

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

НЕВЛЮДОВА ВІКТОРІЯ ВАЛЕРІЇВНА

УДК.621.396.6

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ
ГНУЧКИХ СТРУКТУР У ВИРОБАХ ЕЛЕКТРОННОЇ
ТЕХНІКИ**

**05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво
електронної техніки**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Лучанінов Анатолій Іванович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
професор кафедри комп'ютерної радіоінженерії
та систем технічного захисту інформації.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, доцент
Єрохов Валерій Юрійович,
Національний університет
«Львівська політехніка»,
професор кафедри напівпровідникової електроніки;

доктор технічних наук, доцент
Притчин Сергій Емільович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
професор кафедри інформаційно-управляючих систем.

Захист відбудеться «30» травня 2017 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

Автореферат розіслано «27» квітня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є. А. Разумов-Фризюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних тенденцій розвитку електронної техніки (ЕТ) є перехід від традиційних електронних модулів до комутаційних структур на гнучких основах у рамках розвитку в усьому світі напряму гнучкої гібридної електроніки. В умовах мікромініатюризації виробів ЕТ застосування гнучких структур (ГС), до яких відносяться гнучкі електронні компоненти, елементи гнучкої електроніки, друковані плати й елементи міжз'єднань, забезпечує низку переваг під час створення як стаціонарних, так і рухомих конструкцій. Особливо доцільним видається застосування подібних компонентів для авіаційної та космічної техніки, портативних телекомунікаційних пристроїв, для систем наземного та супутникового зв'язку, військової, побутової та медичної апаратури, а також для пристроїв мікросистемної техніки.

Вимоги до виробів ЕТ постійно зростають у зв'язку із жорсткістю умов їхньої експлуатації. При цьому існує проблема забезпечення якісних показників гнучких компонентів, оскільки вони можуть зазнавати великої кількості дестабілізуючих чинників на всіх етапах життєвого циклу (ЖЦ).

Таким чином, підвищення техніко-економічних показників виробів ЕТ, що досягається застосуванням ГС, супроводжується посиленням вимог до рівня конструкторсько-технологічного забезпечення та до ускладнення технологічних процесів (ТП) їх виробництва.

Проблемам розробки та дослідження ГС присвячено безліч робіт таких вчених, як Joseph Fjelstad, Peter Macleod, А. М. Медведєв, О. І. Акулін та ін. Значний внесок у теорію та практику вирішення завдань щодо забезпечення якісних показників і надійності ГС зроблено Keith Netting, В. М. Борщовим, О. М. Грушевським, Г. А. Бліновим, В. Т. Балабановим, С. М. Семеніним та ін.

Однак, незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених вирішенню проблем створення ГС, залишається протиріччя між необхідністю подальшого підвищення якості існуючих і перспективних варіантів реалізації ГС за умови зменшення їх розмірів і підвищення щільності монтажу та водночас – обмеженістю відомих підходів до технологічного забезпечення якості таких структур. Все це свідчить про те, що технологічне забезпечення якості ГС у виробках ЕТ, а також удосконалення методів оцінки та прогнозування їх якісних характеристик на етапах проектування, виробництва і експлуатації є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, проводилися відповідно до держбюджетних тем НДР, виконаних у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ): «Конструктивно-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем та технологій їх виробництва» (ДР № 0108U002216); «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (ДР 0113U000358); «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями та їх впровадження» (ДР № 0113U003582); «Створення мікромініатюрних компонентів

електромеханічних інтелектуальних технологічних засобів промислового обладнання та робототехніки» (ДР № 0115U002433).

Автор брала участь у виконанні даних робіт як виконавець.

Метою дисертаційної роботи є підвищення якості ГС у виробках електронної техніки шляхом розробки технологічного забезпечення їх виробництва на основі досліджень електрофізичних і технологічних параметрів ГС та їх рознімних і нерознімних з'єднань.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення таких завдань:

- аналіз конструктивно-технологічних особливостей ГС і дестабілізуючих чинників, що впливають на якість ГС у виробках ЕТ;
- розробка фізико-технологічної моделі для прогнозування якості ГС і параметрів ТП їх виготовлення;
- розробка моделі руйнування ГС під впливом циклічних пружнопластичних деформацій;
- розробка методу контактування ГС зі з'єднувальними пристроями у складі виробів ЕТ, а також технології виготовлення плаского з'єднувача для ГС;
- моделювання напружено-деформованого стану ГС і експериментальні дослідження механічних впливів на ГС;
- вибір оптимальних технологічних режимів операції ультразвукового (УЗ) зварювання багатошарових ГС;
- верифікація й апробація розроблених моделей і методів забезпечення якості ГС та розробка практичних рекомендацій щодо технологічного забезпечення необхідного рівня якості ГС.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення гнучких структур.

Предмет дослідження – гнучкі структури та фізико-технологічні параметри, що забезпечують їх якість у виробках електронної техніки.

