligned} \quad (8)$$

У випадку вільних коливань переміщення матеріальних тіл системи описуються гармонічними функціями:

$$y_i = Y_i \sin(\omega t) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (9)$$

де Y_i і ω – амплітуди й циклічна частота коливань.

Система рівнянь (8) зведена до матричної форми:

$$\Delta \cdot M - E \cdot \lambda = 0, \quad (10)$$

де Δ, M, E – квадратні матриці розмірності $n \times n$:

$$\Delta = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & \delta_{nn} \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{pmatrix}; E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Отже, обчислення n дійсних значень параметра λ зводиться до розв'язання задачі на власні числа для квадратної матриці, що дорівнює $\Delta \cdot M$. Далі циклічні ω_k і технічні f_k власні частоти за визначаються формулами:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{1}{\lambda_k}}; \quad f_k = \frac{\omega_k}{2\pi} \quad (k = 1, 2, \dots, n).$$

Вимушені кінематично збуджувані коливання друкованої плати розглянуті для розрахункової схеми на рис. 5, де повні вертикальні переміщення електронних компонентів плати y_{S1} , y_{S2} , ..., y_{Sn} складаються з переміщення основи y_0 і відносних переміщень компонентів y_1 , y_2 , ..., y_n щодо основи.

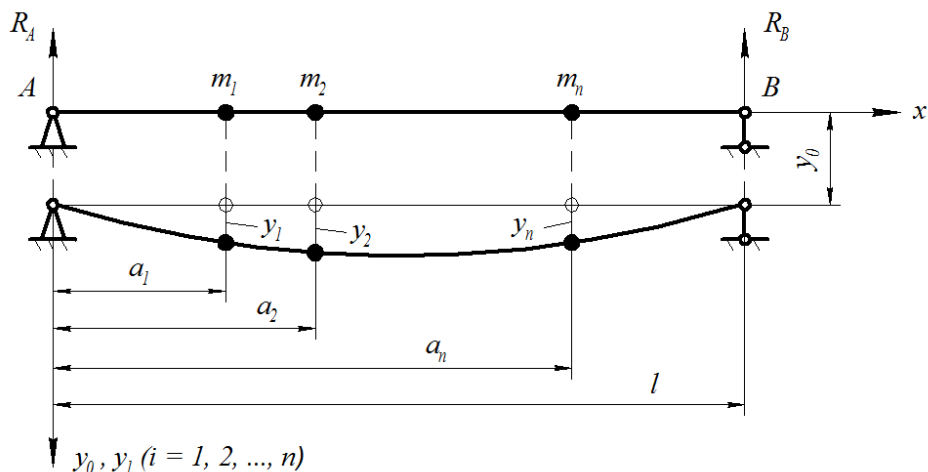


Рис. 5. Розрахункова схема друкованої плати для визначення амплітуд кінематично збуджуваних коливань

Рух основи описується гармонічною функцією:

$$y_0(t) = Y_0 \sin \omega t. \quad (12)$$

Тоді відносні переміщення електронних компонентів щодо основи плати:

$$y_i(t) = Y_i \sin \omega t \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (13)$$

а їх сумарні переміщення:

$$y_{sj}(t) = Y_{sj} \sin \omega t \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (14)$$

причому,

$$Y_{sj} = Y_0 + Y_j. \quad (15)$$

Рівняння динамічної рівноваги електронних компонентів:

[illegible]

Система рівнянь (16) у матричній формі:

$$(\Delta \cdot M - E \cdot \lambda)Y = \Delta \cdot m \cdot Y_0, \quad (17)$$

причому, квадратні матриці Δ , M , E зберігають форму (11), а матриця-стовпець t має вигляд:

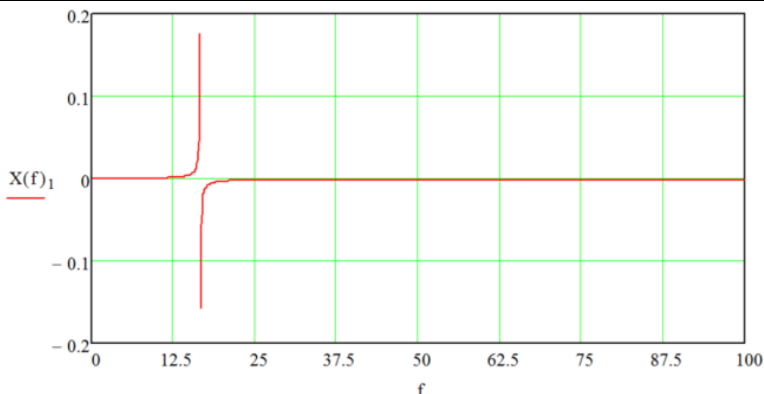
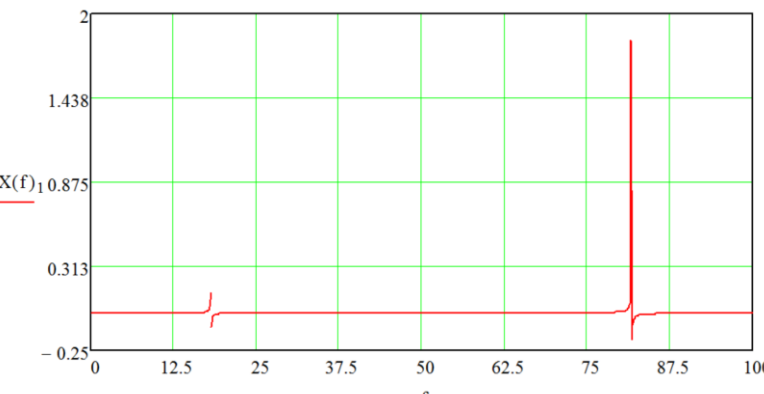
$$m = \text{col}(m_1, m_2, \dots, m_n). \quad (18)$$

Отже, знаходження амплітуд відносних коливань електронних компонентів друкованої плати щодо опор основи зводиться до числового розв'язання системи алгебричних рівнянь (16) за відомих геометричних параметрів $a_1, a_2, \dots, a_n$ та l ; коефіцієнтів впливу δ_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$); амплітуди Y_0 і частоти ω коливань основи.

Алгоритм визначення відносних коливань електронних компонентів друкованої плати щодо опор основи реалізовано в програмі Mathcad. В таблиці 2 наведено для прикладу розрахунок амплітудно-частотні характеристики коливань одного з досліджених варіантів коливної системи – двомасової коливної системи.

Слід відзначити відсутність резонансних коливань на другій критичній частоті в симетричних коливних системах із двома та трьома ступенями вільності. Тобто маси, розташовані на протилежних сторонах від осі симетрії, діють як динамічний згашувач коливань на другій критичній частоті коливань. Цей ефект може бути використаний в процесі компоновки масивних електронних компонентів на поверхні друкованих плат для зменшення резонансних режимів коливання.

Таблиця 2 – Амплітудно-частотні характеристики коливань моделі друкованої плати (рис. 5)

Параметри коливної системи	Амплітудно-частотні характеристики $X(f)_i$
$m_1 = m_2 = 0,1$ кг; $a_1 = 0,06$ м; $a_2 = 0,12$ м. Резонансні частоти коливань: $f_{01} = 16.647$ Гц; $f_{02} = 64.521$ Гц.	 Рис. 6. Двохмасова симетрична
$m_1 = m_2 = 0,1$ кг; $a_1 = 0,03$ м; $a_2 = 0,09$ м. Резонансні частоти коливань: $f_{01} = 18.141$ Гц; $f_{02} = 81.709$ Гц.	 Рис. 7. Двомасова асиметрична

У випадку коли конструкція ДП містить масивний електронний компонент, або групу компонентів, маса яких переважає масу основи плати, і таким чином створює нерівномірність навантаження коливної системи, коливання друкованої плати з шарнірно закріпленими торцями, можна розглядати за допомогою розрахункової схеми, яка подана у вигляді балки (рис. 5).

Зведену масу основи друкованої плати визначено із застосуванням методу початкових параметрів. Універсальне рівняння пружної лінії балки має вигляд:

$$EIy(x) = EIy(0) + EIy'(0)x - \frac{Pb}{l} \frac{x^3}{3!} + \frac{P(x-a)^3}{3!}. \quad (19)$$

Зведена маса буде розраховуватися за формулою:

$$m_{36} = \frac{\rho A \int_0^l [Y(x)]^2 dx}{[Y(x_{36})]^2}. \quad (20)$$

В коливній системі (рис. 8) інерційні властивості моделі вважаються зосередженими в масі $m = m_{ЕК} + m_{зв}$, де $m_{ЕК}$ – маса масивного електронного компонента; $m_{зв}$, – зведена маса основи друкованої плати, а пружні та дисипативні елементи приймаються без інерційними.

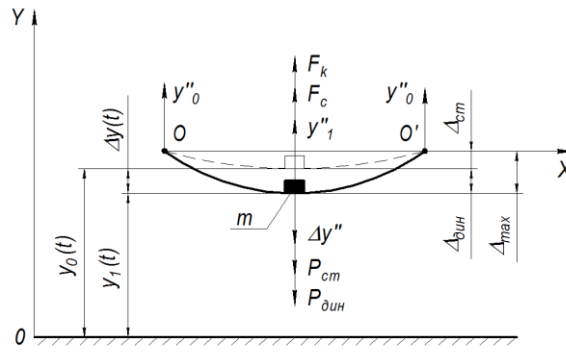


Рис. 8. Схема динамічного навантаження друкованої плати

Кінематичне збудження коливної системи відбувається за законом гармонічних коливань:

$$y_0(t) = Y_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (21)$$

де Y_0 — амплітуда; $\omega = 2\pi f$ — кутова частота, f — частота; t — час; φ — фаза коливань.

Відносно інерціальної системи відліку, наприклад нерухомої опори (підлоги) O , на якій стоїть сам вібростенд, коливання маси m відбувається із прискоренням y_1'' , яке виникає внаслідок кінематичного збудження від коливання кінців балки, до яких прикладене динамічне навантаження і які здійснюють рух із заданим прискоренням y_0'' . Рівняння руху маси m як матеріальної точки в інерціальній системі відліку:

$$m y_1'' = F_k + F_c, \quad (22)$$

де F_k — сила пружного опору; F_c — сила не пружного опору, яка представляє собою силу в'язкого тертя в матеріалі основи плати.

Рівняння руху в неінерціальній системі відліку, тобто відносно опор O та O' , отримує вигляд:

$$m \Delta y'' + F_k + F_c = m y_0'', \text{ або } \ddot{q} + q \omega_0^2 + 2n\dot{q} = Y_0 \omega^2 \sin(\omega t), \quad (23)$$

де $m \Delta y''$ та $m y_0''$ — відносна та переносна сили інерції відповідно; $q = \Delta y(t)$; $n = c/2m$ — коефіцієнт демпфірування; $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — власна кутова частота коливання маси m . Частинне рішення лінійного диференціального рівняння (23) описує вимушені коливання:

$$q^*(t) = \frac{Y_0 \omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2n\omega)^2}} \sin\left(\omega t - \arctg\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2n\omega}\right)\right), \quad (24)$$

або скорочено: $\Delta y(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$.

Як показано на (рис. 8) функція (24) описує прогин балки, який відбувається відносно положення статичної рівноваги коливної системи Δ_{ctm} . Тоді максимальний прогин балки $\Delta_{max} = A + \Delta_{ctm}$ відбувається під дією рівнодіючої сил динамічного навантаження $P_{дин} = Ak = A\omega_0^2 m$ та статичного навантаження $P_{ctm} = mg$ зосередженої маси:

$$P = mY_0\omega^2 \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4n^2\omega^2}{\omega_0^4}}} + mg, \text{ або } P = P_0k_a + P_{cm} \quad (25)$$

де $P_0 = mY_0\omega^2$ – амплітудне значення заданого динамічного навантаження, k_a – коефіцієнт зростання амплітуди коливань.

Максимальні нормальні напруження визначені за формулою згину балки:

$$\sigma_{\max} = Px \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{1}{W_{oc}}, \quad (26)$$

де $W_{oc} = bh^2/6$ – осьовий момент опору; x – лінійна координата розташування зосередженої маси, l – довжина друкованої плати.

Максимальні прогини визначені за методом Мора, без суттєвої втрати точності, можна розраховувати для центрального перерізу друкованої плати:

$$\Delta_{\max} = \frac{P(3xl^2 - 4x^3)}{48EJ}, \quad (27)$$

де E та J – модуль Юнга та осьовий момент інерції площі перерізу балки відповідно.

