
Ковтун І.І., Ройзман В.П.

**Деформації
конструкцій електронної техніки
в умовах експлуатаційних навантажень**

Хмельницький 2019

УДК 620.172.21:621.396.6.019.5
ББК 31-3:32.884
К56

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Хмельницького національного університету,
протокол № 3 від 31.10.2019*

Рецензенти:

- О. Г. Шайко-Шайковський** – д-р техн. наук, проф. кафедри професійної та технологічної освіти і загальної фізики Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича;
- І. С. Катеринчук** – д-р техн. наук, проф. кафедри телекомунікацій та радіотехніки Національної академії Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького (м. Хмельницький);
- Ю. М. Бойко** – д-р техн. наук, проф. кафедри телекомунікацій та радіотехніки Хмельницького національного університету

Матеріали подані в авторській редакції

Ковтун І. І., Ройзман В. П.

К56 Деформації конструкцій електронної техніки в умовах експлуатаційних навантажень / І. І. Ковтун, В. П. Ройзман. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 230 с.
ISBN 978-966-330-362-8

Досліджена міцність електронних систем шляхом виявлення, оцінки та зниження руйнівних деформацій структурно-складних конструкцій під дією експлуатаційних і технологічних навантажень. Розглянута теорія утворення та модифікації пружно-дисипативних механічних зв'язків між конструктивними елементами як ланками передачі деформацій всередині і ззовні виробу.

Для фахівців галузі конструювання та технології радіоелектронних засобів, інженерних працівників, студентів та аспірантів ЗВО.

УДК 620.172.21:621.396.6.019.5
ББК 31-3:32.884

ISBN 978-966-330-362-8

© Ковтун І. І., Ройзман В. П., 2019
© ХНУ, оригінал-макет, 2019

Перелік умовних скорочень

АЕ	– акустична емісія;
АПЦ	– аналого-цифровий перетворювач;
ВЕТ	– вироби електронної техніки;
ГЗ	– генератор звуковий;
ГТІ	– генератор тактових імпульсів;
ДП	– друкована плата;
ЕК	– електронні компоненти;
ЕС	– електронна система;
ЕТ	– електронна техніка;
НВЧ	– надвисокі частоти;
НДС	– напружено-деформований стан;
НК	– неруйнівний контроль;
ПВ	– періодичні випробування;
ПЕП	– п'єзоелектричний перетворювач;
ПЗ	– паяне з'єднання;
РЕА	– радіоелектронна апаратура;
РЕЗ	– радіоелектронний засіб;
РЧП	– різниця часу приходу;
ТУ	– технічні умови;
N	– сумарна кількість сигналів АЕ;
\dot{N}	– активність сигналів АЕ;
A	– амплітуда;
S	– сумарна амплітуда;
W	– потужність подій АЕ;
E_{AE}	– енергія АЕ;
P	– механічне навантаження;
$\sigma = \varepsilon \cdot E$	– механічне напруження;
ε	– відносна деформація;
E	– модуль Юнга;
μ	– коефіцієнт Пуассона;
X_i	– внутрішні сили опору;
M_{max}	– максимальний внутрішній згинальний момент;
W_{oc}	– осьовий момент опору;

σ_B	- границя міцності;
n	- коефіцієнт запасу міцності;
$[\sigma]$	- допустиме напруження;
K	- коефіцієнт прогнозування міцності;
K_d	- коефіцієнт динамічності;
a	- віброприскорення, віброперевантаження;
w	- коефіцієнт передачі вібрацій;
$z(t) =$ $z_0 \sin \Omega t$	- закон гармонійних коливань;
$mz_0 \Omega^2$	- інерційна збурювальна сила;
z_i	- вертикальне переміщення мас m_i ;
$F_k = k \cdot \Delta z$	- сила пружності;
k	- коефіцієнт жорсткості;
Δz	- деформація пружини;
$F_C = c \cdot \Delta z'$	- сила згасання;
c	- коефіцієнт згасання;
ω_0	- циклічна частота власних коливань маси;
$z = z(x, y,$ $t)$	- рівняння середньої поверхні пластини;
ρ	- щільність матеріалу;
g	- прискорення вільного падіння;
D	- циліндрична жорсткість;
q	- інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження.

Вступ

Структурно складні конструкції, які забезпечують електричні контакти, механічну підтримку та захист електронних систем від зовнішнього впливу стають передумовою виникнення деформацій в їх елементах під дією експлуатаційних та технологічних факторів. Виникнення та передача деформацій на різних рівнях конструктивної складності відбувається через механічний зв'язок і взаємодію елементів конструкції і, створюючи механічне напруження, нерідко виявляється причиною руйнування електричних кіл та втрати працездатності вузлів, блоків та систем електронної техніки. Проблема забезпечення механічної міцності стала в один ряд із традиційними задачами надійності в електроніці, особливо в умовах сучасної тенденції до зниження ваги та отримання більшої щільності монтажу в малих габаритах виробів електронної техніки, таким чином вироби, які володіють високими електронними характеристиками виявились не достатньо механічно міцними.

Відомо, що якість і надійність електронної техніки забезпечується конструкцією, технологією виготовлення і контролем вихідних параметрів. Підвищені вимоги якості пред'являють до техніки, яка використовується в жорстких умовах експлуатації, і відмова якої може призвести до тяжких наслідків. Серед експлуатаційних факторів розглянута дія статичних та динамічних механічних, атмосферних та теплових навантажень; також розглянута дія технологічних факторів, таких як способи та режими технології монтажу електронних компонентів, короблення монтажних плат, способи герметизації та демпфування вузлів та блоків електронної техніки.

Серед багатьох відомих методів захисту електронної техніки від дії зовнішніх факторів, зокрема деформацій, вібрацій, ударів, широкого діапазону температур та перепадів атмосферного тиску, можна виділити ті, які працюють за такими принципами як ізоляція та/або поглинання вказаних факторів, наприклад: герметизація в жорсткому корпусі; герметизація заливкою або покриттям; віброізоляція та вібродемпування тощо. Проте надійний захист не може бути досягнутий лише одним із розглянутих методів, а можливий тільки при використанні комплексу методів.

З огляду на сучасні тенденції конструювання та технології виробництва електронної техніки актуальною є оцінка впливу конструкторсько-технологічних особливостей несівних конструкцій електронної техніки на виникнення та передачу статичних та динамічних деформацій при їх експлуатації, а також розробка ефективних методів їх зниження шляхом створення і модифікації пружно-дисипативних механічних зв'язків між конструктивними елементами, що виявляються ланками передачі деформацій, як всередині несівних конструкцій модулів та блоків електронної техніки, так і поза ними.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено та вирішено низку науково-практичних завдань, а саме:

- узагальнення результатів наукових досліджень напружено-деформованого стану та забезпечення міцності деталей, вузлів та блоків електронної техніки на етапах проектування, виробництва, випробування та експлуатації;
 - розробка нових методик та модифікація апаратури і засобів для вимірювання та
-

оцінки деформацій малогабаритних елементів конструкцій та компонентів електронної техніки під дією статичних і динамічних механічних, теплових та атмосферних навантажень, які відтворюють складні, наближені до експлуатаційних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження, із реалізацією методів електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відеозйомки;

– оцінка виникнення та передачі деформацій в конструкціях друкованих плат під впливом технології та способів монтажу електронних компонентів та розробка способів та засобів неруйнівної діагностики міцності друкованих плат;

– виявлення напружено-деформованого стану несівних конструкцій корпусів модулів надвисоких частот під дією надмірного внутрішнього тиску та температури в статичному та динамічному режимі навантаження та розроблення методів неруйнівної діагностики їх міцності та герметичності;

– розробка теоретичних і експериментальних методів дослідження передачі динамічних деформацій в структурно-складних конструкціях блоків електронної техніки під дією зовнішніх динамічних навантажень;

– розробка теорії та практики ефективного захисту друкованих плат від динамічних деформацій шляхом створення і модифікації пружно-дисипативних механічних зв'язків між конструктивними елементами, що виявляються ланками передачі деформацій, як всередині несівної конструкції блоків електронної техніки, так і поза нею.

Результати, представлені у монографії, є узагальненням досліджень, які виконувались у Хмельницькому національному університеті відповідно до таких держбюджетних тем: «Розробка акусто-емісійного комплексу та його застосування для неруйнівного контролю, діагностики та прогнозування міцності нових матеріалів та деталей нафтогазового обладнання», номер держреєстрації 0197U016018; «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», номер держреєстрації 0100U001979; «Розробка новітніх технологій, що забезпечують підвищення міцнісної надійності машин та їх електронного обладнання», номер держреєстрації 0104U002103; «Забезпечення міцності і герметичності модулів, герметизованих компаундом, при термоударах», номер держреєстрації 0111U002304; «Дослідження електрокерованих нанорозмірних компаундів і можливості їх застосування в безрезонансних кріпильних пристроях для тестування виробів електронної техніки на вібро- та удароміцність», номер держреєстрації 0111U006775; «Множинні зворотні задачі механіки структурно-складних технічних систем», номер держреєстрації 0113U002064; «Розвиток наукових та інженерних основ надійності електронної техніки шляхом удосконалення технології її тестування на вібрації та удари», номер держреєстрації 0115U000225; «Розробка наукових основ захисту виробів радіоелектроніки, закріплених на об'єднувальних платах, від деформацій плат, а плат від динамічних і теплових навантажень, номер держреєстрації 0117U001168.

Розділ 1.

Аналіз методів оцінки напружено-деформованого стану та міцності не- сівних конструкцій електронної техніки

Розділ присвячено постановці задач дослідження на основі узагальнення результатів наукових досліджень напружено-деформованого стану та забезпечення міцності деталей, вузлів та блоків електронної техніки (ЕТ) на етапах проектування, виробництва, випробування та експлуатації. В розділі здійснено огляд, аналіз та обґрунтування методів та засобів експериментального дослідження деформацій виробів електронної техніки (ВЕТ), розрахунково-експериментальних методів визначення напружено-деформованого стану, методів оцінки та забезпечення міцності об'єктів дослідження, в умовах статичного та динамічного навантаження. При аналізі причин відмов електронної техніки, традиційно вважається [1–4], що 40–45 % відмов в експлуатації відбуваються через помилки, які допускаються на етапі проектування, 20 % – обумовлюється недосконалістю технологічних процесів виготовлення, та технологічної дисципліни, 30 % – викликане неправильними режимами експлуатації та порушенням правил технічного обслуговування і 5–7 % – від зношування складових частин і старіння матеріалів, проте не враховується взаємозв'язок вказаних етапів, чого вимагає рішення проблем забезпечення якості.

Розвиток електронної промисловості [5, 6] свідчить про загальну тенденцію об'єднання та все більшої інтеграції виконуючих функцій разом із мікромініатюризацією ВЕТ, та використанням в конструкціях нових матеріалів з недостатньо вивченими властивостями і сполученням різнорідних матеріалів. Наслідком цього є різке ускладнення конструкцій сучасних виробів і технологічних процесів їх виготовлення, що практично не допускає коригування їх структури і параметрів в процесі виготовлення і різко зменшує можливість експериментального доведення виробів: налагодження та оптимізації.