Методи дослідження. Під час проведення дисертаційних досліджень використовувалися: метод скінченних елементів, положення теорії пружності, методи математичного та комп'ютерного моделювання – для розробки моделі руйнування й оцінки напружено-деформованого стану ГС; метод регресійного аналізу та положення теорії факторного експерименту – для розробки експериментальної моделі процесу УЗ-зварювання ГС; методи системології – під час розробки фізико-технологічної моделі параметрів ГС для прогнозування якості ГС і ТП їх виготовлення; положення теорії надійності та математичної статистики, методи експериментальних досліджень – для оцінки впливу механічних чинників на параметри ГС.

Наукова новизна отриманих результатів. У процесі вирішення завдань відповідно до мети досліджень отримано такі наукові результати:

- запропоновано фізико-технологічну модель параметрів ГС, яка на відміну від відомих дозволяє прогнозувати якісні характеристики ГС і ТП їхнього виготовлення за рахунок обробки великого масиву даних;
- удосконалено математичну модель руйнування ГС, що дозволяє, на відміну від відомих моделей, виробити додаткові технологічні рекомендації щодо забезпечення якості ГС за рахунок аналізу їх фізико-технологічних параметрів і режимів експлуатації у складі виробів ЕТ;

- вперше обґрунтовано метод контактування ГС на основі плаского з'єднувача з нульовою силою вставки, який відрізняється тим, що за рахунок забезпечення рівномірного тиску на всі виводи ГС дозволяє підвищити якість її з'єднання з компонентами ЕТ;

- розроблено й обґрунтовано технологію виготовлення ГС на поліімідному носії, що забезпечує формування якісних нерознімних і рознімних з'єднань мікромодулів за рахунок реалізації міжшарових з'єднань та монтажу безкорпусної елементної бази УЗ-зварюванням і паяння кулькових виводів для отримання контактів з'єднувача з нульовою силою вставки.

Практична цінність. Результати досліджень реалізовані на практиці у вигляді конструктивних рішень, що складають основу для технологічного забезпечення якості ГС у складі виробів ЕТ, а саме:

- розроблені конструкція плаского з'єднувача з нульовою силою вставки для ГС і технологія його виготовлення;

- розроблені технологічні інструкції для забезпечення якості ГС на етапі їх виробництва;

- розроблені випробувальні стенди, використання яких дозволяє дослідити вплив механічних дій на фізико-технологічні параметри ГС із малими масогабаритними характеристиками, і, в результаті, виробити рекомендації з технологічного забезпечення якості ГС.

Викладені рішення захищені патентами на корисні моделі № 103402 «Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки» (від 10.12.2015 р.), № 102880 «Низькочастотний вібростенд» (від 25.11.2015 р.), № 108066 «Стенд для динамічних випробувань гнучких комутаційних шлейфів та МЕМС-компонентів» (від 24.06.2016 р.) та авторським свідоцтвом № 67459 «Автоматизована система проектування гнучких комутаційних структур «Flexible PCB Designer» (від 26.08.2016 р.).

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджені на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (НДТІП, м. Харків, акт від 22.02.2017 р); на підприємстві ТОВ «НВП «Укрінтех» (акт від 01.03.2017 р.), а також у навчальний процес на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету (акт від 23.01.2017 р.), на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського (акт від 30.01.2017 р.) та на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ (акт від 13.02.2017 р).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, наведені у дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. Роботи [8, 10, 14, 15, 17] написані без співавторів і містять: [8] – запропоновану модель розвитку виробничих дефектів у виробках ЕТ, засновану на аналізі деградаційних процесів у них; [10] – результати дослідження особливостей проектування й експлуатації виробів ЕТ на основі ГС; [14, 17] – результати дослідження процесу формування мікроз'єднань у ГС методом УЗ-зварювання й аналізу впливу надійності таких з'єднань на якість виробів ЕТ; [15] – сформульовані завдання забезпечення життєвого циклу електронних систем.

У публікаціях, написаних у співавторстві, внесок здобувача полягає в тому, що: [1, 3] – запропоновано методи дослідження ГС за умови зовнішніх