Амплітудно-частотні характеристики розраховані за (26, 27) показали наявність допустимого до- та зарезонансного діапазону частот вібрацій, хоча їх регламентація не завжди досяжна на практиці. Безперечно бажаною метою дослідження було забезпечення міцності плат навіть в умовах резонансного збудження без прив'язки до конкретного діапазону частот вібрацій. Очевидно, що міцність, жорсткість та вібраційні характеристики плат, зокрема їх резонансні частоти, залежать від багатьох факторів, серед яких найбільшу увагу для практичного використання заслуговують параметри конструкцій плат.

Встановлено закономірності впливу геометричних та фізико-механічних параметрів друкованої плати (рис. 9), а також характеристик динамічних процесів, що виникають під час експлуатації блоків електронної апаратури, на максимальні напруження і деформації елементів несівної системи, що дає можливість здійснювати раціональний добір параметрів конструкцій для забезпечення міцності і необхідної жорсткості друкованої плати (табл. 3).

Таблиця 3 – Функціональні залежності максимальних напружень та переміщень від геометричних параметрів плат

Довжина друкованої плати	Лінійна координата зосередженої маси
$\sigma_{\max}(l) = \left[P_0 \frac{2}{n} \sqrt{\frac{3EJ}{l^3 m_3}} + P_{cm} \right] \frac{l}{4W_{oc}}, \quad (25)$	$\sigma_{\max}(x) = \left[P_0 \frac{1}{2n} \sqrt{\frac{3EJ}{m_3 x^2 (x-l)^2}} + P_{cm} \right] x \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{1}{W_{oc}}, \quad (27)$
$\Delta_{\max}(l) = \left(P_0 \frac{2}{n} \sqrt{\frac{3EJ}{l^3 m_3}} + P_{cm} \right) \frac{l^3}{48EJ}, \quad (26)$	$\Delta_{\max}(x) = \left(P_0 \frac{1}{2n} \sqrt{\frac{3EJ}{m_3 x^2 (x-l)^2}} + P_{cm} \right) \frac{3xl^2 - 4x^3}{48EJ}, \quad (28)$

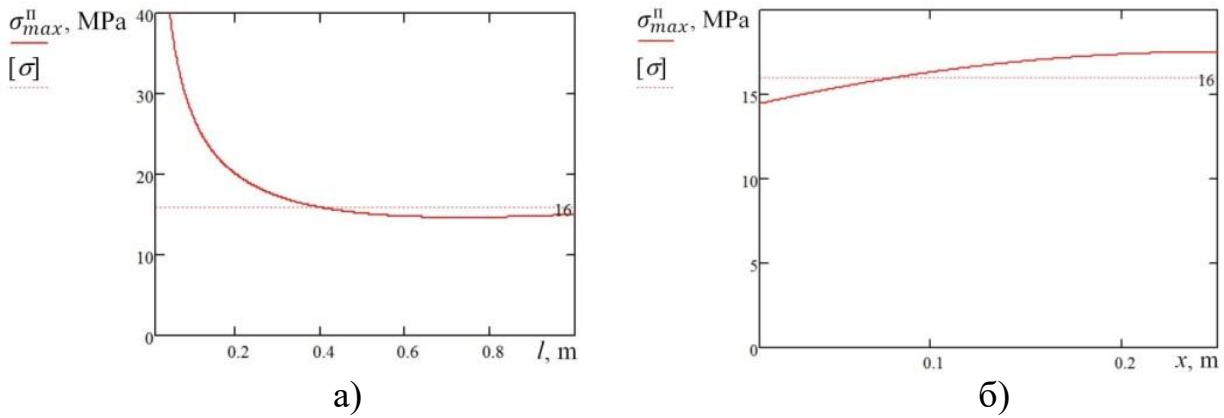


Рис. 9. Залежності максимального нормального напруження від довжини (а) та лінійної координати (б) зосередженої маси ДП при $P_0 = \text{const}$ та $\omega = \omega_0$

Розроблена математична модель також дозволяє визначення геометричних параметрів, зокрема мінімально допустимої довжини ДП, яка забезпечує виконання умови міцності навіть в умовах резонансного збудження при заданих постійних значеннях інших параметрів друкованої плати та діючого динамічного навантаження:

$$l_{min} = \frac{3P_0^2 EJ}{4[\sigma]^2 n^2 W_{oc}^2 m}. \quad (29)$$

Теоретично обґрунтовано ефективність зменшення динамічних навантажень, напружень і деформацій друкованої плати за рахунок оснащення несівної системи демпфером сухого тертя (ДСТ) (рис. 10) та раціонального добору його пружно-дисипативних характеристик.

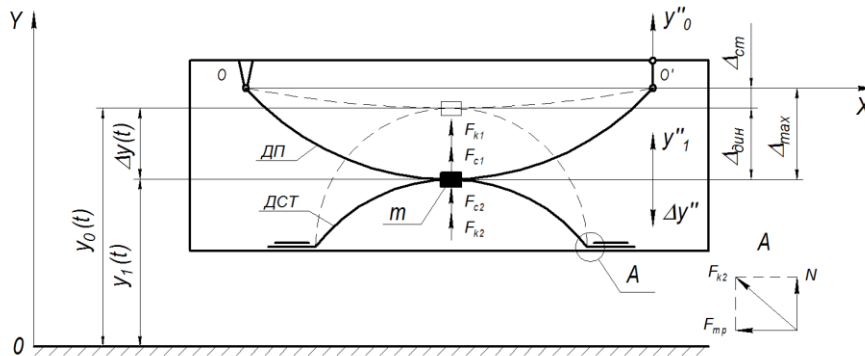


Рис. 10. Схема динамічного навантаження друкованої плати із ДСТ

Рівняння руху зосередженої маси в неінерціальній системі відліку – відносно опор O та O' , має вигляд аналогічний до (23):

$$m\Delta y'' + F_{k1} + F_{k2} + F_{c1} + F_{c2} = m y_0'', \quad (30)$$

де $m\Delta y''$ – відносна сила інерції; $m y_0''$ – переносна сила інерції; F_{k1} та F_{k2} – сили пружності, які діють на m від ДП та ДСТ відповідно; F_{c1} та F_{c2} – сили згасання коливань – сили в'язкого тертя в матеріалах ДП та ДСТ відповідно.

Рівнодіюча сил опору ДСТ:

$$F_{k2} = \sqrt{N^2 + F_{mp}^2}. \quad (31)$$

Із врахуванням формули Кулона $F_{mp} = \mu_{mp}N$, де μ_{mp} – коефіцієнт тертя, та $N = k_2\Delta y$ рівняння (30) набуває вигляду:

$$\ddot{q} + q\left(\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2\sqrt{1+\mu_{mp}^2}\right) + 2n\dot{q} = Y_0\omega^2\sin(\omega t), \quad (32)$$

де $q = \Delta y(t)$; $n = (c_1, c_2)/2m$ – загальний коефіцієнт демпфування, де c_1, c_2 – коефіцієнти згасання коливань ДП та ДСТ відповідно; $\omega_{01} = \sqrt{k_1/m}$ та $\omega_{02} = \sqrt{k_2/m}$ – власні кутові частоти, де k_1, k_2 – коефіцієнти жорсткості ДП та ДСТ відповідно.

В рішенні (32) амплітуда коливань за умови резонансу ($\omega = \omega_0$):

$$\Delta_{дин}^{max} = \frac{Z_0\omega_0^2}{\sqrt{\left(\omega_{02}^2\sqrt{1+\mu_{mp}^2} - \omega_{02}^2\right)^2 + 4n^2\omega_0^2}}, \quad (33)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2}$ – власна кутова частота коливальної системи.

Отримані функціональні залежності від пружно-дисипативних властивостей ДСТ, зокрема його коефіцієнту жорсткості:

$$\sigma_{дин}^{max}(k_2) = P_0 \frac{1}{\sqrt{k_2^2\left(\sqrt{1+\mu_{mp}^2} - 1\right)^2 + 4n^2m(k_1 + k_2)}} k_1 \frac{l_1}{4} \frac{1}{W_{oc}}; \quad (34)$$

$$\Delta_{дин}^{max}(k_2) = P_0 \frac{1}{\sqrt{k_2^2\left(\sqrt{1+\mu_{mp}^2} - 1\right)^2 + 4n^2m(k_1 + k_2)}}, \quad (35)$$

показали ступеневе зниження напружено-деформованого стану за рахунок збільшення жорсткості ДСТ (рис. 11). Коефіцієнт жорсткості демпферу (36) є прямо пропорційним до сили опору (31), яка є рівнодіючою сили притискання поверхонь та сили тертя в кінематичній парі, що здійснює коливання, і за рахунок їх зростання, при збільшенні амплітуди коливань, забезпечує зниження динамічних напружень та переміщень.

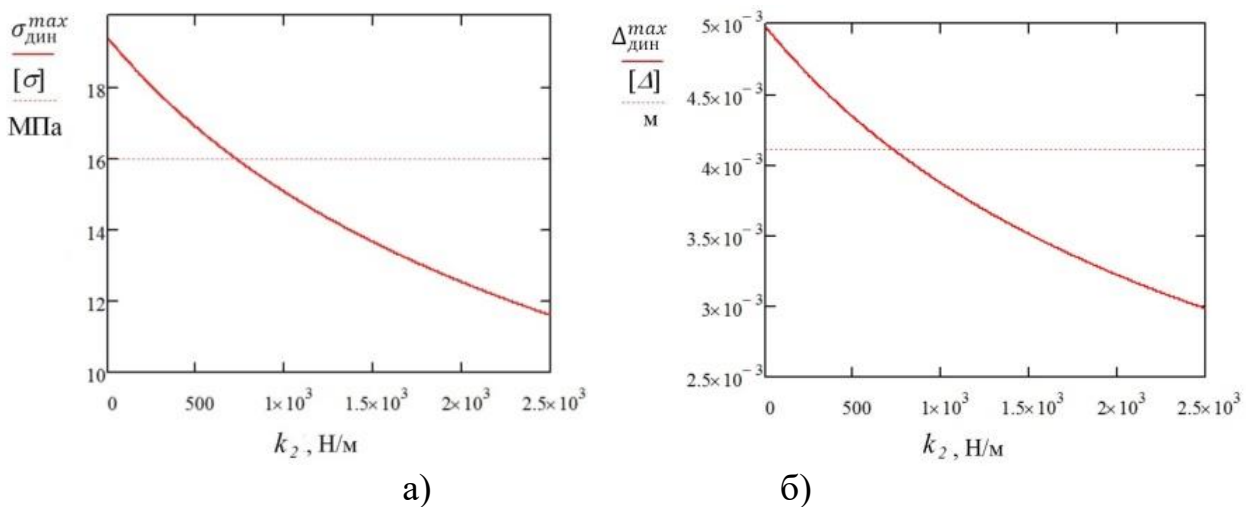


Рис. 11. Залежність максимального динамічного напруження (а) та прогину (б) плати від коефіцієнту жорсткості ДСТ при $\omega = \omega_0$ та $P_0 = \text{const}$

Розроблена модель дозволяє визначати мінімально допустиме значення жорсткості ДСТ, яке забезпечує міцність та необхідну жорсткість друкованої плати:

$$k_{min} = \frac{\sqrt{4n^4 m - \left(\sqrt{1 + \mu_{mp}^2} - 1\right)^2 \left(4n^2 m k_1 - \left(\frac{P_0 k_1 l_1}{4W_{oc} [\sigma]}\right)^2\right)} - 2n^2 m}{\left(\sqrt{1 + \mu_{mp}^2} - 1\right)^2}, \quad (36)$$

та, за цим значенням, в інженерних розрахунках визначати потрібні геометричні параметри конструктивного виконання ДСТ криволінійної форми прямокутного перерізу.

З достатньою для практики точністю розрахунок конструктивних параметрів ДСТ, зокрема $l \times b \times h$, який за своєю конструкцією є криволінійним, можна визначити як для прямолінійної балки:

$$k_{min} = \frac{48EJ}{l^3}. \quad (37)$$

Варіанти конструктивного виконання ДСТ показані на (рис. 12).