На сьогодні в процесі проектування і доведення ЕТ часто розглядаються лише їх електричні параметри [7–11] без необхідних розрахунків на міцність, вимірювання деформацій і оцінки напруженого стану конструкцій в цілому і їх окремих елементів. Отже, сучасні вимоги і майбутнє електроніки та області її використання, висувають в один ряд із чисто електронними завданнями проблему забезпечення механічної міцності і надійності.

Журнальні статті з цієї тематики [12–18] дають уривчасті відомості. Разом з тим використання публікацій ускладнюється відсутністю загальноприйнятої термінології і методики вимірювання внутрішніх напружень. На противагу багатьом іншим галузям техніки, в електроніці не існує норм міцності на вироби електронної техніки, тобто збірника керівних документів щодо забезпечення міцної надійності та витривалості, за якими повинно вестись проектування, розрахунки, випробування та впровадження в серійне виробництво і експлуатацію виробів електронної промисловості.

Розділ 2.

Методи експериментального дослідження де-формацій деталей і вузлів електронної техніки

Тенденція до зниження ваги та отримання більшої щільності монтажу в малих габаритах виробів електронної техніки привела до того, що такі вироби, що мають високими електронними характеристиками виявились недостатньо механічно міцними. Внаслідок дії статичних та динамічних навантажень елементи їх конструкцій руйнуються, що приводить до відказів окремих вузлів або апаратури в цілому. При експлуатації електронні компоненти і функціональні вузли можуть працювати при температурі від $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, з вібраційними частотами від 5 до 5000 Гц при прискоренні до 40 g, піддаватися ударам з прискоренням до 120 g, відносна вологість може змінюватися від 5 до 100 %, атмосферний тиск – у межах від 0 до 10 атм. У деяких випадках ці дії можуть бути ще більш жорсткими.

Таким чином, в сучасній електроніці в один ряд із чисто схемними задачами стає проблема розробки обґрунтованих методик розрахунків на статичну, динамічну, втомну міцність типових елементів та вузлів, опрацювання інструкцій по проведенню статичних та динамічних випробувань, визначення вимог до механічних властивостей матеріалів, що застосовуються, та порядку отримання і обробки даних, розробка рекомендацій по контролю, діагностиці і прогнозуванню міцності в експлуатаційних, та технологічних умовах.

Перш ніж торкнутися вказаних питань, доцільно розглянути специфіку експериментального вивчення статичної та динамічної міцності сучасних виробів електроніки. Задачею цього розділу було розробка нових методик та модифікації апаратури і засобів вимірювання для вимірювання та оцінки деформацій малогабаритних елементів конструкцій та компонентів електронної техніки під дією статичних та динамічних механічних, теплових та атмосферних навантажень, які відтворюють складні, наближені до експлуатаційних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження, із реалізацією методів електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відеозйомки.

Вимірювальний комплекс, структурна схема якого представлена на рис. 2.1, складається із трьох вимірювальних систем: тензометричного, акустико-емісійного та вібраційного контролю.

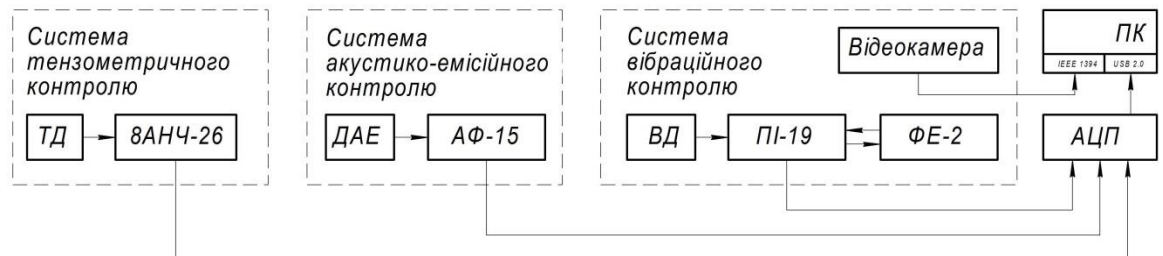


Рис. 2.1. Блок-схема вимірювального комплексу для експериментального дослідження виробів електронної техніки

Апаратура та обладнання використана в комплексі:

- 8АНЧ-26 – станція тензометрична;
- АФ-15 – прилад акусто-емісійний;
- ПІ-19 – прилад віброметричний та блок ФЕ-2 – фільтри електричні об'єднані в один пристрій вимірювання прискорення ППУ-1М.

- ТД, ДАЕ, ВД – датчики тензометричні, акусто-емісійні та вібраційні, відповідно.

Сполучення вимірювальних приладів комплексу із персональним комп'ютером здійснено через модуль АЦП універсальний з інтерфейсом USB 2.0. Технічні характеристики модулю представлені в таблиці А.1 (додаток А). Відеокамера підключена до послідовної високошвидкісної шини FireWire – стандарт IEEE 1394.

У розділі приводиться опис тільки вимірювального комплексу, хоча експериментальні дослідження проводяться із використанням випробувального обладнання, яке буде описано у відповідних розділах далі.

Розділ 3.

Монтажні деформації та неруйнівна діагностика міцності конструкцій друкованих плат

Одним з основних вузлів сучасної електронної апаратури є друкована плата, на яку встановлюють дискретні та інтегральні електронні компоненти, розніми, провідники та інші конструктивні елементи. Друкована плата (ДП) складається із основи – пластини, виконаної із діелектрика (склотекстоліту, текстоліту, гетинаксу, ситалу тощо), на поверхні або/і в середині якої сформовано хоча б один шар з провідними доріжками. На основу плати монтуються електронні компоненти (ЕК), які з'єднуються своїми виводами із елементами провідного рисунка (контактними площадками) [137–139]. Основним методом отримання електричних з'єднань, а також кріплення компонентів в вузлах і блоках електронних систем, залишається на сьогоднішній день пайка або, значно рідше, зварювання.

Зокрема, паяні з'єднання (ПЗ) представляють собою широкий клас нерознімних з'єднань, утворення яких здійснюється в результаті взаємодії матеріалів деталей із матеріалом припою [99, 140]. Кристалізація, тобто затвердіння припою утворює електричний контакт та жорсткий механічний зв'язок між ДП та ЕК забезпечуючи їх підтримку на платі. Завдяки механічному зв'язку, який представляє собою жорстке і нерухоме заземлення двох або більше виводів ЕК, виникає взаємодія основи друкованої плати з тілами ЕК через вузли паяних з'єднань, які виступають тепер механічними в'язями. В свою чергу, заземлення виводів ЕК створює передумови для виникнення та передачі деформацій у всіх ланках механічного зв'язку, тобто в основі друкованої платі, електронних компонентах, контактних вузлах та виводах. Такі деформації, та відповідно напруження, виникають в результаті дії як експлуатаційних факторів, так і технології монтажу і слід зазначити, що саме вони не рідко виявляються причиною руйнування електричних ланцюгів та втрати працездатності електронних вузлів і модулів.

Завданнями дослідження розділу є оцінка впливу технології і способів монтажу компонентів на виникнення та передачу деформацій в конструкції друкованих плат, розробка способів та засобів неруйнівної діагностики міцності паяних з'єднань друкованих плат. Для експериментального дослідження впливу технології і способів монтажу електронних компонентів на виникнення та передачу деформацій від основи друкованої плати до встановлених електронних компонентів використані методи механічного навантаження, електротензометрії та акустичної емісії.

Розділ 4.

Експлуатаційні деформації та діагностика міцності несівних конструкцій герметичних корпусів електронної техніки

Якість і надійність електронної апаратури забезпечується її конструкцією, технологією виготовлення і контролем її вихідних параметрів. Особливо це стосується техніки, яка використовується в авіації і космонавтиці, відмова якої може призвести до тяжких наслідків. Жорсткі умови експлуатації, зокрема широкий діапазон температур, знижений атмосферний тиск, вібрації і т.п., пред'являють до техніки підвищені вимоги.

У цьому розділі представлені результати досліджень надійності герметизації і міцності корпусів модулів надвисоких частот (НВЧ) різних класів (типорозмірів і конструкцій вузла герметизації) [169–173].

Задачі дослідження:

– створення стенда для випробувань корпусів модулів НВЧ під дією тиску та температури;

– визначення впливу надмірного внутрішнього тиску та температури на міцність і герметичність зварних і паяних корпусів НВЧ в статичному та динамічному режимі навантаження.

– розробка методики неруйнівного діагностування та прогнозування міцності і герметичності корпусів НВЧ з використанням методу акустичної емісії.

– розробка способу неруйнівного контролю міцності та попередження небезпечних станів корпусів НВЧ в умовах перепадів внутрішнього тиску за пульсуючим циклом.

Методи дослідження включають методи випробування корпусів під дією надлишкового внутрішнього тиску та температури в статичному та динамічному режимі навантажень, та вимірвальні методи, зокрема: манометричний – для оцінки надлишкового тиску розгерметизації; бульбашковий – для виявлення місць розгерметизації; тензометрії – для вимірювання деформації корпусів НВЧ та оцінки нормальних напружень, які виникають залежно та під дією надлишкового тиску; акустичної емісії – для виявлення дефектів у всьому об'ємі об'єкта дослідження при зміні внутрішнього тиску та слідкувати за динамікою їх розвитку.

Комплексне використання зазначених методів дозволяє, виконати необхідний обсяг досліджень з контролю герметичності корпусів НВЧ.

Об'єктами дослідження були корпуси модулів НВЧ спеціального призначення (див. рис. 4.1), зокрема ті, які використовують в авіаційних, морських і наземних системах навігації, керування і захисту сучасних надзвукових літаків, військового, цивільного та подвійного призначення. Електрична схема модуля монтується на друкованій платі, яка розміщується в герметичному титановому або магнієвому, алюмінієвому чи скляному корпусі, кришки якого приварюють лазерним зварюванням або припаюють до основи. При цьому герметичність за швидкістю витоку гелію повинна складати не більше $5 \cdot 10^{-2}$ Па·см³/с.

При зльоті і польоті на великій висоті зовнішній атмосферний тиск повітря, що оточує корпус, стає значно нижче атмосферного тиску на землі, який також знаходиться всередині корпусу. Таким чином, корпус піддається дії внутрішнього тиску, який є надмірним порівняно із низьким зовнішнім.