дестабілізуючих впливів на них; [2, 12] – запропоновано метод контактування ГС на основі плаского з'єднувача з нульовою силою вставки; [4, 23] – розроблено моделі параметрів ГС і запропоновано алгоритм оцінки їх параметрів на етапі проектування ГС; [5, 20, 22, 25, 26] – розроблено технологію випробувань ГС і експериментально досліджено вплив вібраційних і динамічних дій на параметри ГС у складі виробів ЕТ; [6, 18] – досліджено вплив технологічних режимів операції УЗ-зварювання на надійність монтажних з'єднань у ГС і запропоновано модель процесу монтажу методом УЗ-мікрозварювання; [7, 16, 21, 24] – запропоновано метод аналізу параметрів ГС на основі фізико-технологічної моделі з метою автоматизації прогнозування стану ГС на етапах проектування, виготовлення й експлуатації; [9] – виконано аналіз надійності зварних з'єднань у багатошарових ГС; [11] – запропоновано модель руйнування ГС під впливом вигинань, сформовано рекомендації з технологічного забезпечення якості ГС; [13] – проведено аналіз дефектів ГС у складі багатозондового підмикального пристрою; [19] – отримано результати дослідження друкованої котушки індуктивності на основі ГС.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-технічних конференціях і симпозіумах: 9-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013» (22-26 квітня 2013 р., м. Севастополь); VII-й та VIII-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (2014, 2016 рр., м. Запоріжжя); 25-й Міжнародній конференції «Новые технологии в машиностроении» (3-8 вересня 2015 р., с. Коблево); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (16-20 березня 2015 року, м. Черкаси); 19-му та 20-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі» (2015-2016 рр., м. Харків); Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (October 13-15, 2015, Kharkiv); Міжрегіональній науково-практичній конференції молодих вчених «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології (16-17 листопада 2015 р., м. Красноармійськ); IV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (26-28 травня 2016 р., м. Кременчук); II-й Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень» (23-27 травня 2016 р., м. Красноармійськ); XV-й Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (м. Кременчук, 7-9 листопада 2016 р.).

Публікації. За темою дисертації з викладенням основних її результатів опубліковано 26 наукових праць, у тому числі 3 патенти на корисні моделі та одне авторське свідоцтво на програмне забезпечення, 10 статей у наукових фахових виданнях України та Білорусі (серед них 7 внесені до міжнародних науково-метричних баз), 12 тез доповідей у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій (серед них 1 включено до науково-метричної бази даних SCOPUS).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 257 сторінок, що включає 76 рисунків (на 31 сторінці), 21 таблицю (на 8 сторінках), 9 додатків (на 56 сторінках) та список використаних джерел зі 127 найменувань (на 13 сторінках).

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, завдання досліджень, які вирішуються у дисертаційній роботі, а також викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, апробації та особистий внесок здобувача у публікаціях.

У **першому розділі** проведено аналіз особливостей застосування ГС, їх конструктивно-технологічних та експлуатаційних параметрів і проаналізовано методи забезпечення якості ГС у виробках ЕТ.

Показано, що гнучкі структури широко використовуються як у виробках ЕТ спеціального призначення (акселерометри, гіроскопи, стабілізатори положення, медична техніка), так і в пристроях широкого застосування (мобільні телефони, планшети, ноутбуки, навігатори, відеокамери, диктофони та ін.) і виконують різноманітні функції, у тому числі забезпечення виробництва компонентів методами групової технології без використання складальних операцій. На цей час актуальними є завдання заміни жорстких електронних компонентів гнучкими з метою підвищення їх якості, функціональних можливостей, надійності та зменшення масогабаритних характеристик, трудомісткості виготовлення, вартості, а також розробки технологічної оснастки для виробництва виробів ЕТ, в яких використовуються особливості ГС.

Крім того, зазначено, що у міру ускладнення конструкцій нових видів виробів ЕТ на основі ГС може знижуватися ефективність їх проектування, виробництва й експлуатації, зокрема, за їх широкого впровадження у конструкціях компонентів мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Також для багат шарових ГС слід враховувати взаємодію між матеріалами, конструкцію та технологію складання, щоб уникнути потенційно можливих проблем із різним ступенем розширення та гнучкістю шаруватого матеріалу, зі зміщенням матеріалу, впливом вологості та ін.

Відомо, що від 30 до 50 % відмов виробів ЕТ викликають механічні впливи, які призводять до механічних руйнувань і порушень стійкості роботи виробів. Саме до впливу механічних дій найбільш схильні ГС у процесі експлуатації.

Виявлено, що основними показниками якості ГС, що характеризують ступінь їх відповідності цільовому призначенню, конструктивному виконанню, стійкості до зовнішніх впливів у складі виробів ЕТ, є такі:

$$P_{NAZ} = \{r, N, R_c, P_c, Y\},$$

де r – радіус вигину ГС; N – кількість циклів до деформації ГС; R_c – перехідний опір у рознімному з'єднанні ГС із ZIF-конектором; P_c – зусилля притиснення ГС до виводів з'єднувача; Y – міцність нерознімних з'єднань у ГС.

Таким чином, для підвищення якості ГС у виробках ЕТ мають бути вирішені такі основні завдання, як технологічне забезпечення виготовлення ГС, моделювання та прогнозування їх параметрів на етапах проектування, виготовлення й експлуатації на основі аналізу умов і режимів роботи виробів ЕТ, параметрів ТП виготовлення ГС, а також їх вихідних параметрів.

У другому розділі розглядаються моделі забезпечення якості ГС у складі виробів ЕТ на етапах проектування та виготовлення. Зокрема, запропоновано метод прогнозування параметрів ГС на основі фізико-технологічної моделі, який дозволяє своєчасно виявляти критичні значення електромеханічних параметрів ГС під час її експлуатації, а також вносити коректування у ТП виготовлення такої структури.