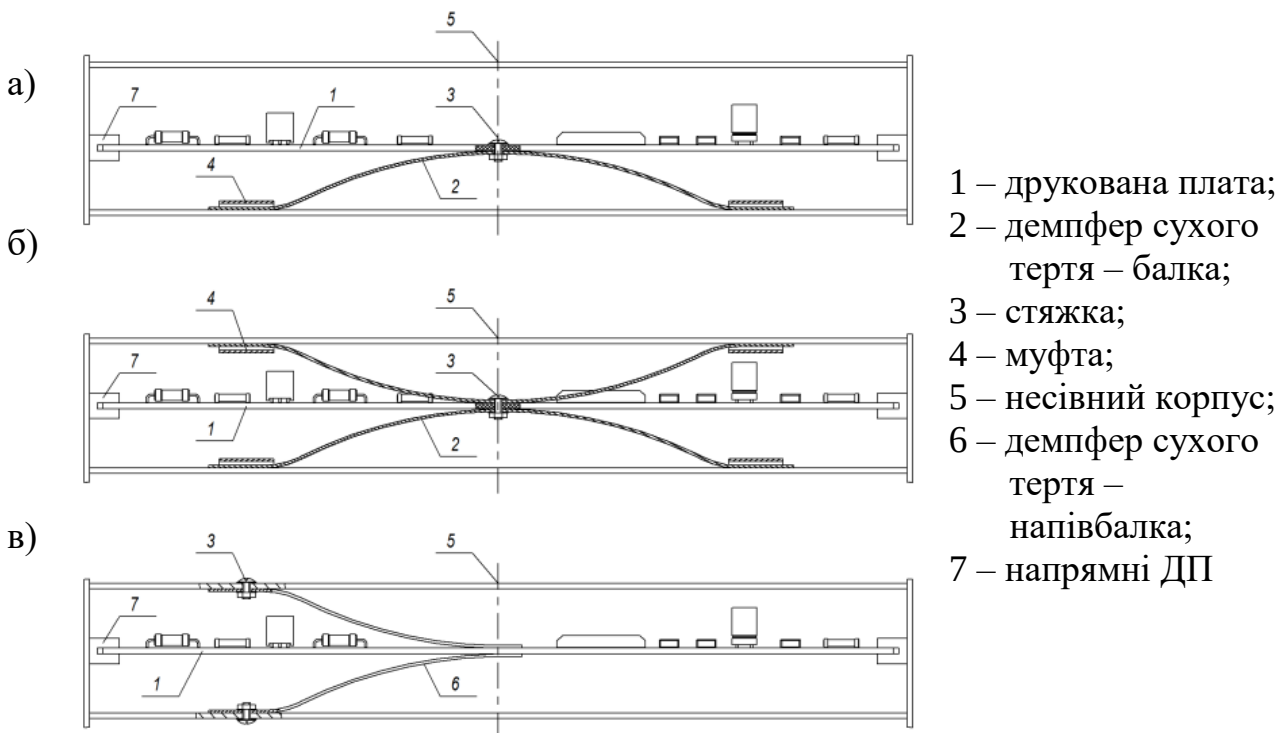


Рис. 12. Конструктивне виконання демпфера сухого тертя представлено пів-еліптичною балкою прямокутного перерізу:

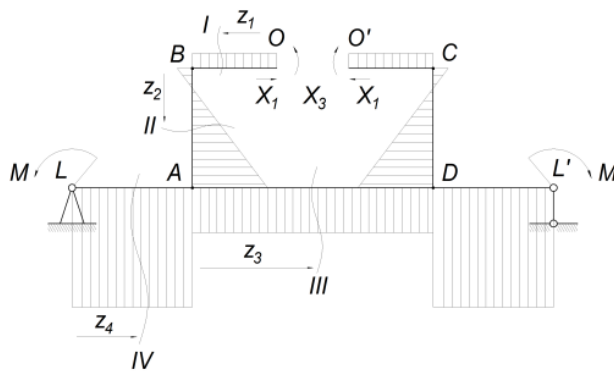
а) балка; б) подвійна балка; в) напівбалка

Порівняльний аналіз графіків отриманих методом математичного та імітаційного моделювання показав їх узгодженість та незначну розбіжність абсолютних значень їх параметрів, зокрема мінімально допустимих значень жорсткості ДСТ в 6,9 %.

Математичним моделюванням напружено-деформованого стану в умовах статичного навантаження на згин конструкцій друкованих плат представлених

площинною рамною стрижневою системою обґрунтовано зменшення внутрішніх сил і моментів опору (38, 39) та, відповідно, передачі деформацій і напружень до тіла електронних компонентів (рис. 13) за рахунок збільшення монтажної довжини їх виводів, на відміну від технології низького наскрізного, та, тим більше, поверхневого монтажу.

Відношення деформації ЕК, яка визначається діючою силою розтягу X_1 та згинальним моментом X_3 на ділянці ВС (рис. 13), до деформації ДП від дії прикладеного згинального моменту M , представляє собою коефіцієнт передачі деформації від ДП до ЕК. На рис. 14 показано характер зміни коефіцієнта передачі деформації $w(a)$ в залежності від монтажної довжини виводів ЕК (параметр a) отриманий аналітичним обрахунком. Умовна графічна залежність отримана для поданої механічної системи, в якій фізико-механічні параметри (осьовий момент опору поперечного перерізу та модуль Юнга) усіх стержнів прийняті рівними, дозволяє зробити висновок про можливість зменшення цього коефіцієнту за рахунок збільшення монтажної довжини виводів.



$$X_3 = \frac{Mab}{a^2 + 4ab - 3b^2}; \quad (38)$$

$$X_1 = \frac{3Mb}{a^2 + 3ba}. \quad (39)$$

Рис. 13 – Еквівалентна система друкованої плати із встановленим електронним компонентом та еюра внутрішніх згинальних моментів

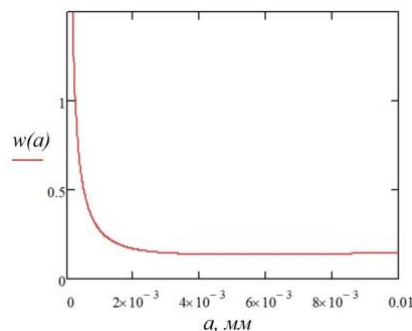


Рис. 14. Характер зміни коефіцієнта передачі деформації в залежності від монтажної довжини виводів ЕК

Застосуванням теорії Ламе-Гадоліна удосконалено методологію аналізу напружено-деформованого стану елементів герметизованого електронного модуля у вигляді складеного товстостінного циліндра (рис. 15) з урахуванням особливостей взаємодії керамічного сердечника з композитним захисним шаром за перепаду температур фізичних тіл. Встановлено, що в обох тілах радіальні напруження σ_r досягають максимальних значень на межі їх контакту, а колові σ_θ – на внутрішній поверхні кожного циліндра (рис. 16)

при сталому перепаді температур, що було підтверджено експериментально. Осьові напруження σ_z за своїм значенням знаходяться між радіальними та окружними і від радіусу r не залежать.

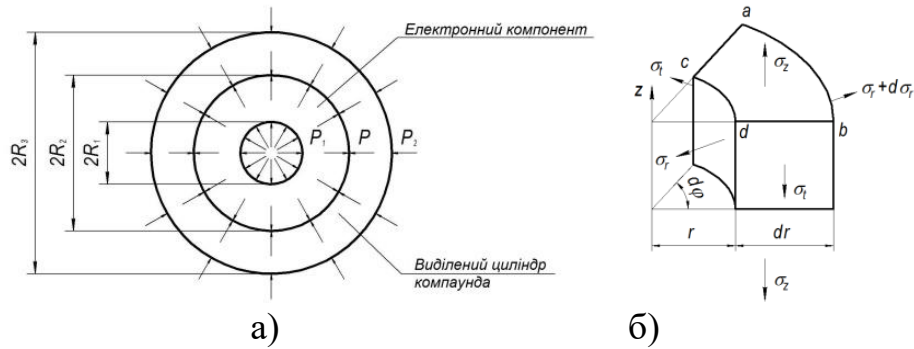


Рис. 15. Розрахункова схема: а) осесиметричної задачі взаємодії двох циліндричних тіл;
б) напружено-деформований стан елементарного об'єму

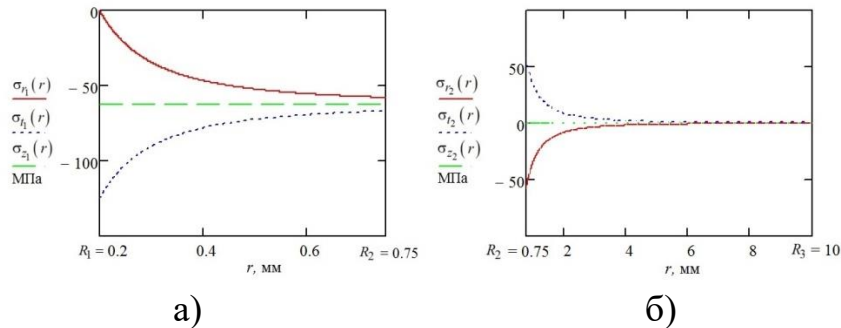


Рис. 16. Епюри радіального розподілу загальних напружень резистора (а) та компаунда (б) при сталому перепаді температур

Таблиця 4 – Формули для визначення напружень і контактного тиску при сталому перепаді температур

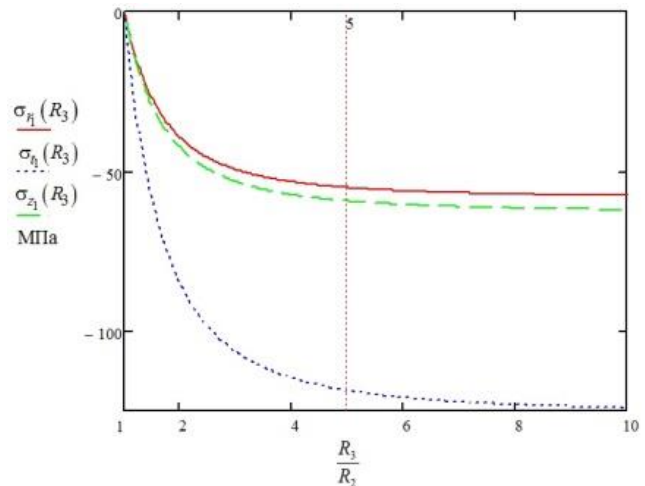
Напруження	В електронному компоненті	У компаундному циліндрі
Радіальні	$\sigma_{r_1}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right), \quad (40)$	$\sigma_{r_2}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} - 1 \right), \quad (43)$
Колові	$\sigma_{t_1}(P, r) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1 \right), \quad (41)$	$\sigma_{t_2}(P, r) = \frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{r^2} + 1 \right), \quad (44)$
Осьові	$\sigma_{z_1}(P) = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (42)$	$\sigma_{z_2}(P) = \frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2}, \quad (45)$
Контактний тиск	$P = \frac{[(1 + \mu_2)\alpha_2 - (1 + \mu_1)\alpha_1]\Delta\tau}{\frac{[(1 + \mu_1)R_1^2 + (1 - \mu_1)R_2^2]}{E_1(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{[(1 + \mu_2)R_3^2 + (1 - \mu_2)R_2^2]}{E_2(R_3^2 - R_2^2)}}. \quad (46)$	

Визначено мінімальне допустиме співвідношення зовнішніх радіусів компаундного циліндра і електронного компоненту, при подальшому збільшенні якого відносний приріст функцій $\Delta\sigma$ буде несуттєвим (рис. 17). Наприклад, при $[R_3/R_2] = 5$:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{r,t,z}[R_3/R_2] - \lim_{R_3/R_2 \rightarrow \infty} \sigma_{r,t,z}(R_3/R_2)}{\lim_{R_3/R_2 \rightarrow \infty} \sigma_{r,t,z}(R_3/R_2)} = -5,7\%.$$

В таких випадках, задовольняючись точністю розрахунків із похибкою в 5-6%, компаундний циліндр можна розглядати як такий, що має нескінченно велику товщину стінки не залежно від форми його зовнішнього контуру.