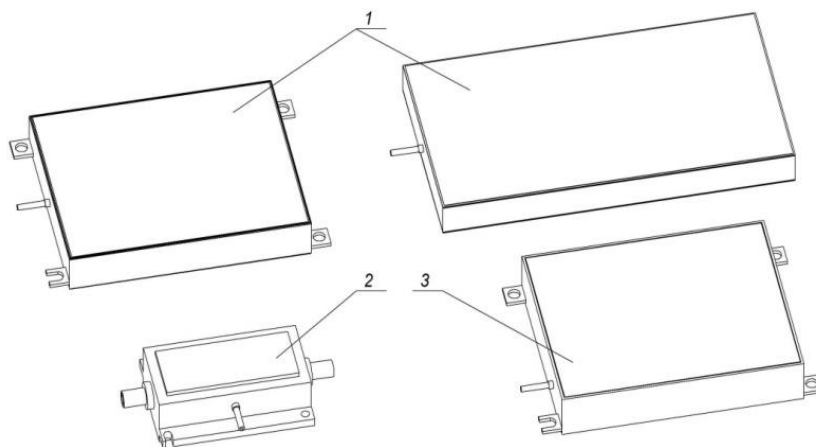
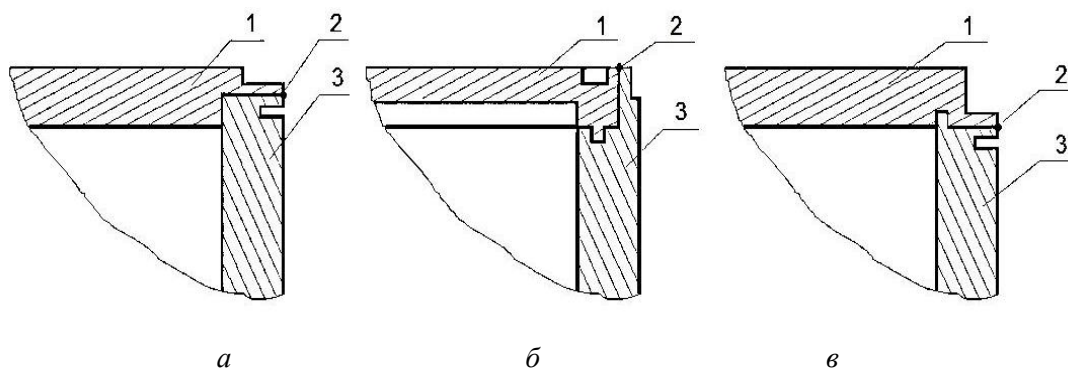


Рис. 4.1. Об'єкти дослідження: корпуси модулів НВЧ типу К (1), КМ (2), КБ (3)

З урахуванням можливих перепадів температури внутрішній тиск може бути в 1,8 рази більше зовнішнього, і, розпираючи кришку і основу корпусу, може привести до деформацій останніх, зруйнувавши їх зварювальний шов або припій, що в свою чергу приведе до розгерметизації, а в подальшому і до виходу модуля з ладу.

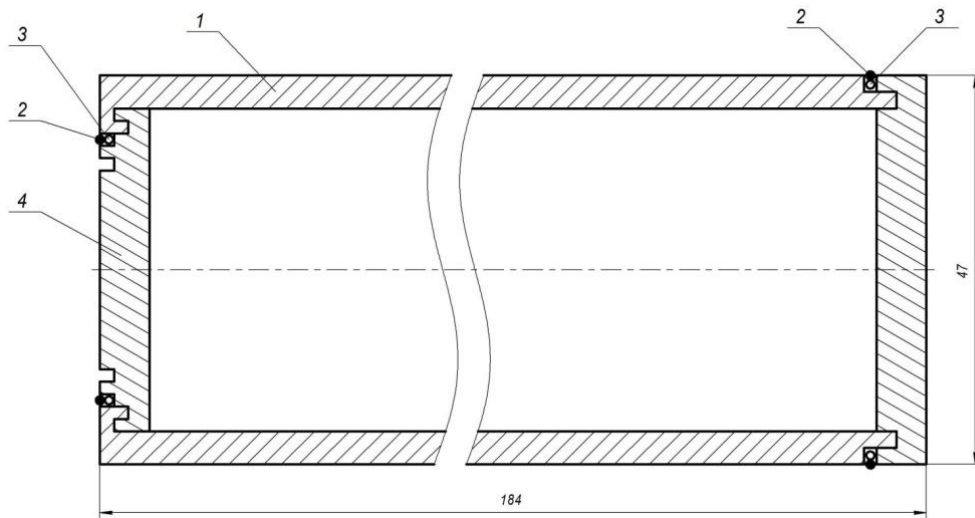
Після посадки літака на землю значення зовнішнього тиску відновлюється, тобто воно стає рівним внутрішньому, і навантаження, що розпирало корпус, зникає. Зрозуміло, що при зльотах і приземленнях літака, корпуси попадають під знакозмінні навантаження і можуть бути розгерметизовані через надмірні втомні напруження, що діють на матеріали корпусу та зварювальні чи паяні шви. За технічними вимогами такі корпусу повинні витримувати не менше 100 зльотів і приземлень (циклів). Але не всі корпуси витримують таку кількість циклів, і на практиці розгерметизація може статися у будь-який момент.

Всі корпуси виготовлені із алюмінієвого сплаву АМГ-2 і відрізняються один від одного розмірами, конструкцією вузла герметизації та кріпленням кришки корпусу до основи. Досліджені типові схеми гермовузлів корпусів НВЧ представлені на рис. 4.2 та 4.3. У першій групі корпусів (К-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) герметизація досягається за допомогою лазерного зварювання місць стику кришок і основи, при цьому все навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається або повністю зварним швом (К-1, 2, 8, 10, 12, рис. 4.2, а), або зварним швом і конструкцією корпусу (К-3, 5, 6, 7, 9, 11, рис. 4.2, б, в).



**Рис. 4.2. Схеми вузлів герметизації корпусів модулів НВЧ першої групи:
1 – кришка; 2 – зварний шов; 3 – стінки корпусу**

У другій групі корпусів (КБ-1, 2, 3, 4, 5, КМ-1, 2, 6) герметизація місць стиків кришки і основи досягається за рахунок застосування герметика «Віксіт» (КБ-1) або припаювання припоєм (КБ-2, 3, 4, 5, КМ-1, 2, 6), для цієї групи корпусів навантаження від внутрішнього надлишкового тиску сприймається конструкцією корпусу (рис. 4.3).



1 – кришка; 2 – герметик Віксіт або припаювання припоєм; 3 – дріт для розкриття; 4 – корпус

Рис. 4.3. Схема вузлів герметизації корпусів надвисокочастотних модулів (група 2)

Розділ 5.

Динамічні деформації в структурно-складних конструкціях електрон- ної техніки

Функціональні монтажні плати, днища шасі, стінки корпусів і деякі інші конструктивні елементи радіоелектронних засобів (РЕЗ) в експлуатаційних умовах не тільки самі можуть перебувати під впливом вібраційних і ударних навантажень, але і передавати ці динамічні навантаження на змонтовані на них блоки, мікросхеми та електронні компоненти [124, 177–179].

У практиці випробувань виробів на вібрації [180, 181], а також під час експлуатації на віброуючих в межах встановлених норм основах мали місце випадки руйнування окремих елементів і (або) деталей радіоелектронних засобів. Вимірювання вібрацій в місцях розташування цих елементів у виробах показали, що на деяких частотах збудження амплітуди вібрацій цих елементів або віброшвидкості, або прискорення (вібропереван-таження) в десятки разів перевищували аналогічні параметри вібрацій, вимірювані на столі вібростенда, або на віброуючій основі при експлуатації. На претензії розробників компонентної бази з приводу того, що їх компоненти руйнувалися в результаті експлуатації або випробувань при неприпустимо високих рівнях вібрацій, споживачі електронних компонентів, тобто виробники конструктивно складних виробів РЕЗ, відповідали, що вони проводили випробування виробів без перевищення допустимих норм та відповідно до інструкції, контролюючи коливання безпосередньо столу вібростенда або основи, на якій кріпиться виріб в експлуатаційних умовах. В таких випробуваннях малося на увазі, що вібрації всього випробуваного виробу і його елементів були рівні вібраціям, вимірюваним на столі вібростенда. Проте все набагато складніше.

В розділі представлено теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження гіпотези, відповідно до якої вібрації столу (платформи) вібростенда в загальному випадку не характеризують ні вібрацій перехідних кріпильних пристроїв, ні тим більше вібрацій деталей і елементів структурно-складних виробів електронної техніки [51, 136].

Метою дослідження була розробка методів оцінки передачі вібрацій, що виникають в конструкціях електронної техніки під дією зовнішніх динамічних навантажень.

Теоретичні дослідження динаміки виробів проводилися на основі теорії лінійних і нелінійних диференціальних рівнянь вимушених коливань, теорії пружності та методів опору матеріалів. Експериментальні методи дослідження використані в роботі представляють собою методи динамічного дослідження блоків електронної техніки, зокрема, методи вібраційного випробування на виявлення резонансних частот; метод коливної частоти; фіксованих частот та метод електротензометрії і швидкісної відеозйомки.

Розділ 6.

Теорія і практика ефективного захисту друкованих плат від динамічних деформацій

На підставі результатів, отриманих при відбродослідженні блоків РЕЗ, встановлено, що амплітуда коливань окремих плат блоків може перевищувати допустиму. Вказана обставина є однією з можливих причин порушення їх функціональної працездатності, а в окремих випадках – і руйнування. З огляду на результати експериментальних досліджень збудженості коливань плат електронної техніки, актуальною є оцінка впливу конструкторсько-технологічних особливостей блоків ЕТ на передачу збуджувальних динамічних сил на друковані плати, що виникають при їх експлуатації, а також розробка ефективних методів зниження збудження їх коливань та вібрацій [134, 135, 184].

Незважаючи на існування багатьох конструкцій віброізоляторів, поки не з'явилося простого, надійного в роботі, широкодіапазонного віброізолятора для РЕЗ, який би встановлювався на рухомих об'єктах. Тому на сьогодні приділяється велика увага способам демпфірування резонансних коливань в конструкціях РЕЗ [50, 117–120, 122, 123, 125].

Найбільш поширеним способом демпфірування коливань є застосування заливоч, покриттів блоків і функціональних вузлів високоефективними вібропоглинаючими матеріалами. Цей метод заснований на здатності полімерів за рахунок своїх пружних властивостей при розтягуванні, згині або зсуві розсіювати велику кількість енергії коливань. До недоліків даного способу слід віднести незадовільну ремонтпридатність конструкції, залежність властивостей заливоч і покриттів від різкої зміни температур, крім того, можливі пошкодження монтажу через внутрішньої напруження при полімеризації компаунда, як це було продемонстровано в розділі 5.

Проведені дослідження [134, 135, 184] показали, що не можна досягти необхідного віброзахисту і уникнути резонансів в елементах конструкції ЕТ лише одним з розглянутих методів. Необхідний віброзахист можливий тільки при використанні комплексу методів, в якому вібродемфіруванню належить визначальна роль.

У цьому розділі таке завдання вирішується шляхом створення і модифікації пружно-дисипативних механічних зв'язків, між конструктивними елементами, що виявляються ланками передачі деформацій, як всередині несівної конструкції блоків ЕТ [185, 186] так і поза нею. Ефективність розроблених методів віброзахисту підтверджена експериментальними випробуваннями блоків ЕТ і теоретично обґрунтована розробкою дискретної розрахункової моделі системи «платформа–корпус–плата».

Післямова

В монографії представлено вирішення актуальної наукової проблеми забезпечення міцності електронних систем шляхом виявлення, оцінки та зниження руйнівних деформацій несівних конструкції під дією експлуатаційних та технологічних навантажень, яке має велике значення для народного господарства. На основі проведених досліджень зроблені наступні висновки наукових та практичних результатів роботи:

1. Створено випробувально-вимірювальний комплекс призначений для вимірювання та оцінки деформацій малогабаритних елементів конструкцій та компонентів електронної техніки під дією статичних та динамічних механічних, теплових та атмосферних навантажень, які відтворюють складні, наближені до експлуатаційних, умови напружено-деформованого стану об'єктів дослідження, із реалізацією методів електротензометрії, акустичної емісії, віброметрії та високошвидкісної відео-зйомки шляхом розробки нових методик та модифікації апаратури і засобів вимірювання.