Проведено аналіз дестабілізуючих факторів, що впливають на роботу ГС у складі виробів ЕТ. Детально розглянуто механічні впливи та реакція ГС на них. Для цього у роботі застосовано апарат системного аналізу. Згідно з ним взаємодія різнорідних фізичних процесів у ГС може бути описана системою рівнянь

$$W\{X(\psi), Y(\psi), B(Z)\} = 0, \quad (1)$$

де W – оператори моделей, що зв'язують між собою вхідні впливи $X(\psi)$, вихідні характеристики $Y(\psi)$ і внутрішні параметри $B(Z)$; Z – множина зовнішніх впливів; ψ – незалежний аргумент (час, частота, просторова координата).

Вихідний параметр $Y(\psi)$ з урахуванням дестабілізуючих чинників матиме вигляд:

$$Y(\psi) = \{Y_e(\psi), Y_{em}(\psi), Y_\alpha(\psi), Y_{ня}(\psi)\}, \quad (2)$$

де $Y_e(\psi)$ – вектор вихідних параметрів моделі електричних процесів; $Y_{em}(\psi)$ – вектор вихідних параметрів моделі електромагнітних процесів; $Y_\alpha(\psi)$ – вектор вихідних параметрів моделі механічних процесів; $Y_{ня}(\psi)$ – вектор вихідних параметрів моделі надійності та якості.

Зокрема, модель механічних процесів у ГС має вигляд:

$$W_{mex}\{[\alpha_{in}(\psi)], [\alpha_e(\psi), \tau_p], [B_e(\psi), B_k]\} = 0, \quad (3)$$

де $\alpha_{in}(\psi)$ – множина вібрацій (гармонійних і випадкових), ударів і лінійних прискорень, що впливають на досліджуваний об'єкт; $\alpha_e(\psi)$ – множина прискорень електронних компонентів; τ_p – множина значень часу до руйнування виводів електронних компонентів; $B_e(\psi)$ – множина внутрішніх електричних параметрів, що характеризують певний фізичний процес; B_k – множина геометричних параметрів ГС.

На основі системного підходу розроблено метод оцінки параметрів ГС у складі виробів ЕТ. Модельований об'єкт представляється сукупністю змінних, які приймають значення у кінцевій множині. Залежно від завдання дані можуть бути отримані зі спостережень або за допомогою вимірювань (як у завданні моделювання систем) або визначені як бажаний стан (під час проектування систем).

Розроблена фізико-технологічна модель припускає табличне представлення даних про систему, для якої проводиться вибір задавального параметра та змінних, що є найбільш значущими для аналізу змін властивостей системи (її поведінки). За такого представлення послідовність етапів прогнозування включає в себе: визначення найбільш важливого задавального параметра (час, механічне зусилля, цикли роботи виробу тощо); виділення найбільш значущих змінних, що мають конкретні значення за певних значень параметра; визначення можливого діапазону варіювання змінних; зведення значень змінних до таблиці, що показуватиме їх зв'язок із величиною параметра; знаходження маски, тобто значень змінних, що в табличній моделі повторюються в певній комбінації; визначення частоти того чи іншого стану системи та в результаті – визначення функції поведінки системи.

Важливим завданням у процесі побудови моделі відображення параметрів ГС або ТП її виготовлення є вибір даних для стовпців таблиці масиву даних, які дозволяють із використанням масок простежити розвиток системи.

За досліджувані зразки було обрано пристрої на основі ГС, що функціонують у найбільш жорстких умовах порівняно з іншими пристроями та в яких за умови впливу на конструктивний елемент вібрації малого рівня виникає динамічна пружна деформація, а за великого рівня вібрацій може виникнути пластична деформація. Якщо ж вібрації будуть ще більші, то може відбутися руйнування конструкції.

У такому випадку змінними виступають такі величини: ν_1 – амплітуда коливань ГС; ν_2 – частота коливань ГС; ν_3 – зміщення частоти пристрою на основі ГС відносно резонансної; ν_4 – затримка розповсюдження сигналу в ГС (табл. 1). Ці діапазони можна представити значеннями 0, 1, 2, 3 множин V_1-V_4 . Наприклад, для ν_1 : 0 – низькі амплітуди коливань; 1 – амплітуда в межах допустимих значень; 2 – амплітуда коливань, що перевищує межі, допустимі для ГС; 3 – амплітуди коливань, критичні для механічної цілісності всього виробу ЕТ.