Рис. 17. Залежність найбільших загальних напружень в електронному компоненті від зовнішнього радіусу шару компаунду



Третій розділ присвячено адаптації методів експериментального визначення напружень і деформацій до дослідження параметрів напружено-деформованого стану малогабаритних елементів конструкцій. В розділі описано створення вимірювального комплексу призначеного для оцінки деформацій малогабаритних елементів конструкцій та компонентів електронної техніки під дією статичних, циклічних та динамічних механічних, температурних та пневматичних навантажень, які відтворюють складні, наближені до експлуатаційних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження, із реалізацією методів електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відеозйомки. На рис. 18 представлено блок-схему вимірювального комплексу створеного із використанням наступної апаратури і обладнання: 8АНЧ-26 – станція тензометрична; АФ-15 – прилад акустико-емісійний; ПІ-19 – прилад віброметричний та блок ФЕ-2 – фільтри електричні об'єднані в один пристрій вимірювання прискорення ППУ-1М; відеокамера Panasonic; датчики тензометричні, акустико-емісійні та вібраційні. Сполучення вимірювальних приладів комплексу із персональним комп'ютером здійснено через модуль АЦП універсальний з інтерфейсом USB 2.0. Відеокамера підключена до послідовної високошвидкісної шини FireWire – стандарт IEEE 1394.

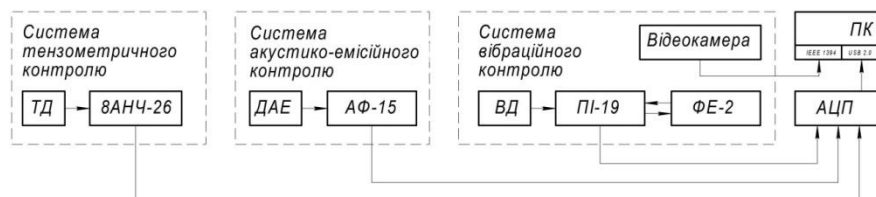


Рис. 18. Блок-схема вимірювального комплексу

Система тензометричного контролю створена на основі вдосконалення та модифікації тензовиміральної апаратури, що включає введення в вимірвальне коло узгоджувального пристрою і розробку пульта контролю і узгодження, що дозволило підвищити чутливість, перешкодозахищеність, стабільність роботи тензоапаратури. Для тензорезисторів (типу МПТ, МПБ-1, КФ4П1) виявлено технологічні та конструктивні фактори, що впливають на тензочутливість і спричиняють похибку вимірювання малобазних тензодатчиків, зокрема їх фізичні властивості, геометрична форма, реологічні властивості та втомна міцність матеріалів. Виявлено вплив температури на точність вимірювання деформації і запропоновано спосіб температурної компенсації. Експериментально встановлено допустимі значення струму живлення, відповідні допустимій зміні відносного опору тензорезистора за рахунок нагріву струмом живлення при збереженні чутливості апаратури. Розроблено рекомендації та схеми препарування тензорезисторами натурних виробів електронної техніки та їх підключення у вимірвальний міст, які дозволяють вимірювати дійсні значення деформацій визначеного виду, зокрема розтягу-стиску, згину або кручення, причому в кожному випадку, якщо два датчики є робочими, чутливість схеми може бути збільшена в два рази.

Систему акустико-емісійного контролю створено на основі серійного приладу АФ-15. Первинні датчики АЕ – п'єзоелектричні перетворювачі типу П113. Комп'ютерна обробка параметрів сигналів АЕ дозволяє проводити експрес і пост-оброку отриманої інформації: кількість осциляцій (високочастотних коливань, рівень яких перевищує рівень дискримінації), кількість осциляцій в одиницю часу (швидкість рахунку), кількість подій (сумарний рахунок), кількість подій в одиницю часу (активність), амплітуда подій, лінійна, площинна та просторова координата подій на основі ефекту Допплера. Оброблена інформація представляються в зручному наочному вигляді дво- і тривимірних графіків.

Система вібраційного контролю створена для вимірювання параметрів коливального руху: вібропереміщення; віброшвидкості; віброприскорення (віброперевантаження); та частоти коливань. Для дослідження динаміки та аналізу вібростійкості і віброміцності запропоновані наступні методи: випробування на виявлення резонансних частот; метод коливальної частоти; метод фіксованих частот. В якості первинних перетворювачів коливань використані п'єзоелектричні (ІС-313, АВС 027) та тензометричні датчики. Динамічні навантаження в лабораторних умовах здійснюються вібраційною установкою ВЕДС-200А, для якої відпрацьована процедура тарування виміральної апаратури та здійснено вібраційне обстеження поверхні платформи.

Для візуальної оцінки коливань ЕА розроблено методику проведення високошвидкісної відеозйомки. Відеокамера встановлюється навпроти об'єкту, що коливається, у площині, перпендикулярній напрямку коливань. Покадровий аналіз відеоматеріалу коливань методами комп'ютерної графіки дозволяє визначати амплітуду коливань. Паралельна обробка запису коливань віброметром дозволяє визначати частоти коливань об'єкту.

Четвертий розділ присвячено експериментальній перевірці основних результатів теоретичних досліджень та обґрунтуванню методів зменшення напружень і деформацій, а також забезпечення міцності елементів несівних конструкцій електронної апаратури в умовах дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

В результаті вібраційного дослідження конструкції блоку електронної апаратури на вібростенді визначено, що вібрації елементів несівної конструкції блоку (рис. 19) та друкованих плат (рис. 20) в середині блоку внаслідок резонансного збудження перевершують вібрації, що діють на блок ззовні, чи передаються в місцях кріплення блоку від вібростенду, та крім того, вібрації, що задаються, розподілені нерівномірно по площині столу вібростенда.

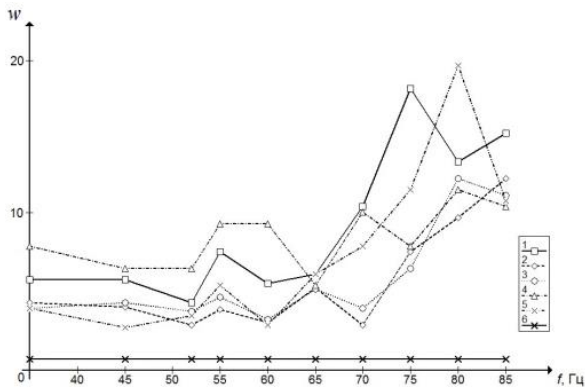


Рис. 19. АЧХ коливань:
конструктивних елементів блоку
ЕА (датчики № 1–5); вібростенду
(датчик № 6)

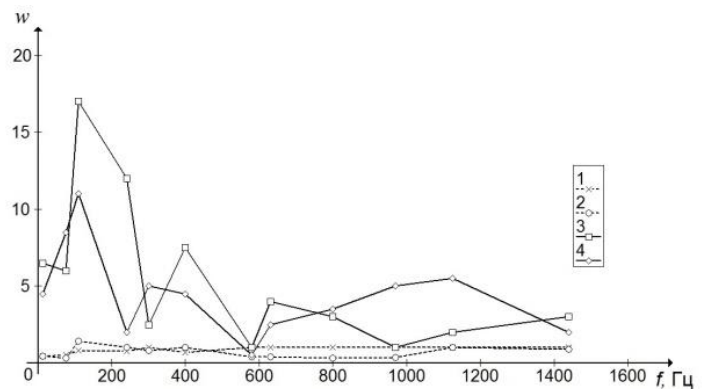


Рис. 20. АЧХ віброприскорення:
друкованих плат (датчики № 3, 4);
вібростенду (датчики № 1, 2)

Використання методу високошвидкісної відеозйомки виявило прояв багатьох резонансів, як окремих плат, їх груп, стінок корпусу та конструкції блоку в цілому (рис. 21). Амплітуди коливань плат на резонансах у десятки разів перевищували амплітуди коливань столу вібростенда та зазор між ними, рівний 5 мм, що створювало їх зіткнення при протифазних коливаннях, спостерігалися знакозмінні рухи монтажних дрітків, які приводять до їх відриву.

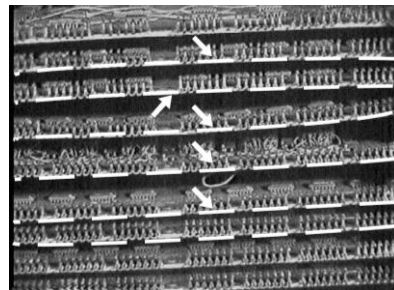
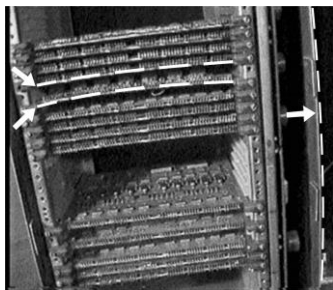


Рис. 21. Високошвидкісна відеозйомка коливань друкованих плат

Застосування методу Гука-Хладні при вібраційному дослідженні ДП дозволили виявити вузли коливань, в яких виникають найбільші деформації і напруження об'єктів дослідження (рис. 22, а). Аналіз амплітудно-частотних

характеристик (рис. 22, б) коливань електронних модулів відносно друкованих плат, на яких вони встановлені, показав, що амплітуди коливань електронних модулів можуть в декілька разів перевищувати амплітуди коливання самих плат жорстко закріплених в кріпильному пристрої, що спростовує ідею зменшення віброактивності друкованих плат за рахунок їх жорсткого монтажу до несівної конструкції.

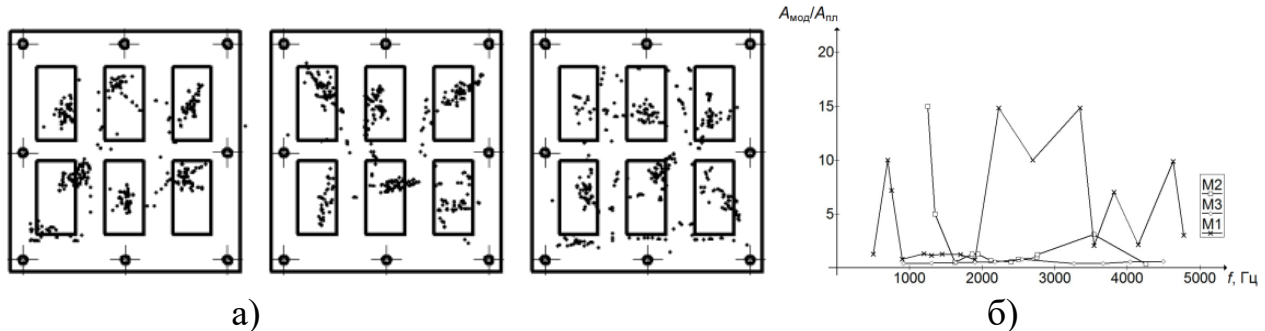


Рис. 22. Фігури Хладні (а) та АЧХ коливань електронних модулів на об'єднувальній платі

Експериментальні дослідження функцій (26) і (27) були проведені у спеціальному кріпильному пристрої типу «лещата» на вібростенді ВЕДС-200. Визначення максимальних нормальних напружень здійснювалися за показниками тензодатчика встановленого в місці розташування зосередженої маси та розрахунком за законом Гука. Максимальні прогини визначалися за показниками вібродатчика типу АВС 032, який вимірював вібропереміщення центру досліджуваних плат. Другий вібродатчик закріплений на кріпильному пристрої контролював задані коливання. Сигнали тензо- і вібродатчиків подавалися на вимірювальний комплекс. Для виявлення резонансу об'єктів дослідження використовувався метод коливної частоти.

Порівняння максимальних значень повних, статичних та динамічних напружень друкованої плати, отриманих експериментальним шляхом, із результатами математичного моделювання показало їх незначну розбіжність (від 0,39 % до 12,85 %), що підтверджує практичну ефективність математичних моделей (26) і (27).

Визначення впливу пружно-дисипативних характеристик каркасу несівної конструкції блоків ЕА на збудженість коливань ДП в ході вібраційних випробувань корпусу в трьох модифікаціях: 1 – серійна із стінками із алюмінієвого сплаву товщиною 1 мм; 2 – стінки із демпфірувального склотекстоліту товщиною 1 мм; 3 – без бічних стінок, виявило збільшення коефіцієнту передачі вібрацій із зменшенням жорсткості бічних стінок корпусу (рис. 23), що пояснюється зменшенням конструкційного демпфірування, обумовлене дією сили сухого тертя під час взаємного зміщення поверхонь контакту, перевершує демпфування, зумовлене силами внутрішнього в'язкого тертя в матеріалі деталей. Цей висновок також підтверджується зниженням передачі вібрацій із збільшенням величини моменту затягування кріпильних болтів блоку до вібростенда (рис. 24).