2. Створено механічну модель та розрахункову схему друкованої плати із встановленими електронними компонентами, представлену площинною стрижневою системою – рамою, елементи якої жорстко з'єднані між собою, що, з використанням методів опору матеріалів, дозволяє оцінити внутрішні зусилля опору, та відповідно деформації і напруження, в конструктивних елементах друкованої плати та встановлених електронних компонентах під дією зовнішнього навантаження. Із використанням моделі теоретично обґрунтовано можливість зменшення внутрішніх сил та моментів, та, відповідно, деформації і напруження, в тілі електронних компонентів за рахунок збільшення монтажної довжини їх виводів та запропоновано спосіб високого наскрізного монтажу електронних компонентів на друкованій платі, який дозволяє зменшити передачу деформацій від основи друкованої плати до електронних компонентів, порівняно із технологією низького наскрізного та поверхневого монтажу.

3. Розроблено методику визначення допустимого короблення друкованих плат, яка полягає у забезпеченні допустимої величини напружено-деформованого стану паяних з'єднань друкованих плат за показником допустимого короблення основи друкованої плати, який визначається добутком граничного короблення основи друкованої плати та коефіцієнта запасу короблення.

4. Під дією механічного навантаження експериментально встановлено, що герметизація електронних модулів заливкою компаундом приводить до зменшення передачі деформацій від основи об'єднувальної плати до електронних компонентів у складі модуля, при тривалому навантаженні об'єднувальної плати і наявності процесів повзучості і релаксації в з'єднаннях об'єднувальної плати і електронних модулів; найбільш небезпечними в конструкції друкованих плат є контактні вузли, напруження в яких можуть перевищувати напруження на основі плати в декілька разів і вдосконалено технологію поверхневого монтажу конденсаторів визначенням оптимальної температури прогріву контактних вузлів в процесі пайки, яка забезпечує підвищення міцності контактних вузлів в середньому на 50 %.

5. Розроблено акустико-емісійну методику неруйнівної діагностики міцності несівних конструкцій електронної техніки в статичному та динамічному режимі навантаження, в якій придатність до експлуатації визначається за умови не перевищення порогового рівня інформативного параметра сигналів акустичної емісії, зокрема амплітуди та сумарного рахунку, зареєстрованих під дією визначеного із запасом міцності тестового навантаження, та запропоновано акустико-емісійний спосіб локації дефектів друкованих плат в однорідному акустико-прозорому середовищі, який полягає в тому, що координата

джерела акустичної емісії розраховується із використанням ефекту Доплера для двох пар первинних перетворювачів, які розташовувалися на координатних осях площини паралельній площині плати на заданій відстані від неї, а акустична емісія розповсюджується через однорідне середовище між ними.

6. Створено стенд тестування герметичності корпусів модулів надвисоких частот під дією надмірного тиску та температури із використанням таких методів як манометричний – для оцінки надлишкового тиску розгерметизації; бульбашковий – для виявлення місць розгерметизації; електротензометрії – для вимірювання деформації корпусів та оцінки нормальних напружень, які виникають в залежності та під дією надлишкового тиску; акустичної емісії – для виявлення дефектів у всьому об'ємі об'єкта дослідження при зміні внутрішнього тиску та моніторингу динаміки їх розвитку. Аналіз напружено-деформованого стану та акустичної емісії випробуваних корпусів, зокрема кришок та швів, виявив характер деформації останніх, в якому саме напруження на швах досягають границі міцності матеріалу зварного шву і спричиняють розгерметизацію гермо-вузлів під впливом внутрішнього надмірного тиску.

7. Представлено одномасову модель коливальної системи, в якій кріплення маси на віброуючій основі розглянуто у вигляді пружно-дисипативного зв'язку, що дозволило отримати теоретичне обґрунтування руху маси відносно віброуючої основи як абсолютного руху маси при нерухомій основі, і теоретично обґрунтувати гіпотезу про неможливість використання вібрацій платформи вібростенда, в загальному випадку, для характеристики вібрацій перехідних кріпильних пристроїв, та тим більше вібрацій деталей і елементів структурно-складних виробів електронної техніки, що було експериментально підтверджено одночасним використанням методів електротензометрії та швидкісної відеозйомки.

8. Представлено математичну модель побудовану із використанням елементів теорії коливань пластин і призначену для виконання вібраційного аналізу та розрахунків резонансних частот коливання таких об'єктів як друковані плати, стінки корпусу та інші плоскі прямокутні структури, що використовуються в блоках електронної техніки, яка в результаті експериментального дослідження була визнана як модель, що забезпечує визначення наближеного значення власної частоти коливань, що пояснюється зв'язністю коливань компонентів установлених на друкованій платі, нерівномірним розподілом монтажу електронних компонентів по площі плати, зміною характеристик жорсткості плати через наявність струмопровідних доріжок та неможливості врахування зусиль затягування при закріпленні плат в блоці.

9. Створено експериментальну установку п'єзозбудження та п'єзовимірювання коливань з використанням прямого і зворотного п'єзоефекту відповідно, для визначення власної частоти та форми коливань друкованих плат та інших деталей електронної техніки. Застосування методу Гука–Хладні при вібраційному дослідженні об'єднувальних плат дозволили виявити складні форми коливань останніх та вузли коливань, в яких виникають найбільші деформації і напруження об'єктів дослідження.

10. Аналіз амплітудно-частотних характеристик друкованих плат, встановлених в хрестоподібному пристрої, призначеному для одночасного вібраційного випробування 12-ти друкованих плат у трьох взаємноперпендикулярних площинах, свідчить про необхідність врахування положення встановлення плат в конструкції блоків електронної техніки та розподілу електронних компонентів на поверхні плат для вимірювання їх динамічних характеристик.

11. Експериментально встановлено, що конструкційне демпфірування несівних конструкцій корпусів електронної техніки перевершує демпфірування, зумовлене внутрішнім тертям в матеріалі деталей, і зі зниженням жорсткості стінок корпусу передача вібрацій з опору корпусу на плати посилюється, а створення додаткових пружно-дисипативних зв'яз-

ків всередині та ззовні конструкції блоків електронної техніки призводить до зниження амплітуд коливань на друкованих платах всередині блоків, без суттєвої зміни їх власної частоти.

12. Запропоновано спосіб захисту друкованих плат від вібрацій, який полягає в модифікації конструкції вузла кріплення плат в корпусі блока шляхом введення в конструкцію тканинної стрічки із демпфером сухого тертя, незалежно від умов установки самого блока на віброуючій основі. Запропонований спосіб дозволяє забезпечити зниження амплітуди коливань при резонансі на нижніх частотах за рахунок ефективного використання демпфера сухого тертя і виключення, або значного зниження деформування плат на високих частотах за рахунок тканинної стрічки, де коливання відбуваються без деформацій самої плати, що забезпечує збереження наскрізного і поверхневого монтажу. Крім цього монтаж плати залишається відкритим, що вирішує питання ремонтпридатності та теплопровідності.

13. Створена розрахункова схема змушених коливань друкованої плати на двох пружно-демпферних опорах призначена для визначення конструкторських розмірів пружин – фрикційних пластин в залежності від їх пружних та дисипативних характеристик, що дозволяє оптимізувати коефіцієнт динамічності коливальної системи та амплітудно-частотну характеристику в умовах першої симетричної форми коливань друкованих плат, чим забезпечується зниження збудливості їх коливань.

14. Розроблена дискретна розрахункова модель системи «платформа – корпус – плата», яка полягає в представленні коливальної системи, що складається з двох пасивних мас, представлених корпусом і друкованою платою, які пов'язані між собою пружно-дисипативними елементами, а сама коливальна система в загальному випадку пружно пов'язана з рухомою платформою, переміщення якої обумовлює кінематичне збудження коливань досліджуваної системи. Розроблена модель дозволила теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити ефективність запропонованого способу захисту друкованих плат від вібрацій реалізованого введенням в конструкцію вузла кріплення плат тканинної стрічки із демпфером сухого тертя, незалежно від умов установки самого блока на віброуючій основі.

Перелік джерел посилання

1. Маквецов Е. Н. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры : учебник / Е. Н. Маквецов, А. М. Тартаковский. – М. : Радио и связь, 1993. – 201 с.: ил.
2. Оценивание и прогнозирование надежности бортового аэрокосмического оборудования : монография / В. М. Грибов, Ю. Н. Кофанов, В. П. Стрельников ; под отв. ред. Ю. Н. Кофанова. – М. : НИУ ВШЭ, 2013. – 495 с. : ил.
3. Крищук В. Н. Исследование и разработка машинных методов расчета конструкций бортовой РЭА этажерочного типа на вибрационные и ударные воздействия : дис. канд. техн. наук / В. Н. Крищук. – М. : МИЭМ, 1977. – 213 с.
4. Талицкий Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы : учеб. пособ. / Е. Н. Талицкий. – Владимир : Владим. гос. ун-т., 2001. – 256 с.
5. Баканов Г. Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств : учеб. пособ. / Г. Ф. Баканов, С. С. Соколов, В. Ф. Суходольский. – 2-е изд., испр., доп. – М. : Академия, 2014. – 368 с. : ил., табл.
6. Гормаков А. Н. Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы : учеб. пособ. / А. Н. Гормаков, Н. А. Воронина. – Томск : изд-во ТПУ, 2006. – 164 с.
7. ДСТУ 2634–94. Вироби електронної техніки. Методи оцінювання відповідності вимогам до надійності. – Чинний від 1995-07-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 1995. – 4 с.
8. ДСТУ 7655:2014. Вироби електронної техніки. Загальні вимоги щодо надійності та методи випробування. – На заміну ГОСТ 25359-82 ; чинний від 2015-07-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 9 с.
9. ДСТУ 8216:2015. Вироби електронної техніки. Класифікація за умовами застосування та вимоги стійкості до зовнішніх впливових чинників. – На заміну ГОСТ 25467–82 ; чинний від 2017-04-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 11 с.
10. Вопросы качества радиодеталей / Б. Ю. Геликман, Г. А. Горачева, В. В. Стальбовский, Л. Л. Кристалинский ; под ред. А. П. Балашова. – М. : Сов. радио, 1980. – 328 с.
11. Терещук Р. М. Контроль качества деталей и узлов электронной аппаратуры / Р. М. Терещук. – Киев : Техника, 1976. – 272 с.
12. Бегер Елизавета. Практические способы уменьшения деформаций печатных плат на этапе конструирования / Е. Бергер // Компоненты и технологии. – [СПб. : ФАЙНС-ТРИТ](#), 2009. – № 1. – С. 116–119
13. Литвинов А. Н. Исследование состояния плат радиоэлектронных систем при тепловых воздействиях / А. Н. Литвинов, О. Ш. Хади, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – Пенза : Пензенский гос-й

унив-т, 2015. – № 2 (34). – С. 182–191.

14. Probabilistic fatigue damage estimation of embedded electronic solder joints under random vibration / Mayssam Jannoun, Younes Aoues, Emmanuel Pagnacco, Philippe Pougnet, Abdelkhalak El-Hami // [Microelectronics Reliability](#). – 2017 – № 78. – P. 249–257.