Ступінь можливості стану c , що належить множині S , являє собою імовірнісну функцію поведінки $f_{нов}(c)$ і визначається як відношення частоти стану $M(c)$ до максимальної зафіксованої частоти $max M(\alpha)$

$$f_{нов}(c) = M(c) / max M(\alpha), \alpha \in S. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Стани досліджуваної системи та значення функції поведінки

| Стани c | Вибіркові змінні стану ГС | | | | Частота станів $M(c)$ | Імовірнісна функція поведінки $f_{нов}(c)$ |
|-----------|---------------------------|---------|---------|---------|-----------------------|--|
| | ν_1 | ν_2 | ν_3 | ν_4 | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,167 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 6 | 1,000 |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0,667 |
| 4 | 0 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0,333 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0,833 |

Для того, щоб знизити трудомісткість вирішення задачі аналізу даних запропоновано ввести візуалізацію зміни процесів у ГС, з використанням розробленого програмного засобу (ПЗ), інтерфейс якого наведено на рис. 1.

Завдяки подібній візуалізації процесу зміни параметрів ГС і виробів на їх основі з використанням табличного та графічного відображення даних (рис. 2) можна простежити динаміку зміни елементів системи у часі, виконати оцінку їх стабільності та характеру впливу задавальних параметрів на них, а також визначити граничні значення параметрів.

Особа, яка приймає рішення, може також проаналізувати поведінку системи для того часового інтервалу, який виходить за межі експериментальних чи розрахункових результатів, але дозволяє судити про стан виробу на етапі його подальшої експлуатації.

Відмінною рисою такого підходу є можливість комплексної оцінки параметрів ГС у складі виробів ЕТ на тих етапах ЖЦ виробів, що включають проектування, виробництво й експлуатацію.

Окрім того, під час аналізу масиву великого обсягу даних завдяки запропонованому методу проектувальник може здійснювати вибір оптимального варіанта конструкції ГС чи виробу ЕТ на їх основі або варіанта ТП виготовлення такого виробу залежно від різних початкових умов (наприклад, технічних вимог, вимог щодо надійності або вартості виробу ЕТ).

У третьому розділі на основі попередньо проведеного аналізу варіантів застосування ГС у конструкціях виробів ЕТ розроблено математичну модель руйнування ГС. Одним із основних застосувань ГС є елементи міжз'єднань різноманітних ділянок електронних пристроїв, створених із жорстких друкованих плат. Крім цього, на основі ГС виготовляються антени, котушки індуктивності тощо.

З результатів аналізу, виконаного у першому розділі роботи, витікає, що поряд із перевагами ГС виникає і безліч труднощів у процесі їхньої розробки та експлуатації, багато з яких пов'язані з іншим, порівняно із традиційними електронними компонентами, механізмом руйнування. Якщо жорсткі елементи конструкцій виробів ЕТ руйнуються шляхом виникнення мікротріщин і подальшого їх розростання, то для ГС існує три найбільш небезпечних і поширених причини руйнування:

- пружнопластичні деформації за умов багаторазових згинань (даний вид деформацій прийнято вважати найбільш небезпечним);

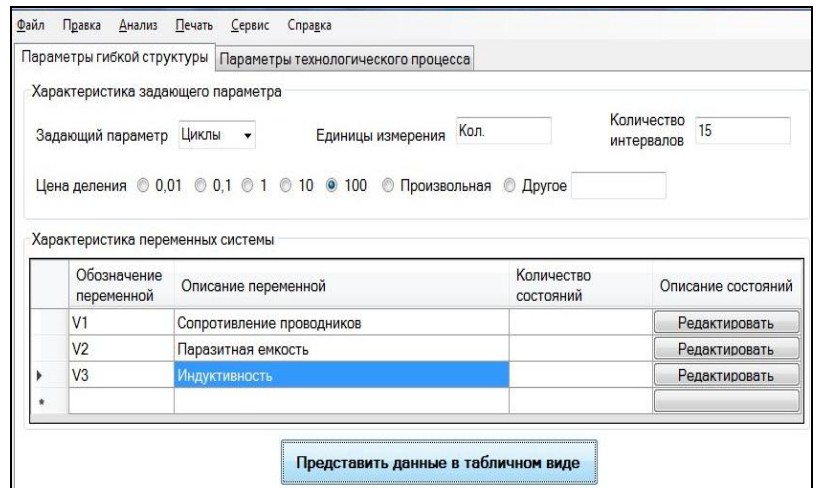


Рисунок 1 – ПЗ для визначення функції поведінки системи

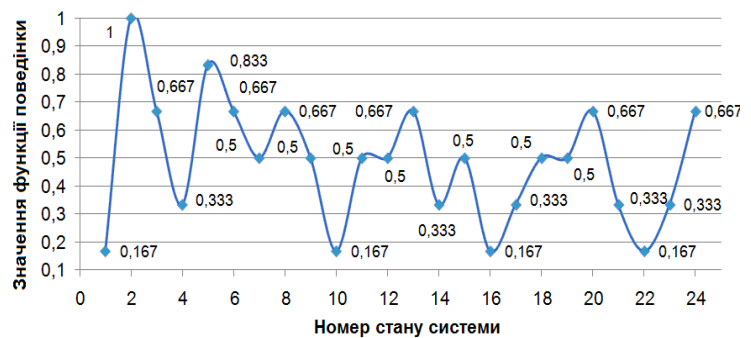


Рисунок 2 – Графічне відображення функції поведінки системи

- пружнопластичні деформації розтягування;
- резонансне руйнування за умов «робочого» (розтягнутого) стану ГС.