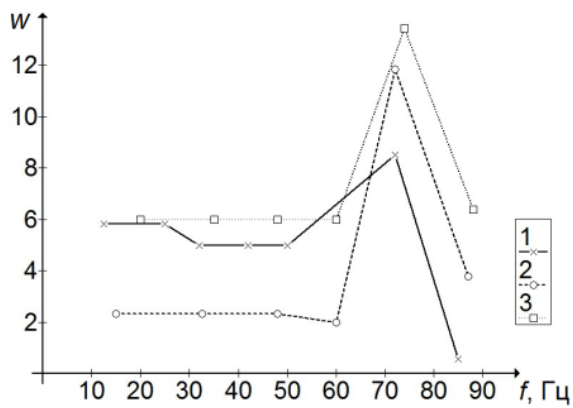


Рис. 23. Амплітудно-частотні характеристики відносного віброприскорення плат встановлених в корпусах блоків модифікацій 1, 2, 3

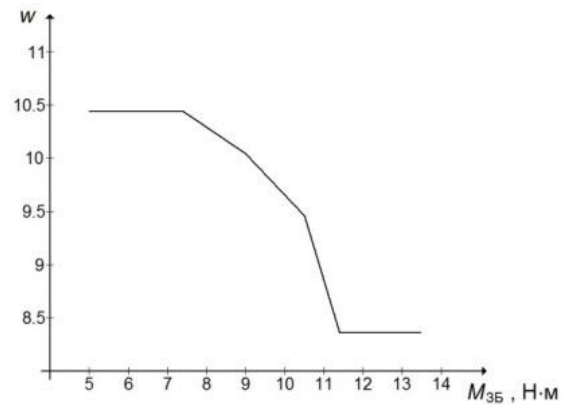
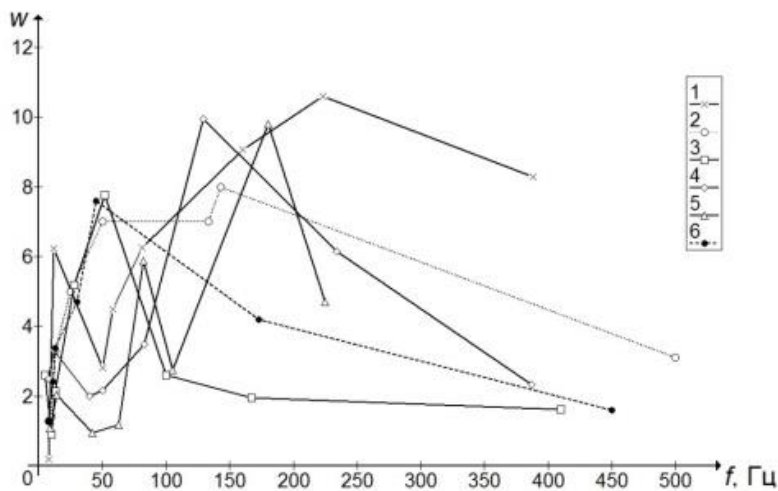


Рис. 24. Вплив моменту затягування кріпильних болтів на коефіцієнт передачі вібрацій від опори до функціональної плати

Аналіз АЧХ досліджених варіантів зниження передачі вібрацій (рис. 25) показав, що модифікація наявних або створення додаткових пружно-дисипативних зв'язків в місцях кріплення друкованих плат не дозволяють досягти потрібного зменшення динамічних напружень та прогинів, оскільки недостатньо впливають на коливання небезпечного перерізу друкованих плат.



- 1 – у штатних пластмасових напрямних;
- 2 – на віброізоляційній тканинній стрічці;
- 3 – на віброізоляційній гумовій стрічці;
- 4 – у штатних пластмасових напрямних, перекладених поролоном;
- 5 – у спеціальних напрямних, обклеєних гумовою стрічкою;
- 6 – на віброізоляційній тканинній стрічці з демпфером сухого тертя

Рис. 25. Амплітудно-частотні характеристики коефіцієнта передачі віброприскорень через різні варіанти конструкції вузлів кріплення друкованих плат

При створенні пружно-дисипативних зв'язків всередині та ззовні конструкції блоків ЕА були досліджені наступні конструкторські рішення: 1) жорстка установка блоку ЕА на вібростенді; 2) м'яка установка блоку ЕА на гумових прокладках; 3) гнучке зв'язування плат (бандажування, рис. 26, а); 4) жорстке зв'язування плат (додаткова рейка, рис. 26, а); 5) жорстке зв'язування плат із гумовими прокладками. Для виключення впливу стінок як додаткових мас та пружно-дисипативних зв'язків корпусу використовувалась модифікація 3. Випробування проводили при віброприскоренні $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ в діапазоні частот 20–

2000 Гц. Найбільш ефективно зниження збуджування коливань має місце при жорсткому зв'язуванні плат всередині блока (більш, ніж в п'ять разів) (рис. 26, б, граф. 4), Проте використання податливої установки самого блока спричиняло відносно підвищення збуджування коливань ДП. Зниження амплітуд коливань і віброприскорень на платах відбувалося без суттєвої зміни їх власної частоти.

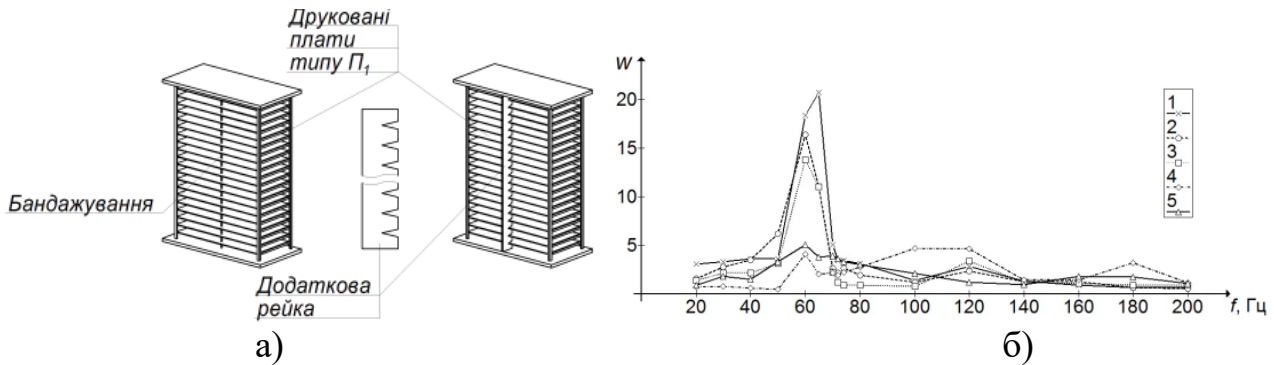
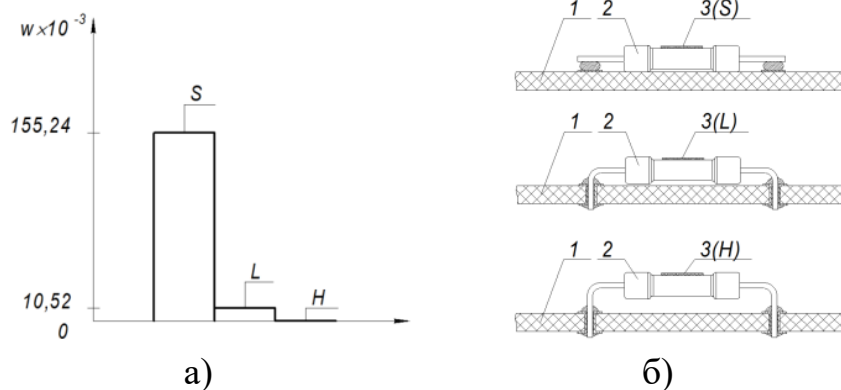


Рис. 26. Створення пружно-дисипативних зв'язків всередині блоку ЕА (а) та АЧХ (б) коефіцієнту передачі коливань на ДП

Отримано експериментальне підтвердження ефективності застосування демпферу сухого тертя, з'ясовано, що зменшення максимальних динамічних напружень і прогинів сягає 20,5 % та 25,9 % відповідно, а також показано, що умови міцності і жорсткості друкованої плати у системі з демпфером сухого тертя забезпечуються.

Отримано експериментальне підтвердження ефективності запропонованої технології високого наскрізного монтажу електронних компонентів, що забезпечує зменшення коефіцієнта передачі деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів. Експериментальне дослідження технології високого наскрізного монтажу (із зазором $\approx 2...3$ мм) на прикладі металокерамічних резисторів ОМЛТ-0,125 препарованих тензодатчиками МПБ-1 показало нульову передачу деформацій (рис. 27), на прикладі багатовивідних електронних компонентів (мікросхем типу DIP $9,2 \times 6,2$ мм) – трикратне зменшення передачі деформації до корпусів мікросхем порівняно із технологією низького монтажу.

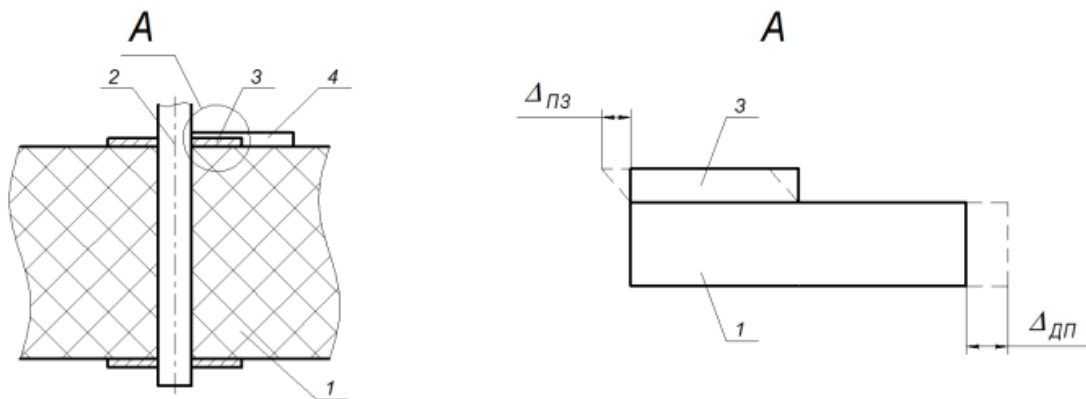


1 – основа плати; 2 – резистор; 3 – тензодатчик

Рис. 27. Технології поверхневого (S), низького (L), високого (H) монтажу резисторів на друкованій платі

Виявлено монтажні напруження при паяному з'єднанні багатовивідних електронних компонентів і їх залежність від кількості припаяних виводів. Показано, що обрив або неякісне паяне з'єднання одного або декількох виводів електронного компоненту здатні приводити до збільшення монтажних напружень. Показники тензодатчиків на об'єктах знімалися при послідовному відсіченні припаяних виводів відносно початкового стану. Одним із способів зменшення монтажних деформацій запропоновано використання додаткового пружно-дисипативного зв'язку між монтажною платою та електронними компонентами, яким можуть бути монтажні адаптери (панелі) для мікросхем або електронних модулів.

Дослідженням впливу деформацій монтажних плат на деформації контактних вузлів встановлено, що критичними елементами конструкцій друкованих вузлів є контактні вузли, зокрема паяні з'єднання. Схема деформації контактної вузла створює дотичні напруження деформації зсуву. Тензометрування датчиком, який охоплював однакові ділянки контактної вузла та друкованої плати (рис. 28) дозволило визначити коефіцієнт передачі деформації, який досягав більш ніж 7,5. Тензодатчик вимірював сумарну деформацію $\Delta_1 = \Delta_{пз} + \Delta_{дп}$, інший ідентичний тензодатчик встановлювався поруч на поверхні друкованої плати і вимірював деформацію тільки друкованої плати $\Delta_2 = 2\Delta_{дп}$. За показниками тензодатчиків визначався коефіцієнт передачі деформації від основи друкованої плати до паяного з'єднання за формулою $w = 2\Delta_1/\Delta_2 - 1$.