15. Kusiak A. Data Mining of Printed-Circuit Board Defects / A. Kusiak, C. Kurasek // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2001. – Vol. 17, [Issue: 2](#). – P. 191–196.

16. Kühl Reiner W. Mechanical stress and deformation of SMT components during temperature cycling and PCB bending / Reiner W. Kühl // *Soldering & Surface Mount Technology*, 1999. – 11 (2). – P. 35–41.

17. Singh T. Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages / T. Singh., P. Viswanadham. – Boston : Chapman & Hall, MA: Springer, 1998. – P. 363.

18. Герасимов О. Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники / О. Н. Герасимов, А. Ю. Доросинский, М. Н. Березин // *Надежность и качество сложных систем*. – Пенза, 2017. – № 3 (19). – С. 37–42.

19. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справ. пособ. / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. ; отв. ред. Б. С. Касаткин. – Киев : Наук. думка, 1981. – 583 с.

20. Измерение напряжений и деформаций / подгот. к изд. К. Финк и Х. Рорбах ; пер. с нем. Ю. Ф. Красонтовича ; под ред. Н. И. Пригоровского. – М. : Машгиз, 1961. – 535 с. : ил.

21. Пригоровский Н. И. Экспериментальные методы исследования напряжений : справочник / Н. И. Пригоровский. – М. : Машиностроение, 1970. – 104 с.

22. Als-Nielsen Jens. Elements of modern X-ray Physics / Jens Als-Nielsen, Des McMorrow. – 2nd ed. – [New Jersey, United States](#) : John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 421 p.

23. Balasko M. Comparison of neutron radiography with other nondestructive methods / M. Balasko, E. Svab, G. Endrczy // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005. – Vol. 52, Issue 1. – P. 330–333.

24. ДСТУ 3213–95. Матеріали радіотехнічні твердотільні. Аналіз елементного складу рентгеноспектральними аналізаторами. – Чинний: від 1996-07-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 1996. – 25 с.

25. MicroDAC strain measurement for electronics packaging structures / D. Vogel, V. Grosser, A. Schubert, B. Michel // *Optics and Lasers in Engineering*, 2001. – Vol. 36, Issue 2. – P. 195–211.

26. Теокарис П. Муаровые полосы при исследовании деформаций / П. Теокарис ; пер. с греч. – М. : Мир, 1972. – 336 с.

27. Сурсяков В. А. Исследование деформаций с помощью метода хрупких покрытий : метод. разработка / В. А. Сурсяков. – Пермь : Пермский гос. техн. ун-т, 2002. – 12 с.

28. Хадзимэ О. Определение напряжений гальваническим меднением / О. Хадзимэ ; пер. с япон. – М. : Машиностроение, 1969. – 152 с.

29. Дайчик М. Л. Методы и средства натурной тензометрии : справочник / М. Л. Дайчик, Н. И. Пригоровский, Г. Х. Хуршудов. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.

30. Клокова Н. П. Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки / Н. П. Клокова. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.

31. Мехеда В. А. Тензометрический метод измерения деформаций / В. А. Мехеда. – Самара : изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.

32. Шушкевич В. А. Основы электротензометрии / В. А. Шушкевич. – Минск : Высшая школа, 1997. – 351 с.

-
33. Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
34. Рuzга З. Электрические тензометры сопротивления / З. Рuzга ; пер. с чеш. – Л. : Мир, 1984. – 356 с.
35. Кланова Н. П. Тензодатчики / Н. П. Кланова, А. В. Волчак. – М. : ОНТИ ЦА-ГИ, 1993. – №401. – 220 с.
36. Перри К. Основы тензометрирования / К. Перри, Г. Лиснер ; пер. с англ. – М. : Мир, 1977. – 324 с.
37. Трофимов Р. И. Пьезоэлектрические преобразователи статических нагрузок / Р. И. Трофимов. – М. : Машиностроение, 1983. – 928 с.
38. Форейт И. Емкостные датчики неэлектрических величин / И. Форейт ; пер. с чеш. – Л. : Энергия, 1996. – 166 с.
39. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Туричин. – Л. : Энергия, 1976. – 692 с.
40. Галушко А. И. Определение внутренних напряжений и физико-механических свойств некоторых компаундов / А. И. Галушко, Л. Ф. Чувилина // Обмен опытом в радио-промышленности. – 1968. – № 6.
41. Анкудинов Д. М. Малогазные тензодатчики сопротивления / Д. М. Анкудинов, К. Н. Мамаев. – М. : Машиностроение, 1986. – 199 с.
42. Ройzman В. П. Забезпечення завадостійкості дротяних малогазних тензорезисторів для вимірювання дійсних значень деформацій виробів електронної техніки / В. П. Ройzman, І. І. Ковтун, О. К. Білик // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 6, т. 1. – С. 234–239.
43. Чеканов А. Н. Вероятностные расчеты и оптимизация несущих конструкций / А. Н. Чеканов. – М. : Магистр, 1997. – 132 с.
44. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М. : Гос. стандарт СССР, 1980. – 12 с.
45. ДСТУ EN 1330-1:2016. Неруйнівний контроль. Термінологія. Частина 1. Перелік загальних термінів. – На заміну ДСТУ EN 1330-1:2008 ; чинний від 2016-08-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2017. – 22 с.
46. Потапов А. И. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов / А. И. Потапов, Ф. П. Пеккер. – Л. : Машиностроение, 1977. – 192 с.
47. Бегларян В. Х. Механические испытания приборов и аппаратов / В. Х. Бегларян. – М. : Машиностроение, 1980. – 223 с.
48. ДСТУ ІЕС 61587-1:2009. Конструкції механічні для електронного устаткування за ІЕС 60917 та ІЕС 60297. Частина 1. Кліматичні, механічні випробування, аспекти безпеки для шаф, стояків, каркасів і шасі (ІЕС 61587-1:2007, ІДТ). – Чинний від 2012-01-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2013. – 12 с.
49. Милов В. А. Исследования склерометрических и акустических методов измерения прочности бетона : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук / В. А. Милов. – Л. : ЛИСИ, 1969. – 102 с.
50. Вибрации в технике : справ очник : в 6 т. Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина ; ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). – М. : Машиностроение, 1978. – 352 с. : ил.
51. Royzman V. Vibration testing objects by weights exceeding load capacity of vibration stands / V. Royzman, V. Moroz, I. Kovtun // (2016) Transport Means : Proceedings of the International Conference, 2016 October. – P. 633–636.
52. Рудаков В. Н. Радиодфектоскопия / В. Н. Рудаков // Неразрушающий контроль ка-

-
- чества конструкций и изделий из стеклопластика. – Л. : ЛДНТП, 1971. – Ч. 2. – С. 3–8.
53. Крылов Н. А. Электронно-акустические и радиометрические методы испытания материалов и конструкций / Н. А. Крылов. – Л. : Стройиздат, 1963. – 240 с.
54. Потапов А. И. Инфракрасная дефектоскопия пластмасс / А. И. Потапов, Ю. М. Эбельс, В. Г. Толокнов // Неразрушающий контроль качества конструкций и изделий из стеклопластика. – Л. : ЛДНТП, 1971. – Ч. 1. – С. 52–63.
55. Латишенко В. А. Диагностика прочности и жесткости материалов / В. А. Латишенко ; предисл. А. К. Малмейстера ; АН Латв. ССР ; Ин-т механики полимеров. – Рига : Зинанте, 1968. – 320 с.
56. Потапов А. И. Прочность и деформативность стеклопластиков (контроль в конструкциях) / А. И. Потапов, Г. М. Савицкий. – Л. : Стройиздат, 1973. – 145 с.
57. Balasko M. Comparison of neutron radiography with other nondestructive methods / M. Balasko, E. Svab, G. Endrczy // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005. – Vol. 52, issue 1. – P. 330–333.
58. Ботаки А. А. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов / А. А. Ботаки, В. Л. Ульянов, А. В. Шарко. – М. : Машиностроение, 1983. – 80 с.
59. Stowell E. Z. Study of the energy criterion for fatigue / E. Z. Stowell // Nucl. Eng. Des. – 1969. – № 1. – P. 301–310.
60. Рабинович Э. Экзоэлектроны / Э. Рабинович ; пер. с англ. // Успехи физических наук. – М. : Физический институт им. П. М. Лебедева РАН, 1979. – Т. 127. – С. 163.
61. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / В. А. Стрижало, Ю. В. Добровольский, В. А. Стрельченко и др. / отв. ред. Г. С. Писаренко // АН УССР ; Ин-т проблем прочности. – Киев : Наук. думка, 1990. – 232 с.
62. Неразрушающий контроль. Кн. 2: Акустические методы контроля : практ. пособ. / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов / под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.
63. Frederick J. R. Acoustic Emission / J. R. Frederick, D. K. Felbeck. – ASTM STP 505. – 1972. – P. 129–139.
64. Грешников В. А. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В. А. Грешников, Ю. В. Дробот. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
65. Лексовский А. М. Микротрещины, повреждаемость и разрушение композиционных материалов / А. М. Лексовский, Г. Х. Усмонов, Г. Х. Нарзуллаев // Физика и механика разрушения композиционных материалов. – Л. : АН СССР, Ордена Ленина физ.-техн. ин-т им. Иоффе. – 1986. – 69 с.
66. Грешников В. А. Об анализе сигналов акустической эмиссии / В. А. Грешников, А. П. Брагинский // Дефектоскопия. – М. : Изд-во АН СССР, 1980. – №5. – С. 101–106.
67. Тутнов А. А. Динамика работоспособности конструктивных элементов на основе анализа структуры сигналов акустической эмиссии / А. А. Тутнов, И. А. Тутнов, А. И. Чуварин // Акустическая эмиссия материалов и конструкций : сб. науч. тр. 1-й Всесоюз. конф. – Ростов н/Д. : изд-во РГУ, 1989. – С. 59–63.
68. Vahaviolos S. J. 3rd Generation AE instrumentation techniques for high fidelity and speed of data acquisition / S. J. Vahaviolos // Progress in Acoustic Emission III : Proceedings of the Eighth Inter-national Acoustic Emission Symposium, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 21–24 October 1986, Tokyo, Japan. – P. 102–116.
69. ASTM E569 / E569M-13. Standard recommended practice for acoustic emission monitoring of structures during controlled stimulation. – Active Standard ASTM E569 / E569M ASTM E-569-76. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. – 4 p.

70. Acoustic emission classification using signal subspace projections / V. Emamian, Zhiqiang Shi, M. Kaveh, A. H. Tewfik // Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '01) : proceedings IEEE International Conference, Salt Lake City, UT, USA, 07-11 May 2001. – Vol. 05. – P. 3321–3324.

71. Pollock A. A. Acoustic Emission Amplitude Distributions / A. A. Pollock // International Advances in Nondestructive Testing. – Gordon & Breach Science Publishers, S.A., etc. v. American Institute of Physics et al, 1981. – Vol. 7. – P. 215–239.

72. Использование акустической эмиссии в технологическом производстве керамических материалов / В. М. Терентьев, С. И. Лихаций, Т. А. Лудзская [и др.]. – Хабаровск, 1984. – 180 с.

73. Иванов В. И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.: ил.