Крім руйнування гнучкої основи ГС також можливе порушення її працездатності через руйнування електричних з'єднань у місцях встановлення на ГС електронних компонентів.

Розроблено модель руйнування ГС в умовах циклічних пружнопластичних деформацій ГС за умов багаторазових згинань. Небезпеку даного виду руйнування ГС можна знизити шляхом обмеження мінімального допустимого радіуса кривизни та розробки конструкції виробу ЕТ, у якому ГС встановлена так, щоб не допускати подібних згинань, а також шляхом попереднього розрахунку максимальної кількості допустимих згинань із метою визначення терміну заміни ГС (рис. 3).

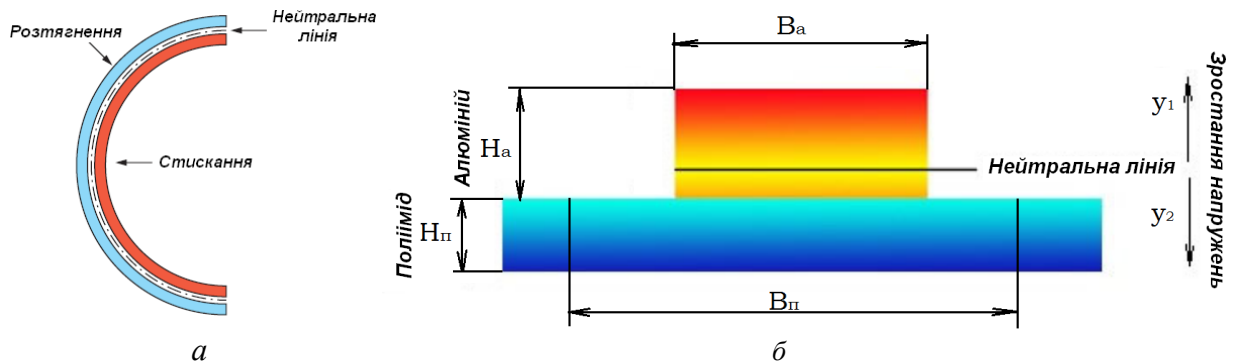


Рисунок 3 – Деформація ГС під час згинання (а) і зростання внутрішніх напружень у провіднику ГС залежно від відстані до нейтральної лінії (б)

У зв'язку з тим, що модуль пружності шару алюмінію значно перевищує модуль пружності шару поліімиду, нейтральна лінія розташовується у шарі алюмінію. Проведено аналіз розташування нейтральної лінії у ГС, виготовленої з лакофольгованого діелектрика ФДИ-А-50 (товщина алюмінію $h_{Al} = 30$ мкм, товщина поліімиду $h_{ni} = 20$ мкм) із розмірами 100×50 мм (рис. 4).

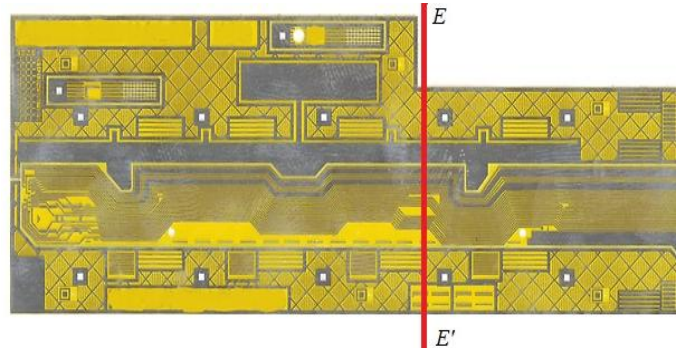


Рисунок 4 – Досліджувана ГС

Нормальні напруження σ_a та σ_n , які діють вздовж осі, що перпендикулярна площині ГС, в алюмінієвому провіднику та поліімідній плівці відповідно визначаються з рівнянь:

$$\sigma_a = \frac{y_1}{\rho} E_a, \quad \sigma_n = \frac{y_2}{\rho} E_n, \quad (5)$$

де ρ – радіус кривизни ГС; y_1 і y_2 – відстань від нейтральної лінії для алюмінію та поліімиду відповідно; E_a – модуль пружності алюмінію; E_n – модуль пружності поліімиду.

Розглянуто вигин ГС уздовж осі E-E'. Провідники на ГС мають ширину 0,3 мм, 1 мм і 2,8 мм та розташовані під кутами 90° і 45° щодо лінії вигину. Відстань між провідниками становить 0,3 мм.