1 – основа друкованої плати; 2 – вивід електронного компонента; 3 – шар припою; 4 – тензOMETричний датчик

Рис. 28. Схема препарування контактної вузла тензOMETричним датчиком

Також проведено оцінку впливу герметизації та тривалості витримки друкованих плат під дією статичного навантаження на згин на передачу деформацій до їх компонентів. Зміни відносної деформації електронних модулів в залежності від часу навантаження ДП показали, що деформації зростають з часом навантаження, що свідчить про наявність процесів повзучості і релаксації, проте їх значення суттєво нижчі для електронних модулів залитих компаундом. Для не герметизованих плат $\epsilon_H = (30...40) \cdot 10^{-5}$, а герметизованих $\epsilon_H = (1...4) \cdot 10^{-5}$.

Експериментальне визначення температурних напружень, які виникають в герметизованих модулях при термоударах від $+70^{\circ}\text{C}$ до -60°C , проводилося для резисторів С2-29В у складі модулів герметизованих компаундом ЕЗК-25. Оскільки об'єкти дослідження знаходяться в складному об'ємному напружено-деформованому стані, зокрема для електронного компонента $\sigma_{r1} > \sigma_{z1} > \sigma_{t1}$, для компаунда $\sigma_{t2} > \sigma_{z2} > \sigma_{r2}$, для оцінки міцності було запропоновано експериментальний спосіб визначення граничних напружень, відповідно до якого граничні (руйнівні) окружні напруження електронних компонентів визначаються в такому ж об'ємному напружено-деформованому стані, що і при експлуатації, але із більшими значеннями завдяки використанню «жорсткого» (без пластифікатора) компаунду ЕЗК-25. Отримані значення граничних окружних напружень виявилися в діапазоні від $-58,74$ до $-107,66$ МПа. Як показали результати попереднього дослідження максимальні експлуатаційні окружні напруження можуть перевищувати ці граничні значення і приводити до руйнування і виходу з ладу електронних модулів, що вимагає розробки способів зменшення експлуатаційних напружень та забезпечення міцності системи електронний компонент – компаунд.

Випробування паяних з'єднань наскрізного та поверхневого монтажу на відрив та на розтяг виявили зменшення значень руйнівних навантажень, викликане дефектом «холодна пайка», на $44,6\%$ для наскрізного монтажу та на $36,5\%$ – для поверхневого монтажу. Очікуване підвищення міцності паяного з'єднання завдяки попередньому перегріву терміналів SMD становить $47,9\%$. Циклічні випробування паяних з'єднань за пульсуючим циклом навантаження виявили, що відсутність ефекту Кайзера (поява акустичної емісії при повторному навантаженні) при повторному навантаженні свідчить про наявність пластичних деформацій, або актів руйнування та розвитку дефектів. Витримка на піку навантаження дозволила додатково виявити процеси релаксації та повзучості матеріалу паяних з'єднань.

Діагностика міцності нероз'ємних з'єднань, які використовуються для герметизації модулів надвисоких частот (НВЧ) виготовлених із сплаву АМГ-2 зварним та паяним з'єднанням, під дією внутрішнього надлишкового тиску та температури виявила розкид значень тиску розгерметизації від $0,18$ до $3,00$ атм та кількості циклів навантаження до розгерметизації корпусів, що свідчить про нестабільність та ненадійність технології герметизації. Аналіз напружено-деформованого стану корпусів НВЧ під дією пневматичного навантаження при температурах $+20^{\circ}\text{C}$ та $+85^{\circ}\text{C}$ здійснений методом електротензометрії виявив, що напруження в матеріалі кришок корпусів є невеликими і не представляють небезпеки та не залежать від температури. Проте в матеріалі шва герметизації величини напружень досягають величин більших не тільки його границі пропорційності, а й границі міцності ($\sigma_B = 200$ МПа – для зварних швів; $\sigma_B = 50$ МПа – для паяних). Нормальні напруження були визначені для наступних значень модулю Юнга $E = 0,71 \cdot 10^5$ МПа – для АМГ-2; та для припою ПОС-61 – $E = 39,7 \cdot 10^3$ МПа при $t = +20^{\circ}\text{C}$ і $E = 23,4 \cdot 10^3$ МПа при $t = +85^{\circ}\text{C}$. Прогин кришок корпусів визначався індикатором годинникового типу з ціною поділки 1 мкм.

Реєстрація сигналів АЕ здійснювалась резонансним п'єзоелектричним датчиком розташованим по центру кришки корпусів. Аналіз матеріалів АЕ дозволив виявити прояв значного рівня параметрів АЕ при тиску значно нижчому за тиск розгерметизації. В якості інформативних параметрів було запропоновано використовувати амплітуду та сумарний рахунок АЕ. Проте діагностування при статичному випробуванні не дає гарантії, що розгерметизація не відбудеться у наступному циклі навантаження, а саме в таких умовах працюють об'єкти дослідження. Тому подальші дослідження відбувались при циклічному випробуванні в пульсуючому режимі навантаження до $P_{\text{тест}} = 1,6$ атм із витримкою 1 хв. Випробування повторювалось в 100 циклах, або до появи розгерметизації корпусу. Прояв ефекту Кайзера, був використаний для перевірки герметичності та підтвердження достовірності реєстрації п'єзодатчиками саме сигналів АЕ, а не різного роду шумів.

Проведені у попередніх розділах аналітичні, числові та експериментальні дослідження дозволили розробити низку прикладних рекомендацій, спрямованих на зменшення напружень і деформацій та на забезпечення міцності несівних конструкцій електронної апаратури (**п'ятий розділ**). До практичних рекомендацій відносяться інженерні розрахункові методи оцінки динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури, конструктивні та технологічні методи забезпечення міцності деталей та вузлів електронної апаратури та методи ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій електронної апаратури з урахуванням дії технологічних та експлуатаційних навантажень.

Запропоновано низку дискретних і континуально-дискретних математичних моделей, що являють собою методику розрахунку частот і форм вільних та амплітуд вимушених коливань друкованої плати (1–18). Методика ґрунтується на застосуванні методу початкових параметрів, що сприяє систематизації обчислювальних процесів та полегшенню числової реалізації математичних моделей за допомогою комп'ютерів.

Відповідно до методики конструкція друкованої плати представлена моделлю, яка схематично складається із двох частин: основи друкованої плати та встановлених на ній електронних компонентів. Основа друкованої плати представлена у вигляді балки, інерційні та пружно-дисипативні параметри якої є рівномірно розподіленими, а електронні компоненти представлені закріпленими на поверхні балки масами із розподіленими або зосередженими інерційними параметрами. Балка встановлена на двох опорах – нерухомій (з одним ступенем вільності) та рухомій (з двома ступенями вільності) шарнірних опорах, через які балка може піддаватися дії кінематичного навантаження в наслідок вертикального переміщення опор під дією зовнішнього силового навантаження (рис. 2). В представленій коливній системі поперечні перерізи балки здійснюють вертикальні переміщення в одній площині за рахунок деформацій тіла балки.

Континуально-дискретна математична модель може використовуватись для уточненого аналізу динамічних процесів та напружено-деформованого стану несівних конструкцій друкованих плат, тоді як для інженерних обрахунків можна запропонувати більш прості – дискретні математичні моделі коливної системи

друкованої плати. В дискретних моделях розрахункова схема (рис. 3) подана у вигляді балки, встановленої на шарнірних опорах, зосереджені маси електронних компонентів прикріплені до балки, визначені з урахуванням зведених мас основи плати (20).

Запропоновано математичну модель (26, 27) для інженерного розрахунку максимальних напружень та переміщень в друкованих платах. Математична модель може бути використана в процесі розроблення та обґрунтування параметрів конструкцій друкованих плат.

Оснащення несівної системи друкованої плати демпфером сухого тертя дозволило зменшити динамічні навантаження, напруження і деформації плати за рахунок раціонального добору пружно-дисипативних характеристик демпферу. Розроблена математична модель визначення коефіцієнту жорсткості демпферу сухого тертя (36) та інженерний розрахунок (37) конструктивних параметрів демпфера сухого тертя представленого пів-еліптичною балкою прямокутного перерізу.

Удосконалена технологія високого наскрізного монтажу електронних компонентів забезпечує трикратне зменшення коефіцієнту передачі деформацій від основи друкованої плати до вказаних компонентів та підвищує стійкість елементів конструкцій до технологічних та експлуатаційних навантажень. Відповідно до запропонованої технології монтажу ЕК монтуються із зазором $\approx 2-3$ мм відносно основи друкованої плати. Одним із способів зменшення монтажних деформацій запропоновано використання додаткового пружно-дисипативного зв'язку між монтажною платою та електронними компонентами, яким можуть бути монтажні адаптери (панелі) для мікросхем або електронних модулів. Застосування адаптерів з типом корпусу DIP (Dual In-Line Package) показали відсутність передачі монтажних деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів.

Удосконалено технологію визначення допустимого короблення друкованої плати, яка полягає у забезпеченні допустимого параметру напружено-деформованого стану паяних з'єднань, що відповідає відношенню границі текучості паяного з'єднання до коефіцієнту запасу короблення, на відміну від стандартизованого показника якості друкованої плати – площинності, для оцінки якого застосовують характеристики згинання та скручування основи друкованої плати.

Запропоновано технологічні методи захисту електронних компонентів, герметизованих компаундом, від дії температурних напружень за рахунок створення додаткових пружно-дисипативних зв'язків між електронними компонентами та герметиком. Максимальні значення коефіцієнту демпфування, досягнуті застосуванням поліетиленових кембриків, становлять 3,66, а застосуванням поліхлорвінілових термозбіжних трубок – 3,42. Трубки відповідного діаметру попередньо розрізані по твірній та використані для захисту електронних компонентів у складі модуля перед герметизацією.

Набула подальшого розвитку акустико-емісійна методика неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної апаратури, зокрема їх паяних та зварних з'єднань, яка полягає у відборі інформативних

параметрів: амплітуди та сумарного рахунку сигналів акустичної емісії, не перевищення порогового рівня яких в умовах циклічного навантаження свідчить про придатність об'єкту дослідження до експлуатації. Випробування здійснюють навантаженням із коефіцієнтом запасу міцності в режимі пульсуючого циклу навантаження /розвантаження із витримкою паузи між цими фазами та одночасною реєстрацією параметрів сигналів акустичної емісії. При появі сигналів АЕ з амплітудою вище встановленого рівня дискримінації випробування продовжуються до десяти циклів. Повторний прояв АЕ із зростанням сумарного рахунку свідчить про непридатність об'єкту дослідження до експлуатації; при необхідності, проводиться локація небезпечних дефектів.

Для визначення фізико-механічних характеристик конструкцій функціональних вузлів ЕА запропоновано розрахунково-експериментальний метод пробних параметрів, заснований на ідентифікації цих характеристик шляхом розв'язання обернених задач міцності. У цих завданнях переміщення та відносні деформації, що традиційно розраховуються в матеріалах виробів, визначаються експериментально і вважаються заданими, а фізико-механічні характеристики, які зазвичай входять у розрахункову модель як задані, вважаються шуканими. Визначенню підлягають пружно-дисипативні характеристики (модуль Юнга E та коефіцієнт в'язкого демпфування c) друкованої плати, та фізико-механічні характеристики (модуль Юнга E , коефіцієнт Пуассона μ та коефіцієнтів лінійного теплового розширення α) електронних компонентів та герметиків в електронних модулях із загальною герметизацією в умовах термоударів у діапазоні $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі подано розроблення науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури, спрямованих на вирішення актуальної проблеми – зменшення напружень і деформацій та забезпечення міцності елементів конструкцій зазначених систем, за рахунок раціонального добору їх геометричних, інерційних та пружно-дисипативних параметрів на стадіях проектування, виробництва і експлуатації. Отримані результати мають суттєве значення для електронної промисловості. На основі проведених досліджень зроблено такі висновки:

1. Розвинуто теорію вібраційного захисту електронної апаратури на основі комплексного підходу до математичного моделювання вільних і кінематично-збуджуваних вимушених коливань друкованої плати із застосуванням дискретних та континуально-дискретних розрахункових моделей, яка дозволила проілюструвати істотний вплив вібрацій на умови експлуатації електронної апаратури та теоретично обґрунтувати можливість виникнення резонансних коливань друкованої плати під час експлуатації не лише на нижчій, а й на більш високих власних частотах. Усунення цих небезпечних явищ може бути здійснено лише на основі детального аналізу динамічних процесів у механічній системі плати.

2. Застосуванням методу скінченних елементів для моделювання напружено-деформованого стану і коливальних процесів у друкованій платі теоретично обґрунтовано розрахункову модель друкованої плати у вигляді багатопрогової балки із зосередженими та розподіленими масами, шарнірно-закріпленої на кінцях, що дає можливість значно спростити динамічний аналіз механічної системи.