74. Pad crater detection using acoustic waveform analysis / [W. Carter Ralph](#); [Elizabeth E. Benedetto](#); [Aileen M. Allen](#), [Keith Newman](#) // Proceedings of [IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference \(ECTC\)](#), Orlando, FL, USA, 2014. – P. 1433–1440.

75. Сазонов В. А. Аппаратура для динамических исследований. В 2 ч. Ч. 1. Виброметрия / В. А. Сазонов. – Л. : ЛДНТП, 1967. – 267 с.

76. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / В. Б. Карпушин. – М. : Сов. радио, 1971. – 344 с.

77. Нагорний В. М. Введення в технічну діагностику машин / В. М. Нагорний. – Суми : Сумський державний університет, 2011. – 482 с.

78. Епифанцев Ю. А. Мониторинг и диагностика механических объектов : учеб. пособ. / Ю. А. Епифанцев, С. В. Полищук. – Новокузнецк : СибГИУ, 2009. – 61 с.

79. Матвеев С. Е. Методы системного анализа вибрационной прочности изделий / С. Е. Матвеев, Ю. Н. Кофанов, В. П. Ройзман. – М. : Радио и связь, 2002. – 178 с.

80. Форейт И. Емкостные датчики неэлектрических величин / И. Форейт ; пер. с чешск. – Л. : Энергия, 1966. – 166 с.

81. Агейкин Д. И. Датчики контроля и регулирования : справ. материалы / Д. И. Агейкин, Э. Н. Костина, Н. Н. Кузнецова. – М. : Машиностроение, 1985. – 928 с.

82. Раевский Н. П. Датчики механических параметров машин / Н. П. Раевский. – М. : Изд. АН СССР, 1980. – 188 с.

83. Соппротивление материалов : учебник / Г. С. Писаренко, В. А. Агаев, А. Л. Квитка, В. Г. Попков, Э. С. Уманский. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев : Вища школа, 1979. – 696 с.

84. Писаренко Г. С. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид. допов. і перероб. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.

85. Ройзман В. П. Опір матеріалів. Короткий курс / В. П. Ройзман. – Львів : Афіша, 2004. – 108 с.

86. Прогнозирование надёжности узлов и блоков радиотехнических устройств космического назначения на основе моделирования напряжённо-деформируемых состояний : монография / С. Б. Сунцов, В. П. Алексеев, В. М. Карабан, С. В. Пономарёв. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 114 с.

87. Казаков Д. А. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций : монография / Д. А. Казаков, Капустин С. А., Коротких Ю. Г. – Н. Новгород : изд-во ННГУ, 1999. – 226 с.

88. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.

89. Карзов Г. П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Шведова. – СПб. : Политехника, 1993. – 391 с.

-
90. Улинич Р. Б. Практическое обеспечение надежности РЭА при проектировании / Р. Б. Улинич. – М. : Радио и связь, 1985. – 112 с.
91. Ройзман В. П. Идентифікація 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. 18–25.
92. Шалумов А. С. Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учётом внешних воздействий / А. С. Шалумов. – М. : Радиотехника, 2013. – 424 с.
93. Кузнецов О. А. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры / О. А. Кузнецов, А. И. Погалов, В. С. Сергеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 144 с.
94. Напряжения и деформации в элементах микросхем / В. С. Сергеев, О. А. Кузнецов, Н. П. Захаров, В. А. Лютягин. – М. : Радио и связь, 1987. – 88 с.
95. Старцева Л. В. Строительная механика в примерах и задачах / Л. В. Старцева, В. Г. Архипов, А. А. Семенов. – М. : изд-во АСВ, 2013. – 224 с.
96. Ржаницын А. Р. Строительная механика : учеб. пособ. / А. Р. Ржаницын. – 2-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 1991. – 439 с.
97. Поляков А. А. Строительная механика / А. А. Поляков, Ф. Г. Лялина, Р. Г. Игнатов ; под общ. ред. А. А. Полякова. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – 424 с.
98. ДСТУ 2779–94. Монтаж електричний радіоелектронної апаратури та приладів. Загальні технічні вимоги до формування виводів та до установлення виробів електронної техніки на друковані плати. – Чинний від 1996-01-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 1996. – 26 с.
99. ДСТУ 2783–94. Монтаж електричний радіоелектронної апаратури та приладів. Загальні вимоги до монтажу виробів електронної техніки та електротехнічних на друковані плати. – Чинний від 1996-01-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 1996. – 23 с.
100. IPC-A-600H-2010 RU. Критерии приемки печатных плат. – На замену IPC-A-600G (июль 2004 г.), IPC-A-600F (ноябрь 1999 г.). – Illinois USA : IPC, 2010. – 152 с.
101. Шихов С. В. Применение критериев IPC для приемки печатных плат и электронных блоков. Ч. 1. Параметры плоскостности печатных плат / С. В. Шихов // Технологии в электронной промышленности. – СПб. : ООО Медиа КиТ, 2008. – № 6. – С. 86–88.
102. ГОСТ Р 56251–2014. Платы печатные. Классификация дефектов. – Дата введения 2015-06-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 103 с.
103. Соболев Н. Д. Термическая усталость и термический удар / Н. Д. Соболев, В. И. Горюх. – М. : Машиностроение, 1970. – 156 с.
104. Шорр Б. Ф. Основы расчета на ползучесть неравномерно нагретых тел / Б. Ф. Шорр // Прочность и деформация в неравномерных температурных полях : сб. науч. работ. – М. : Гос. атом. издат., 1962. – С. 183–241.
105. Проников А. С. Параметрическая надёжность машин / А. С. Проников. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.
106. 3-D finite element modeling of ductile crack growth in thin aluminum materials / A. S. Gullerud, R.H. Jr. Dodds, R.W. Hampton, D. S. Dawicke // Fatigue and Fracture Mechanics: 30 th Volume; eds. K. L. Jerina, P. C. Paris. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2000. – P. 85–101.
107. Hanq D. A. Development of an object-oriented fatigue tool / D. A. Hanq, A. J. Walters, J. L. Beuth // Engineering with computers, 2000. – V. 16. – P. 131–144.
108. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени / В. П. Когаев. – М. : Машиностроение, 1993. – 364 с.

109. Цейко А. В. Аналіз існуючих cad/cam/cae – систем, їх потенційні можливості при постановці експерименту / А. В. Дейко // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк, 2013. – Вип. 41, ч. 2.

110. Цейко А. В. Аналіз існуючих CAD/CAM/CAE – систем, їх потенційні можливості при постановці експерименту / А. В. Цейко // Наукові нотатки. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – Вип. 41 (2). – С. 244–250.

111. [Wei H.](#) Research on dynamic model of printed circuit board based on finite element method / [H. Wei](#), [L. Xu](#) // The International Conf. on Green Energy and Sustainable Development (GESD 2017) : AIP Conference Proceedings, 27–28 May 2017, Chongqing City, China. – Chongqing City : AIP Publishing LLC, 2017. – Vol. 1864 : 020082. – P. 1–7.

112. Liu F. Experimental modal analysis and random vibration simulation of printed circuit board assembly / F. Liu, R. Fan // Advances in vibration engineering. – Dallas, United States : Krishtel eMaging Solutions Pvt Limited, 2013. – Vol. 12, Issue 5. – P. 489–498.

113. [Xie H.](#) The sub-model method for analysis of BGA joint stress and strain during random vibration loading / [H. Xie](#), D. Zhou, [Z. Liu](#) // [13th International Conf. on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging](#) : Proceedings of a meeting held, 13–16 Aug. 2012, Guilin, China. – China : IEEE, 2012. – P. 1216–1221.

114. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наук. думка, 1988. – 736 с.

115. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов : учеб. для вузов / В. И. Феодосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.

116. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручник / М. А. Павловський. – Київ : Техніка, 2002. – 512 с.

117. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учеб. для вузов / К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др. ; под общ. ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.: ил.

118. Ильинский В. С. Защита аппаратов от динамических воздействий / В. С. Ильинский. – М. : Энергия, 1971. – 320 с.

119. Ильинский В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В. С. Ильинский. – М. : Радио и связь, 1982. – 296 с.

120. Виброзащита радиоэлектронной аппаратуры полимерными компаундами / Ю. В. Зеленева, А. А. Кирилин, Э. Б. Слободник, Е. Н. Талицкий ; под ред. Ю. В. Зеленева. – М. : Радио и связь, 1984. – 120 с.

121. Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний / Дж. Хендерсон, А. Нашиф, Д. Джоунс ; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 488 с.

122. Справочник конструктора РЭА: общие принципы конструирования / под ред. Р. Г. Варламова. – М. : Сов. радио, 1980. – 480 с.

123. Aglietti G. S. Analysis of Enclosures and Anti Vibration Devices for Electronic Equipment for Space Applications / G. S. Aglietti, C. Schwingshackl // Proceedings of the 6th International Conference on Dynamics and Control of Systems and Structures in Space 2004, 2004-07-18 – 2004-07-22. – P. 261–270

124. Суровцев Ю. А. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры / Ю. А. Суровцев. – М. : Сов. радио, 1974. – 174 с.

125. Vibration analysis study of spacecraft electronic package: a review / K. P. Subramanya, Jiwan Kumar Pandit, C. S. Prasad, M. R. Thyagaraj // International Journal of Science, Engineering and Technology Research. – IJSETR, 2014. – Vol. 3, Issue 3. – P. 503–507.

-
126. Veprik A. M. Vibration protection of critical components of electronic equipment in harsh environmental conditions / A. M. Veprik // *Journal of Sound and Vibration*, 2003. – Vol. 259, Issue 1. – P. 161–175.
127. Zahedi F. A wireless acoustic emission sensor remotely powered by light / F Zahedi, H Huang // [Smart Materials and Structures](#). – IOP Publishing Ltd, 2014. – № 3. – P. 165–178.
128. Иванов В. И. О возможных формах сигналов акустической эмиссии / В. И. Иванов // *Дефектоскопия*. – М. : ИКЦ Академкнига, 1979. – № 5. – С. 99–101.
129. Ройзман В. П. Программно аппаратный комплекс акустической эмиссии / В. П. Ройзман, И. И. Ковтун // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – Хмельницький : ХНУ, 1997. – № 1. – С. 25–29.
130. Ройзман В. П. Неруйнівний контроль, діагностування і прогнозування міцності вузлів і деталей машин методом акустичної емісії із застосуванням локації / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, А. В. Горошко // *Вісник Технологічного університету Поділля*. – Хмельницький : ТУП, 2002. – № 6, ч. 1. – С. 224–234.
131. Ройзман В. П. О возможности плоскостной локации мест расположения источников акустической эмиссии / В. П. Ройзман, И. И. Ковтун, А. В. Горошко // *Надійність машин і прогнозування їх ресурсу : зб. пр. міжнар. конф.* – Івано-Франківськ : ІФДТУНГ, 2000. – С. 351–357.
132. Ройзман В. П. Неруйнівне діагностування і прогнозування міцності деталей машин методом акустичної емісії / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, А. В. Горошко // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – Хмельницький : ТУП, 2001. – № 4. – С. 46–52.
133. Ройзман В. П. Локація небезпечних дефектів матеріалів методом акустичної емісії / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, А. В. Горошко // *Вісник Технологічного університету Поділля*. – Хмельницький : ТУП, 2002. – № 1. – С. 195–201.
134. Ковтун І. І. Диагностика прочности неразъемных элементов конструкций методом акустической эмиссии : дис. канд. техн. наук : 05.02.02 / І. І. Ковтун. – Хмельницький, 1998. – 178 с.
135. 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.
136. Kovtun I. Theory and practice of vibration analysis in electronic packages / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, T. Kałaczyński // *17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. MATEC Web Conf.* (eISSN: 2261-236X), 182, 02015 (2018) – 10 p.
137. Boiko J. Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design / J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk // *First Ukraine IEEE international Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON–2017) : Proceedings of a meeting held, 29 May – 2 June 2017, Kiev, Ukraine, 2017*. – P. 514–517.
138. ДСТУ 2646–94. Плати друковані. Терміни та визначення. – Чинний від 1994-01-07. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 44 с.
139. ДСТУ ІЕС 60917-1:2010. Конструкції механічні для електронного устаткування. Модульний принцип конструювання. Ч. 1. Родовий стандарт (ІЕС 60917-1:2009, ІДТ). – На заміну ДСТУ 3897–99 (ІЕС 60917 (1988-12)), ДСТУ 3898–99 (ІЕС 60917-0 (1989-10)); чинний від 01.07.2012. – Київ : Держспоживстандарт України, 2013. – 21 с.
140. Robertson C. T. Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics / C. T. Robertson. – New Jersey : Prentice Hall Professional, 2003. – 277 p.