Для визначення відстані від нейтральної лінії до верхньої поверхні шару алюмінію отримано вираз:

$$h_a = \frac{0,5 \cdot E_a B_a H_a^2 + E_n H_n B_n H_a + 0,5 \cdot E_n B_n H_n^2}{E_a B_a H_a + E_n B_n H_n}, \quad (6)$$

де H_a – товщина шару алюмінію; H_n – товщина шару поліїмиду; B_a – ширина алюмінієвого провідника; B_n – ширина поліїмиду під провідником (ширина провідника та відстань між провідниками ГС).

Допустимий радіус вигину ГС визначається за формулою

$$\rho = \frac{h_a}{\varepsilon_y},$$

де ε_y – пружна відносна деформація ГС.

Результати моделювання наведені на рис. 5–6.

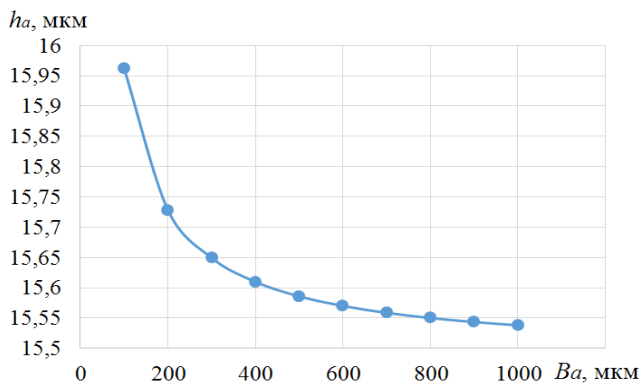


Рисунок 5 – Розташування нейтральної лінії залежно від ширини провідників

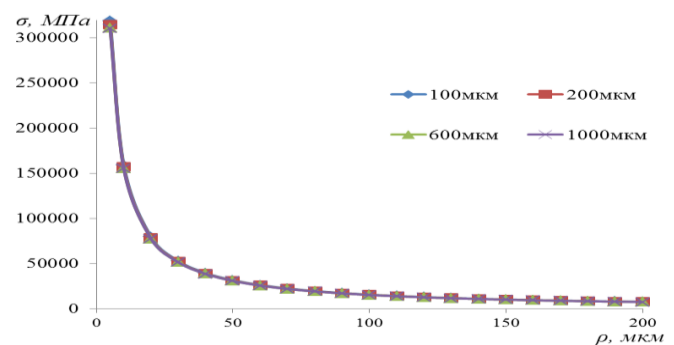


Рисунок 6 – Залежність механічних напружень, що виникають у граничних ділянках алюмінієвих провідників різної ширини, від радіуса вигину ГС

Отримані результати моделювання показали, що ширина провідників, яка змінюється в досить великому діапазоні від 100 мкм до 1 мм, не дуже впливає на значення механічних напружень, що виникають у ГС під час згинання. Також визначено, що для ГС, виготовлених з матеріалу марки ФДИ-А-50, не бажано допускати радіус вигину менше 70 мкм, оскільки при цьому напруження, які виникають у структурі, не призводять до пластичної деформації провідників.

Проведений аналіз видів деформацій, що виникають у ГС і призводять до їх руйнування, дозволив запропонувати технологічні рекомендації з розробки топології ГС, що застосовуються у виробках ЕТ і МЕМС-компонентах:

- для зменшення впливу на алюмінієву провідникову систему деформацій типу «згинання» доцільно вибрати поліїмідний фольгований матеріал із більш тонким шаром алюмінію, що дозволяє зменшити відстань від нейтральної лінії до граничних шарів провідника та призводить до зниження нормальних напружень у даних шарах і, у свою чергу, допускає менший радіус вигину ГС;

- у процесі виготовлення одношарових ГС доцільно використовувати захисне поліїмідне покриття, що дозволяє не тільки забезпечити більш високий ступінь захисту тонкої фольгованої провідникової системи, але і змістити нейтральну лінію до центральних шарів провідників. ГС із захисним поліїмідним покриттям порівняно з незахищеними, дозволить додатково знизити нормальні напруження у граничних шарах алюмінію;

- під час трасування ГС необхідно дотримуватися стратегії, що дозволяє максимізувати динамічний час життя і надійність за умови статичної гнучкості. Для цього провідники в зоні ймовірних деформацій мають відповідати таким умовам: перпендикулярність до напрямку вигину; рівномірний розподіл по області згинання; максимально можлива ширина в області згинання; відсутність додаткової розширеної металізації; постійна ширина; «шахове» розташування в сусідніх шарах (для багатошарових ГС); кількість шарів у гнучкій частині має бути зведена до мінімуму (для багатошарових ГС); металізовані наскрізні отвори не допускаються, для міжшарових з'єднань і для встановлення елементів на ГС доцільно використовувати УЗ-зварювання; «нейтральна лінія згинання» має проходити через центр перетину провідника;

- під час розробки топології ГС бажано створення на її краях спеціальних технологічних зон металізації (невитравлених фольгованих елементів) для додаткового зміцнення ГС за умови деформацій типу «розрив». У цих зонах можуть розташовуватися реперні знаки для суміщення фотомасок і шарів ГС, тестові елементи для міжшарових з'єднань і т. ін. Відповідно до розрахунків, за рахунок технологічної зони ширина провідникової системи в зоні деформації досліджуваної ГС збільшується з 3,8 до 14 мм, а допустимі навантаження розтягування з 0,412 до 1,4278 Н.