3. Розроблено математичні моделі для інженерного розрахунку максимальних напружень та переміщень в друкованих платах в умовах резонансного збудження. Встановлено закономірності впливу геометричних та фізико-механічних параметрів друкованої плати, а також характеристик динамічних процесів, що виникають під час експлуатації блоків електронної апаратури, на максимальні напруження і деформації елементів несівної системи, що дає можливість здійснювати раціональний добір параметрів конструкцій для забезпечення міцності і необхідної жорсткості друкованої плати.

4. Запропоновано оснащення несівної системи друкованої плати демпфером сухого тертя, що дозволило зменшити динамічні навантаження, напруження і деформації друкованої плати за рахунок раціонального добору його пружно-дисипативних характеристик. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність застосування демпферу, яка складає 20,5 %. Розроблено математичну модель визначення коефіцієнту жорсткості демпферу сухого тертя, виконаного у вигляді пів-еліптичної балки прямокутного поперечного перерізу, що дає можливість проводити інженерний розрахунок його конструктивних параметрів.

5. Удосконалено технологію наскрізного монтажу електронних компонентів із зазором в 2-3 мм, за рахунок збільшення довжини монтажних виводів на друкованій платі, яка забезпечує трикратне зменшення коефіцієнта передачі деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів та підвищує стійкість елементів конструкції друкованої плати до технологічних та експлуатаційних навантажень, в порівнянні із технологією низького наскрізного, або поверхневого монтажу. Ефективність технології обґрунтовано математичним моделюванням напружено-деформованого стану конструкції друкованої плати у вигляді статично невизначуваної плоскої стрижневої системи в умовах дії експлуатаційного навантаження та підтверджено експериментально.

6. Проведено аналіз напружено-деформованого стану елементів конструкцій функціональних вузлів електронної апаратури, здійснений під дією механічних навантажень із застосуванням методів електротензометрії та акустичної емісії, який дозволив виявити, що критичними елементами конструкцій є вузли нероз'ємних, зокрема паяних та зварних, з'єднань, коефіцієнт передачі деформацій до яких від несівних конструкцій може значно перевищувати одиницю і створювати напружено-деформований стан невідповідний умовам міцності. Також удосконалена технологія визначення допустимого короблення друкованих плат забезпечує необхідну міцність та жорсткість паяних з'єднань.

7. Запропоновано акустико-емісійну методику неруйнівної діагностики міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної апаратури, зокрема їх паяних та зварних з'єднань, яка дозволяє визначити придатність несівних конструкцій електронної апаратури до експлуатації під час циклічного випробування за пульсуючим циклом механічного та пневматичного навантаження в залежності від відповідності значення таких параметрів як амплітуда та сумарний рахунок сигналів акустичної емісії до встановленого порогового рівня.

8. Удосконалено методологію аналізу напружено-деформованого стану елементів герметизованого електронного модуля у вигляді складеного товстостінного циліндра, яка враховує особливості взаємодії керамічного сердечника із композитним захисним шаром за перепаду температур фізичних тіл, яка дозволила встановити, що в матеріалі електронного компоненту і в оточуючому шарі герметика радіальні напруження досягають максимальних значень на межі їх контакту, а колові – на внутрішній поверхні кожного циліндру за відсутності перепаду температур. Запропоновано технологічні методи захисту електронних компонентів, герметизованих компаундом, від дії температурних напружень за рахунок створення додаткових пружно-дисипативних зв'язків між електронними компонентами та герметиком. Максимальні значення коефіцієнту демпфування, досягнуті застосуванням поліетиленових кембриків, становлять 3,66, а застосуванням поліхлорвінілових термозбіжних трубок – 3,42.

9. Запропоновано розрахунково-експериментальний метод пробних параметрів, який, шляхом розв'язання обернених задач міцності, дозволяє здійснювати ідентифікацію фізико-механічних характеристик друкованих плат та герметизованих модулів електронної апаратури. Ідентифікація здійснюється в режимах, які відтворюють складні, наближені до натурних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження.

10. Створено випробувально-вимірювальний комплекс призначений для визначення деформацій малогабаритних елементів конструкцій та компонентів електронної апаратури під дією механічних, температурних та пневматичних навантажень в статичному, циклічному та динамічному режимах, які відтворюють складні, наближені до натурних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження, із реалізацією методів електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відеозйомки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ковтун І. І. Деформації конструкцій електронних техніки в умовах експлуатаційних навантажень / І. І. Ковтун, В. П. Ройзман. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 230 с.

2. Ковтун І. І. Наукові та прикладні основи забезпечення міцності електронних систем під дією експлуатаційних та технологічних навантажень / І. І. Ковтун. – Хмельницький : ХНУ, 2021. – 256 с.

3. Kovtun I. Acoustic emission diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, V. Royzman, A. Voznyak // *Quality and Reliability of Technical Systems: Theory and Practice. JVE Book Series on Vibroengineering* / JVE International Ltd. – Vol. 2. – Vilnius: Lithuania, 2018. – P. 214–229. – ISSN 2351-5260. DOI: <https://doi.org/10.21595/9786099603636>.
4. Calculation of mechanical stresses in adjoint system of electronic component and compound and strength assessment / V. Royzman, S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Lokoshchenko // *Journal of Vibroengineering*. - Vilnius, 2013. – Vol. 15, Issue 1. – P. 65–71. – ISSN 1392-8716.
5. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – Kaunas : KTU, 2016. – Vol. 22, № 6. – P. 494–489. – ISSN 1392–1207. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.
6. Petrashchuk S. Solving Problem of Thermal Conduction for Providing Strength of Electronic Units on Thermal Impacts / S. Petrashchuk, I. Kovtun, A. Voznyak // *Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy. Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016): MATEC Web of Conferences* (Tomsk, April 19-21, 2016). – Vol. 72, P. 5. – eISSN 2261-236X. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167201086>.
7. Kovtun I. Stress computation and reduction by cyber-physical systems controlling printed circuit board manufacturing technology / I. Kovtun, V. Royzman // *Book Chapter: Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0, Studies in Systems, Decision and Control*. – 2021. – Vol. 342. – P. 49–60. – ISSN 2198-4182. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-66081-9_4.
8. Kovtun I. Mathematical modeling of stress in circuit cards represented by mechanical oscillatory systems / I. Kovtun, A. Goroshko, S. Petrashchuk // *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2022. – Vol. 16, Iss. 1. – P. 303–315. – ISSN 2299-8624 DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/144574>.
9. Kovtun I. Design of Dry Friction Damper to Reduce Vibration Impacts to Circuit Cards at Critical Frequencies / I. Kovtun, A. Goroshko, S. Petrashchuk // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2024. – Vol. 18, Issue 2. – P. 78-87. – ISSN 2299-8624. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/184026>.
10. Theory and practice of vibration analysis in electronic packages / Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S., Kałaczyński T. // *The 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles : MATEC Web of Conferences* (Bydgoszcz, September 25-26, 2018). – Vol. 182 (02015). – 10 p. – eISSN 2261-236X. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202015>.
11. Methods for Vibration Reduction in Enclosed Electronic Packages / Igor Kovtun, Juliy Boiko, Svitlana Petrashchuk, Tomasz Kałaczyński // *The 18th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. Diagnostics of Various Technical Objects : MATEC Web of Conferences* (Bydgoszcz, December 12, 2019). – Vol. 302, 10 p. – eISSN 2261-236X. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201930201008>.
12. Design of elastic and dissipation joints in bearing structures of electronic packages / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, M. Liss// *The 20th International*

Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. Hybrid Multimedia Mobile Stage: MATEC Web of Conferences (Bydgoszcz-Poledno, December 1–2, 2021). – Vol. 351. – P. 11. – eISSN 2261-236X. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202135101012>.

13. Камбург В. Г. Моделирование температурных полей в сложных микромодулях, герметизируемых компаундом / В. Г. Камбург, С. А. Григоренко, И. И. Ковтун // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ХНУ, 2000. – №6, ч. 3: Спец. випуск. – С. 10-13.

14. Ройзман В. П. Ідентифікація фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ТУП, 2002. – № 4, ч. 1. – С. 18-24.

15. Ройзман В. П. Розрахунок напружень в системі компаунд-електронний елемент при термоударах / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ТУП, 2002. – № 1. – С. 189-195.

16. Ройзман В. П. Забезпечення термоміцності пасивних електронних елементів в вузлах з загальною герметизацією компаундом / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький : ТУП, 2002. – № 6, ч. 1. – С. 234-236.

17. Ройзман В. П. Забезпечення завадостійкості дротяних малобазних тензорезисторів для вимірювання дійсних значень деформацій виробів електронної техніки / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, О. К. Білик // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 6, т. 1. – С. 234-238.

18. Вплив технології формування виводів дискретних компонентів на передачу деформацій від об'єднувальної плати / Ю. М. Бойко, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук, Р. В. Тертичний // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Радіотехніка, електроніка та телекомунікації. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 5. – С. 73-78.

19. Kovtun I. Acoustic emission application for nondestructive strength diagnostics of printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 1 (257). – С. 12-17.

20. Методи неруйнівної діагностики надійності герметизації модулів надвисоких частот / Ю. М. Бойко, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук, О. В. Ковальчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 6, т. 1. – С. 227-233.

21. Ройзман В. П. Оцінка вібрацій в конструкціях блоків радіоелектронної апаратури під дією зовнішнього динамічного навантаження / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, Б. О. Жухоров // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 6, т. 1. – С. 26-31.

22. Ковтун І. І. Вплив герметизації на виникнення та передачу температурних деформацій електронних модулів / І. І. Ковтун, С. А. Петрашук, Ю. М. Бойко //

Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2022. – № 3. – С. 150-157.

23. Горошко А. Підвищення точності вібраційного аналізу друкованих плат бортової електроніки / А. Горошко, І. Ковтун, М. Зембицька / Вісник ХНУ. Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2022. - С. 301-306.

24. Ковтун І. І. Вібраційні випробування та захист несівних конструкцій електронної апаратури на різних рівнях конструктивної складності // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2023. – № 5, т. 2. – С. 182-191.

25. Ковтун І. І. Математичне моделювання вільних і кінематично збуджуваних коливань друкованої плати електронної апаратури / І. І. Ковтун, А.Р. Біловус// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2024. – № 3, т. 2. – С. 467-479.

26. Пат. 150735 У Україна, МПК F16F15/00 H05K7/12. Пристрій зниження динамічних напружень та деформацій друкованих плат/ Ковтун І. І., Горошко А. В.; Петрашук С. А., Бойко Ю. М. ; заявник і патентотримувач Хмельниц. нац. ун-т. – № u 202105920 ; заявл. 21.10.2021 ; опубл. 06.04.2022, Бюл. № 14. - 5 с. : іл.

27. Silin R. I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R. I. Silin, V. P. Royzman, I. I. Kovtun // Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, (Tianjin, China, 1–4 April 2004). – Tianjin, 2004. – P. 2217–2221.

28. Kovtun I. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Proceedings of the Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2017), (Odessa, Ukraine, 11-15 September, 2017). – P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2017.8095401>.

29. Boiko J. Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design / J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk // Proceedings of the First Ukraine IEEE international Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON - 2017), (Kiev, 29 May – 2 June, 2017). – P. 514–517 DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100294>.

30. Kovtun I. Stress estimation for encapsulated electronic packages subjected to thermal impacts / Kovtun I., Petrashchuk S., Boiko J. / Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), (Odessa, 10–14 September, 2018). – P. 5. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047514>.

31. Kovtun I. Nondestructive hermetic seal diagnostics and prediction method for super-high-frequency modules / I. Kovtun; J. Boiko; S. Petrashchuk // The 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics. Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), (Lviv – Slavske, 20–24 February, 2018). – P. 776 – 780. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336314>.

32. Kovtun I. Identification of natural frequency and form of oscillation for electronic packages subjected to vibration / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Proceedings of the 38th IEEE International Conference on Electronics and

Nanotechnology (ELNANO), (Kiev, 24–26 April, 2018). – P. 621–626. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477492>.

33. Kovtun I. Thermal stress in encapsulated electronic packages / I. Kovtun, S. Petrashchuk, J. Boiko // Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), (Odessa, Ukraine, 9–13 September, 2019). – P. 6. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165520>.