-
141. Медведев А. М. Технология производства печатных плат / А. М. Медведев. – М. : Техносфера, 2005. – 358 с.
142. Kovtun I. 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 (2016). – P. 494–489.
143. Бойко Ю. М. Вплив технології формування виводів дискретних компонентів на передачу деформацій від об'єднувальної плати / Ю. М. Бойко, І. І. Ковтун, С. В. Петрашук, Р. А. Тертичний // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Радіотехніка, електроніка та телекомунікації* – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 5. – С. 73–78.
144. ГОСТ 24715–81 Соединения паяные. Методы контроля качества. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 7 с.
145. Tong J. P. C. A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement / J. P. C. Tong, F. Tsung, B. P. C. Yen // [The International Journal of Advanced Manufacturing Technology](#). – London : Springer, 2004. – Vol. 23, Issue 7–8. – P. 523–531.
146. Монтаж на поверхность. Технология. Контроль качества / под общ. ред. И. О. Шурцова. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – С. 115–117.
147. Кузнецов О. А. Прочность паяных соединений / О. А. Кузнецов, А. И. Погачев. – М. : Машиностроение, 1987. – 112 с.
148. Optical Interconnects on and in Printed Circuit Boards. *International Journal of Electronics and Communications* / B. Wittmann, S. Lehmacher, S. Kopecz, A. Neyer // *AEU International Journal of Electronics and Communications*. – Elsevier GmbH, 2001. – Vol. 55, Issue 5. – P. 319–222.
149. [Barto S.](#) Nonlinear distortion of C/V characteristic – Useful tool for diagnostics of electrically conductive adhesives: Theoretical background, measuring equipment, selected applications / [S. Barto](#) and [P. Mach](#) // [Proceedings of: Conf. on Diagnostics in Electrical Engineering \(Diagnostics\)](#), 6–8 Sept. 2016 Pilsen, Czech Republic. – Pilsen : IEEE, 2016. – P. 1–4.
150. Ковтун І. І. Неруйнівний контроль і прогнозування характеристик міцності і пластичності матеріалів методом акустичної емісії / І. І. Ковтун, В. П. Ройзман, А. В. Горшко // *Надійність машин і прогнозування їх ресурсу : зб. пр. міжнар. конф.* – Івано-Франківськ : ІФДТУНГ, 2000. – С. 120–127.
151. Ройзман В. П. Неруйнівний контроль і прогнозування характеристик міцності і пластичності матеріалів методом акустичної емісії / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун // *Вібрації в техніці та технологіях*. – № 3 (79) *Технічні науки*. – Вінниця : ВНАУ, 2015. – С. 112–116.
152. Ковтун І. І. Розробка методик акусто-емісійної неруйнівної діагностики міцності деталей і вузлів техніки / І. І. Ковтун, В. П. Ройзман // *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Сер.: Військові та технічні науки*. – Хмельницький : НАДПСУ, 2015. – № 3 (65). – С. 311–327.
153. Копей В. Б. Прогнозування міцності склопластикових насосних штанг методом акустичної емісії / В. Б. Копей, В. П. Ройзман, І. І. Ковтун // *Методи та прилади контролю якості*. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2002. – № 9 – С. 7–10.
154. Копей В. Б. Діагностика міцності насосних штанг за допомогою методу акустичної емісії / В. Б. Копей, В. П. Ройзман, І. І. Ковтун // *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2003. – С. 189–195.
155. Silin R. I. Improving Reliability of Machine Units and Details by Acoustic Emission Diagnosing / R. I. Silin, V. P. Rozyman, I. I. Kovtun // *Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China*. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.

-
156. ГОСТ 21931–76. Припой оловянно-свинцовые в изделиях. – М. : Гос. стандарты СССР, 1978. – 10 с.
157. ОСТ 4 ГО.054.089. Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры. Пайка монтажных соединений. Типовые технологические процессы. – Введ. 01.10.82. – 1982. – 117 с.
158. Kovtun I. Acoustic emission diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, V. Rozyman, A. Voznyak // *Quality and Reliability of Technical Systems: Theory and Practice. JVE Book Series on Vibroengineering. Vol. 2. JVE International Ltd.* – Vilnius, Lithuania, 2018. – P. 214–229.
159. Kovtun I. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // *The Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017) : Proceedings of a meeting held, 11–15 September 2017, Odessa, Ukraine.* – P. 1–4.
160. 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.
161. Shear strength and fracture surface analysis of Sn58Bi/Cu solder joints under a wide range of strain rates / Yongqiang Wan, Shuang Li, Xiaowu Hu, Yu Qiu, Tao Xu, Yulong Li, Xiongxin Jiang // *Microelectronics Reliability – Elsevier*, 2018. – Vol. 86. – P. 27–37.
162. Bansal A. Method for early detection of PCB bending induced pad cratering / A. Bansal, G. Ramakrishna, K. Liu // [Proceedings of IEEE 61st Electronic Components and Technolgy Conf. \(ECTC\)](#), Lake Buena Vista, FL, USA, 2011. – Lake Buena Vista : IEEE, 2011. – P. 1255–1262.
163. Reliability of thermally stressed rigid–flex printed circuit boards for High Density Interconnect applications / A. Salahouelhadj, M. Martiny, S. Mercier, L. Bodin and others // [Microelectronics Reliability](#). – Elsevier, 2014. – Vol. 54, Issue 1. – P. 204–213.
164. Acoustic emission detection of BGA components in spherical bend / [W. Carter Ralph](#), [Gregory L. Daspit](#), [Andrew W. Cain](#) and others // *Proceedings of IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conf. (ECTC)*, 28–31 May 2013, Las Vegas, NV, USA. – Las Vegas : IEEE, 2013. – P. 208–213.
165. *Electronic packaging: design, materials, process, and reliability* / John H. Lau, C. P. Wong, John L. Prince, Wataru Nakayama. – New York: McGraw-Hill Professional, 1998 – 496 p.
166. Пат. UA 41138 А Україна, МКИ G 01 N 29/04. Пристрій для визначення координат джерела акустичної емісії / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, А. В. Горошко, С. В. Прохоренко : заяв. та патентовласник Хмельн. нац. ун-т. – № 2001031425; заявл. 01.03.2001 ; опубл. 15.08.2001; Бюл. №7. – 3 с. : іл.
167. Пат. UA 43125 А Україна, МКИ G 01 N 29/04. Спосіб визначення координат дефектів методом акустичної емісії / В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, А. В. Горошко, С. В. Прохоренко : заяв. та патентовласник Хмельн. нац. ун-т. – № 2001031426 ; заявл. 01.03.2001 ; опубл. 15.11.2001, Бюл. № 10. – 3 с. : іл.
168. Пат. UA 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 : заяв. та патентовласник Хмельн. нац. ун-т. – № 2001128312; заявл. 04.12.2001 ; опубл. 16.12.2002 ; Бюл. №12. – 3 с. : іл.
169. *Измерения в электронике : справочник* / В. А. Кузнецов, В. А. Долгов, В. М. Колевских и др. ; под ред. В. А. Кузнецова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 512 с. : ил.
170. Бойко Ю. М. Методи неруйнівної діагностики надійності герметизації модулів надвисоких частот / Ю. М. Бойко, І. І. Ковтун, С. А. Петрашук, О. В. Ковальчук // *Віс-*

ник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 6, т. 1. – С. 227–233.

171. Kovtun I. Nondestructive hermetic seal diagnostics and prediction method for super-high-frequency modules / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 20–24 Feb. 2018, Ukraine. – P. 776–780.

172. Boiko J. M. Non-destructive strength and hermetic seal diagnostics and prediction of super-high-frequency electronic modules, / J. M. Boiko, V. P. Royzman, I. I. Kovtun, S. A. Petrashchuk // Coordination problems of military technical and deensive industrial policy in Ukraine. Weapons and military equipment development perspectives : proceedings of V International Scientific and Practical Conference. – Kyiv, 2017. – P. 93–94.

173. Неруйнівне діагностування і прогнозування міцності та герметичності корпусів електронних модулів НВЧ / Ю. М. Бойко, В. П. Ройзман, І. І. Ковтун, С. А. Петрашчук // Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки : V Міжнар. наук.-практ. конф., 11–12 жовтня 2017 р. – Київ : МВЦ «Зброя та безпека 2017». – С. 223–225.

174. Kovtun I. Method for non-destructive testing by acoustic emission / I. Kovtun, S. Petrashchuk // Modern achievements of science and education : proceedings of III International conference, 16–23 September 2009, Tel Aviv, Israel. – Khmel'nitskiy : KhNU, 2009. – P. 54–57.

175. Ландау Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособ. В 10 т. Т. V. Статистическая физика. Ч. I / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 5-е изд. – М. : Физматлит, 2003. – 616 с.

176. [Tonolini F.](#) General review of developments in Acoustic Emission methods / [F. Tonolini](#), [A. Sala](#), [G. Villa](#) // [International Journal of Pressure Vessels and Piping](#). – Elsevier Ltd, 1987. – Vol. 28, Issues 1–5. – P. 179–201.

177. ГОСТ 20.57.406–81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – М. : Стандарт-информ, 1982. – 133 с.

178. Effects of System Design on Fatigue Life of Solder Joints in BGA Packages Under Vibration at Random Frequencies / M. Samavatian, L. K. Ilyashenko, A. Surendar, A. Maselena, V. Samavatian // [Journal of Electronic Materials](#), 2018. – Vol. 47, [Issue 11](#). – P. 6781–6790.

179. [Qi X.](#) Effect of solder joint parameter on vibration fatigue reliability of high density PCB assembly / [X. Qi](#), [B. Zhou](#), and [Y. En](#) // [Proceedings of International conf. on quality, reliability, risk, maintenance, and safety engineering](#), Xi'an, China, 17–19 June 2011. – Xi'an, China : IEEE, 2011. – P. 1–4.