34. Kovtun I. Assessing Enclosure Case Design on Excitation and Transmission of Vibration in Electronic Packages / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Proceedings of the 2nd IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), (Lviv, July 2–6, 2019). – P. 265–270. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879782>.

35. Kovtun I. Mathematical model for dynamic force analysis of printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Journal of Physics: Conference Series, The First International Conference on Advances in Smart Sensor, Signal Processing and Communication Technology (ICASSCT 2021), (Goa, India, March 19–20, 2021). – P. 1–8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1921/1/012120>.

36. Kovtun I. Mathematical Model for Dynamic Strength and Stiffness Control in Printed Circuit Boards // I. Kovtun, A. Goroshko, S. Petrashchuk // Proceedings of the 25th International scientific conference «Mechanika 2021», (Kaunas, Lithuania, May 21, 2021). – Kaunas: KTU, 2021. – P. 28–29. DOI: <https://mechanic.ktu.edu/mechanika-2021/#Section-A>.

37. Kovtun I. Deformations in structures of electronic systems under external impacts / I. Kovtun, S. Petrashchuk, J. Boiko // Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2021), (Kiev, November 29 – December 3, 2021). – P. 304–309. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716709>.

38. Ройзман В. П. Термопрочность компаундированных пассивных электронных элементов / В. П. Ройзман, И. И. Ковтун, С. А. Петрашук // Современные информационные и электронные технологии : сб. праць третьої міжнар. наук.-практ. конф. (СИЭТ 2002), (Одеса, 20–24 травня 2002 р.). – Одеса : Одеський політехнічний університет, ОАО «Нептун», 2002. – С. 145.

39. Петрашук С. А. Определение физико-механических характеристик полимерных материалов методом идентификации / В. П. Ройзман, С. А. Петрашук, И. И. Ковтун // Повышение качества, надежности и долговечности технических систем и технологических процессов : сб. трудов VI междунар. науч. техн. конф., (Хургада, Египет, 2–9.12.2007 г.). – Хмельницкий : ХНУ, 2007. – С. 110–114.

40. Petrashchuk S. Theoretical and experimental evaluation of strain in compounded electronic components under thermal impact / Svitlana Petrashchuk, Igor Kovtun // Proceedings of the International Conference on Science and Education, (Colombo, Sri Lanka, February 12–22, 2010). – Khmelnytskyi : KHNU, 2010. – P. 79–84.

41. Горошко А. В. Диагностика технического состояния изделий радиоэлектроники методом акустической эмиссии / А. В. Горошко, И. И.

Ковтун, А. Т. Богорош // Наука і освіта : зб. праць міжнар. наук. метод. семінару, (Дубай, ОАЕ, 13–20 грудня 2011 р.). – Хмельницький : ХНУ, 2011. – С. 38-41.

42. Ковтун І. І. Проблема міцності та надійності експлуатації виробів радіоелектроніки, закріплених на об'єднувальних платах, в умовах деформацій, що виникають від дії зовнішнього силового навантаження, та захист від нього / І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Сучасні досягнення в науці і освіті : зб. праць XI між нар. наук. конф., (Іерусалим, Ізраїль 28 вересня – 5 жовтня 2016 р.). – Хмельницький : ХНУ, 2016. – С. 76-84.

43. Ковтун І. І. Вибір та характеристика методу для неруйнівної діагностики міцності паяних з'єднань друкованих плат / І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Наука і освіта : зб. праць X Міжнар. наук. конф. (Рим, Італія, 27 квітня – 4 травня 2017 р.). – Хмельницький : ХНУ, 2017. – С. 24-32.

44. Неруйнівне діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів електронних модулів НВЧ / Ю. М. Бойко, В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук // Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки : V Міжнародна науково-практична конференція «Зброя та безпека 2017», (Київ, 11–12 жовтня 2017 р.). – Київ : МВЦ. – С. 223-225.

45. Ковтун І. І. Визначення навантаження та деформацій, що приводять до руйнування контактних ділянок керамічних конденсаторів / І. І. Ковтун, Ю. М. Бойко, С. А. Петрашук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конф., (Одеса, 8–13 червня 2017 р.). – Одеса : Одеська нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова, 2017. – С. 192–194.

46. Kovtun I. I. Acoustic emission application for nondestructive solder joint diagnostics / I. I. Kovtun, S.A Petrashchuk // Science and education : proceedings of the XII International Conference, (Oslo, Norway, 1–10 July, 2018). – Khmel'nitskiy : KHNNU, 2018. – P. 3–13.

47. Kovtun I. I. Natural frequency estimation for electronic packages subjected to vibration / I. I. Kovtun, S. A. Petrashchuk // Modern Achievements of Science : proceedings of the XIII international conference, (Netanya, Israel, September 6–13, 2018). – Khmel'nitskiy : KHNNU, 2018. – P. 142–148.

48. Ковтун И. И. Расчет и снижение напряжений в печатных платах под действием внешней нагрузки / И. И. Ковтун, В. П. Ройзман // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов 33-й междунар. науч. конф., (Казань, 14 – 18 сентября 2020 г.). – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2020. – С. 96-99.

49. Kovtun I. Dynamic Strength and Stiffness Assessment of Circuit Cards with Respect to Their Geometric Parameters / I. Kovtun, A. Goroshko, S. Petrashchuk // Сучасні досягнення у науці та освіті : зб. пр. XVI Міжнар. наук. конф., 1 – 8 листоп. 2021 р., м. Нетанія (Ізраїль). – Хмельницький : ХНУ, С. 100-103.

50. Пат. 41138 А Україна, МКИ G 01 N 29/04. Пристрій для визначення координат джерела акустичної емісії / С. В. Прохоренко, В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, А. В. Горошко ; заявник та патентовласник Хмельн. нац. ун-т. – №

2001031425 ; заявл. 01.03.2001 ; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7. – 3 с. : іл.

51. Пат. 51981 А Україна, МПК G 01 N 29/04. Спосіб визначення координат дефектів методом акустичної емісії // В. П. Ройзман, А. В. Горошко, І. І. Ковтун ; заявник та патентовласник Хмельн. нац. ун-т. – № 2001128312 ; заявл. 04.12.2001 ; опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12. – 3 с. : іл.

52. Kovtun I. Reliability improvement of printed circuit boards by designing methods for solder joint technical diagnostics with application of acoustic emission method / I. I. Kovtun, J. M. Boiko, S. A. Petrashchuk // Visnyk NTUU KPI. Seriia: Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia. – Kyiv : NTUU KPI, 2019. – Iss. 79. – P. 60-70.

53. Strength of electronic components encapsulated with compound under thermal impacts / J. Boiko, S. Petrashchuk, I. Kovtun, O. Reryuk // Вісник Університету «Україна». Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. – Київ, 2019. – № 2 (23). – С. 142-150.

54. Ковтун І. І. Оцінка міцності та жорсткості конструкції друкованих плат в умовах динамічних навантажень / І. І. Ковтун, А. В. Горошко, С. А. Петрашук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький : ХНУ, 2021. – № 1. – С. 113-120.

55. Ковтун І. І. Неруйнівна діагностика міцності нероз'ємних елементів конструкцій електронної техніки / І. І. Ковтун, А. В. Горошко, С. А. Петрашук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький : ХНУ, 2022. – № 2. – С. 95-102.

АНОТАЦІЯ

Ковтун І. І. Розроблення науково-прикладних засад динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 «Динаміка та міцність машин». – Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, 2025.

У дисертаційній роботі розроблено науково-прикладні засади динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури, спрямовані на вирішення актуальної проблеми – зменшення напружень і деформацій та забезпечення міцності елементів конструкцій зазначених систем, за рахунок раціонального добору їх геометричних, інерційних та пружно-дисипативних параметрів на стадіях проєктування, виробництва і експлуатації.

Розвинуто теорію вібраційного захисту електронної апаратури на основі комплексного підходу до математичного моделювання динамічних процесів та напружено-деформованого стану у несівних конструкціях електронної апаратури, для чого здійснено: розрахунок власних частот і форм коливань плати, а також визначення амплітудно-частотних характеристик кінематично-збуджуваних коливань системи; порівняльний аналіз результатів досліджень коливальних явищ із застосуванням дискретних та континуально-дискретних розрахункових моделей друкованої плати; побудовано наближену математичну модель вільних і вимушених коливань друкованої плати з масивним електронним компонентом і обґрунтовано доцільність її практичного застосування; аналіз внутрішніх зусиль і напружень в елементах конструкції друкованої плати за дії динамічних навантажень; дослідження вільних і вимушених коливань механічної системи друкованої плати методом імітаційного моделювання; оцінку ефективності застосування демпферу сухого тертя та обґрунтовано раціональний добір його пружно-дисипативних характеристик для покращення напружено-деформованого стану друкованих плат в умовах резонансного збудження; аналіз внутрішніх зусиль і напружень в елементах конструкції друкованої плати під час її випробувань в умовах статичного навантаження та в елементах конструкції із загальною герметизацією в умовах дії температурних навантажень.

Здійснено модифікацію методів експериментального визначення напружень і деформацій та їх адаптація до дослідження параметрів напружено-деформованого стану малогабаритних елементів конструкцій під дією навантажень, які відтворюють складні, наближені до натурних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження, із реалізацією методів електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відеозйомки.

Проведено експериментальну перевірку основних результатів теоретичних досліджень та обґрунтування методів зменшення напружень і деформацій та забезпечення міцності елементів несівних конструкцій електронної апаратури в умовах дії технологічних та експлуатаційних навантажень. Експериментально

підтверджено: збільшення коефіцієнту передачі вібрацій до друкованих плат із зменшенням жорсткості елементів несівних конструкцій, це підтверджує висновок про те, що конструкційне демпфування, обумовлене дією сили сухого тертя під час взаємного зміщення поверхонь контакту, перевершує демпфування, зумовлене силами внутрішнього в'язкого тертя в матеріалі деталей; ефективність застосування демпферу сухого тертя – зменшення максимальних динамічних напружень і прогинів, яка сягає 20,5 % та 25,9 % відповідно; ефективність технології високого наскрізного монтажу електронних компонентів, яка забезпечує майже трикратне зменшення коефіцієнта передачі деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів; більш ніж двократне зменшення передачі деформацій від основи друкованих плат до електронних компонентів завдяки загальній герметизації компаундом, проте герметизація створює додаткові напруження в умовах перепадів температур, які досягають максимальних значень при усталеному перепаді температур; наявність пластичних деформацій, або актів руйнування та розвитку дефектів паяних та зварних з'єднань в умовах циклічного навантаження за відсутності ефекту Кайзера (прояву сигналів акустичної емісії при повторному навантаженні).

Розроблено низку прикладних рекомендацій, спрямованих на зменшення напружень і деформацій та на забезпечення міцності несівних конструкцій електронної апаратури, до яких відносяться інженерні розрахункові методи оцінки динаміки та міцності несівних систем електронної апаратури, конструктивні та технологічні методи забезпечення міцності деталей та вузлів електронної апаратури та методи ідентифікації фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій електронної апаратури з урахуванням дії технологічних та експлуатаційних навантажень. Отримані результати мають суттєве значення для електронної промисловості.

Ключові слова: несівні системи електронної апаратури, дискретні і континуально-дискретні розрахункові моделі, технологічні та експлуатаційні навантаження, вільні і кінематично збуджувані вимушені коливання, динаміка, міцність та віброзахист електронної апаратури.

SUMMARY

Kovtun I. I. Development of scientific and applied fundamentals of dynamics and strength of bearing systems in electronic equipment – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences on the specialty 05.02.09 "Dynamics and strength of machines". – National University "Lviv Polytechnic" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation represents development of scientific and applied fundamentals of the dynamics and strength of bearing systems in electronic equipment, aimed at reducing stress and deformation and providing strength for structural elements of those systems by rational selection of their geometric, inertial and elastic-dissipative parameters in stages of design, manufacturing, and operation.

The dissertation has introduced the theory for vibration protection of electronic equipment, based on complex approach to mathematical modeling and the range of applied recommendations including engineering calculation, design, technological and identification methods, with consideration of technological and operational impacts. The obtain results are significant for electronic industry.

Keywords: electronic equipment bearing systems, discrete and continuous-discrete calculation models, technological and operational impacts, free and kinematically excited forced vibrations, dynamics, strength and vibration protection of electronic equipment.