180. [Prashanth M. D.](#) Vibration analysis of printed circuit boards: Effect of boundary condition / [M. D. Prashanth](#) // Proceedings of First International Conf. on Design, Materials and Manufacture (ICDEM), Karnataka, India, 20 April 2018. – Vol. 1943, Issue 1.

181. [Lall P.](#) Identification of failure modes in portable electronics subjected to mechanical-shock using supervised learning of damage progression / P. Lall, [P. Gupta](#), [K. Goebel](#) // Proceedings of [IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference \(ECTC\)](#), Lake Buena Vista, FL, USA, May 2011. – Lake Buena Vista : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. – P. 1944–1957.

182. Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjin, China. – Tianji, 2004. – P. 2217–2221.

183. Reliability study of package-on-package stacking assembly under vibration loading / [J. Xia](#), [L. Cheng](#), [G. Li](#), [B. Li](#) // [Microelectronics reliability](#). – Elsevier, 2017. – [Vol. 78](#). –

P. 285–293.

184. Токарев М. Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / М. Ф. Токарев, Е. Н. Талицкий, В. А. Фролов. – М. : Радио и связь, 1984. – 224 с.

185. Даммер А. Испытания радиоэлектронной аппаратуры и материалов на воздействие климатических и механических условий / А. Даммер, Б. Гриффин. – М. : Энергия, 1965. – 568 с.

186. Kovtun I. Identification of Natural Frequency and form of Oscillation for Electronic Packages Subjected to Vibration / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk // Proceedings 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2018. – P. 621–626.

187. ДСТУ 3348–96 Радіоелектронні засоби. Конструкції несівні. Терміни та визначення. – Чинний від 1997-07-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 1997. – 23 с.

188. ДСТУ 3040–95 Апаратура радіоелектронна. Конструкції базові несівні уніфіковані. Типи і розміри. – Чинний від 1996-07-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 1996. – 11 с.

189. Писаренко Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов : справочник / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев : Наук. думка, 1971. – 375 с.

190. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – 4-е изд. – М. : Наука, 1978. – 831 с.

191. Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания / Дж. П. Ден-Гартог. – М. : Физматгиз. 1960. – 580 с.

192. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – М. : Наука, 1971. – 239 с.

Пановко Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова. – М. : Наука, 1967. – 420 с.

Зміст

Перелік умовних скорочень	3
---------------------------------	---

Вступ.....	5
------------	---

Розділ 1.

Аналіз методів оцінки напружено-деформованого стану та міцності несівних конструкції електронної техніки

1.1. Методи експериментального дослідження деформацій деталей та вузлів електронної техніки ..	7
1.1.1. Вибір методів визначення напружено-деформованого стану	7
1.1.2. Вибір методів неруйнівного контролю та діагностики міцності	9
1.1.3. Вибір методів досліджень динамічної міцності.....	14
1.2. Розрахунково-експериментальні методи оцінки впливу статичних і динамічних навантажень на вироби електронної техніки	18
1.2.1. Оцінка напружено-деформованого стану та міцності несівних конструкцій електронної техніки.....	19
1.2.2. Оцінка міцності виробів електронної техніки під дією динамічних навантажень	22
1.2.3. Захист виробів електронної техніки від зовнішнього навантаження	25
1.3. Стратегічні напрями сучасних досліджень	29

Розділ 2.

Методи експериментального дослідження деформацій деталей і вузлів електронної техніки

2.1. Розробка системи електротензометричного контролю.....	32
2.1.1. Забезпечення точності вимірювання дротяних тензорезисторів	32
2.1.2. Монтаж тензорезисторів.....	36
2.1.3. Тарування тензорезисторів.....	37
2.1.4. Схеми включення тензорезисторів	38
2.1.5. Рекомендації щодо препарування тензорезисторами об'єктів досліджень	41
2.1.6. Вдосконалення та модифікація апаратури для вимірювання статичних і динамічних деформацій	43
2.1.7. Визначення допустимої величини струму живлення тензорезисторів	45
2.2. Розробка системи акусто-емісійного контролю	47
2.2.1. Реєстрація сигналів акустичної емісії.....	47
2.2.2. Розробка системи акустико-емісійного контролю	49
2.2.3. Основні параметри і характеристики акусто-емісійного приладу АФ-15.....	50
2.2.4. Параметри сигналів акустичної емісії	51
2.2.5. Точність визначення параметрів акустичної емісії	52
2.3. Розробка і вдосконалення вібровимірювальної системи	54
2.3.1. Випробування на виявлення резонансних частот	54
2.3.2. Методи випробування на вібростійкість та віброміцність	55
2.3.3. Засоби для проведення вібраційних випробувань	58
2.3.4. Вибір та обґрунтування вібраційної установки.....	59
2.3.5. Тарування вібровимірювальної апаратури	60
2.3.6. Відбрюбстеження платформи вібростенду.....	61
2.3.7. Високошвидкісна відеозйомка у вібродіагностиці	62

Розділ 3.
Монтажні деформації та неруйнівна діагностика
міцності конструкцій друкованих плат

3.1. Вплив технології та способів монтажу електронних компонентів на виникнення та передачу деформацій у конструкціях друкованих плат.....	63
3.1.1. Механічна модель і розрахункова схема друкованої плати з встановленими електронними компонентами	63
3.1.2. Технології формування виводів дискретних компонентів та їх вплив на передачу деформацій від друкованої плати	70
3.1.3. Оцінка монтажних напружень паяного з'єднання багатовивідних електронних компонентів	74
3.1.4. Вплив деформації основи плати на деформований стан мікросхем	75
3.1.5. Вплив герметизації та тривалості витримки друкованої плати під навантаженням згину на передачу деформацій до компонентів	77
3.1.6. Вплив деформацій монтажних плат на деформації контактних вузлів електронних компонентів	79
3.1.7. Методика визначення допустимого короблення основи плат	83
3.2. Неруйнівний контроль і діагностика технічного стану паяних з'єднань друкованих плат електронних систем	87
3.2.1. Дефекти паяних з'єднань	88
3.2.2. Випробування паяних з'єднань на відрив	89
3.2.3. Визначення руйнівних навантажень і деформацій паяних з'єднань при випробуванні конденсаторів типу SMD на розтяг	91
3.2.4. Випробування паяних з'єднань статичним навантаженням за схемою чистого згину	94
3.2.5. Площинна локація дефектів конструкцій, що містять різні матеріали.....	97
3.2.6. Методика акустико-емісійного виявлення дефектів паяних з'єднань друкованих плат	102

Розділ 4.
Експлуатаційні деформації та діагностика міцності несівних конструкцій
герметичних корпусів електронної техніки

4.1. Вибір методів і способів контролю герметичності та міцності надвисокочастотних корпусів.....	105
4.1.1. Експериментальний стенд для випробування герметичності корпусів НВЧ модулів	106
4.1.2. Підготовка стенда до проведення експериментальних досліджень	107
4.2. Випробування герметичності НВЧ корпусів під дією надлишкового тиску та температури... ..	108
4.2.1. Препарування об'єктів досліджень	108
4.2.2. Програма випробування герметичності НВЧ корпусів	110
4.2.3. Випробування корпусів під дією внутрішнього тиску і температури із застосуванням методу електротензометрії	111
4.3. Діагностика і прогнозування міцності та герметичності НВЧ корпусів різних класів методом акустичної емісії	116
4.3.1. Випробування герметичності НВЧ корпусів з одночасним використанням методів електротензометрії та акустичної емісії	116
4.3.2. Аналіз напружено-деформованого стану НВЧ корпусів за результатами електротензометрування	119
4.3.3. Аналіз акустико-емісійного вимірювання надвисокочастотних корпусів	123
4.3.4. Інформативність параметрів акустико-емісійної діагностики герметичності надвисокочастотних корпусів	128
4.3.5. Методика неруйнівного діагностування та прогнозування	

міцності і герметичності НВЧ корпусів	130
4.4. Динамічне випробування герметичності НВЧ корпусів у пульсуючому режимі навантаженням внутрішнім тиском із застосуванням методу акустичної емісії	131
4.4.1. Акустична емісія надвисокочастотних корпусів при випробуванні їх за пульсуючим циклом	131
4.4.2. Контроль міцності та попередження небезпечних станів надвисокочастотних корпусів при перепадах внутрішнього тиску за пульсуючим циклом	134
4.4.3. Акустико-емісійний прилад попередження розгерметизації НВЧ корпусів	135

Розділ 5.

Динамічні деформації в структурно-складних конструкціях електронної техніки

5.1. Передача деформацій в структурно-складних конструкціях блоків радіоелектронних засобів при випробуваннях на вібростенді	137
5.1.1. Теоретична модель коливальної системи	137
5.1.2. Передача динамічних деформацій від вібростенда до об'єкту тестування	142
5.1.3. Високошвидкісна відеозйомка коливань блока радіоелектронного пристрою	147
5.2. Елементи теорії та експериментальне дослідження коливань друкованих плат	148
5.2.1. Математична модель вібраційного аналізу та розрахунок резонансних частот коливань плоских прямокутних структур	149
5.2.2. Визначення форм і частот коливань друкованих плат експериментальними методами ...	155
5.2.3. Експериментальні дослідження частот власних коливань плат методом Гука–Хладні	156

Розділ 6.

Теорія і практика ефективного захисту друкованих плат від динамічних деформацій

6.1. Створення і модифікація пружно-дисипативних механічних зв'язків у конструкціях несівних блоків радіоелектронних засобів	161
6.1.1. Вплив механічних характеристик каркасу несівної конструкції блоків радіоелектронних засобів на збудженість коливань друкованих плат	161
6.1.2. Конструкторські рішення при створенні пружно-дисипативних зв'язків всередині та ззовні блоків РЕЗ для зниження збудження друкованих плат	167
6.1.3. Зниження передачі деформацій створенням пружно-дисипативних зв'язків у конструкції вузлів кріплення друкованих плат	170
6.1.4. Зниження вібрацій плат при віброізоляції з демпфуванням несівного корпусу блоків РЕЗ	173
6.2. Теоретичне обґрунтування способів захисту від вібрацій та розробка дискретної розрахункової моделі системи «платформа–корпус–плата»	177
6.2.1. Розрахункова схема вимушених коливань одномасової системи на пружно-демпферних опорах для захисту друкованих плат від вібрацій	177
6.2.2. Вплив геометричних, пружних та дисипативних характеристик на формування АЧХ коливань плати на тканинній стрічці з демпфером сухого тертя	187
6.2.3. Теоретичне обґрунтування впливу способів встановлення блока РЕЗ і кріплення друкованих плат з розробкою дискретної розрахункової моделі системи «платформа–корпус–плата»	190
Післямова	193
Перелік джерел посилання	196
Додатки	208

Наукове видання

*Ковтун Ігор Іванович,
Ройзман Вілен Петрович*

**Деформації
конструкцій електронної техніки
в умовах експлуатаційних навантажень**

Відповідальний за випуск: *В. С. Яремчук*

Технічне редагування, коректування і верстка: *О. В. Чопенко*

Художнє оформлення обкладинки: *О. В. Бобровський, О. В. Станіславава*

Підписано до друку 12.12.2019.

Формат 30×42/2. Папір офс. Гарн. Times New Roman.

Друк різнографією. Ум. друк. арк. – 19,72. Обл.-вид. арк. – 16,00.

Тираж 100. Зам. № 188/19

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУ.

29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1.

Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.