Зазначені вище вимоги до розробки топології ГС сприяють забезпеченню надійності ГС із точки зору забезпечення електромагнітної сумісності та зменшенню паразитних параметрів у процесі використання ГС у складі виробів ЕТ.

Четвертий розділ дисертаційної роботи містить результати експериментальних досліджень, що відповідають меті роботи.

За умови впливу вібрацій вразливим місцем ГС є котушки індуктивності та їх вихідні параметри. Використання плоских котушок індуктивності є досить актуальним у сучасній електроніці, однак при цьому питання дослідження впливу механічних деформацій на них висвітлені недостатньо. Частково це пов'язано з тим, що на цей час існує багато сертифікованих стендів для дослідження конструктивно-технологічних і експлуатаційних параметрів виробів ЕТ, однак вони у своїй більшості не враховують типових розмірів і специфіки ГС.

Тому для проведення експериментальних досліджень впливу механічних дій на фізико-технологічні параметри ГС у виробах ЕТ були запропоновані нові конструкції експериментальних стендів, на які оформлені патенти [1, 3].

Зокрема, з використанням розробленого низькочастотного вібростенду (рис. 7), проведено експериментальні дослідження з визначення допустимих впливів на ГС, на якій була виконана друкована котушка індуктивності із внутрішнім діаметром 15 мм і зовнішнім – 40 мм (рис. 8).

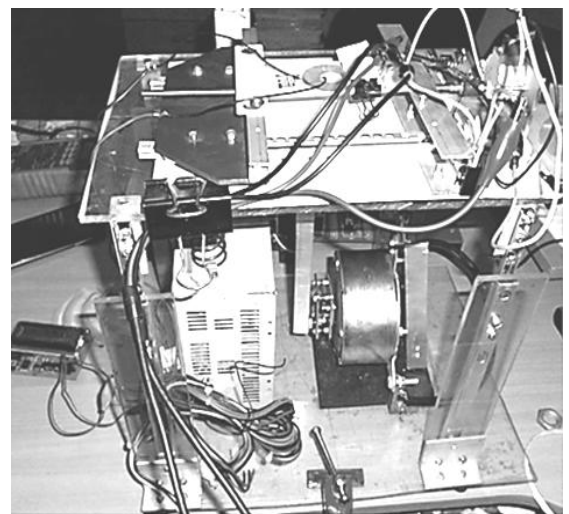


Рисунок 7 – Випробувальний стенд для дослідження ГС

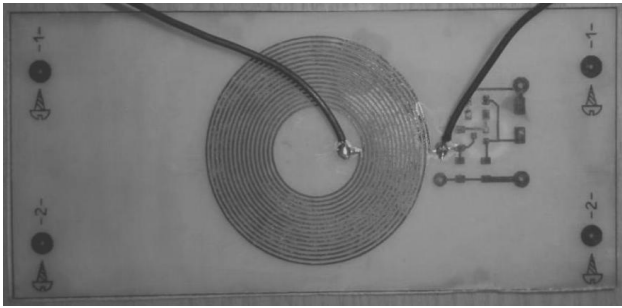


Рисунок 8 – Досліджуваний зразок ГС

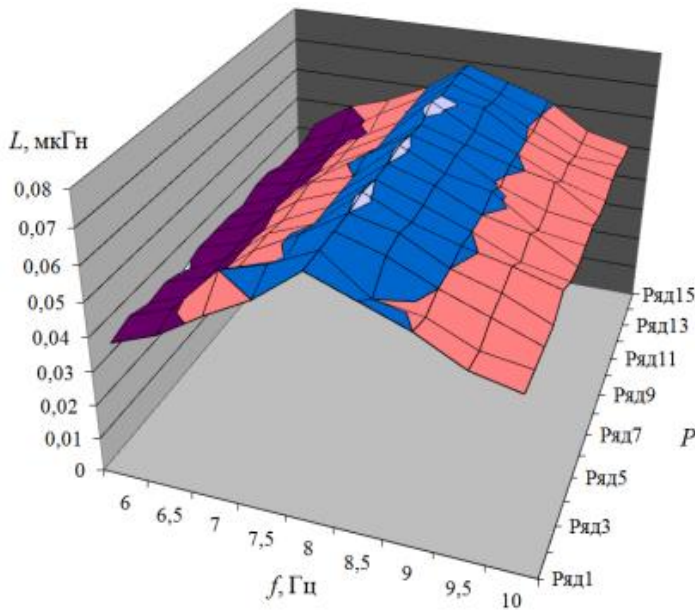


Рисунок 9 – Залежність індуктивності від частоти для 15 експериментів

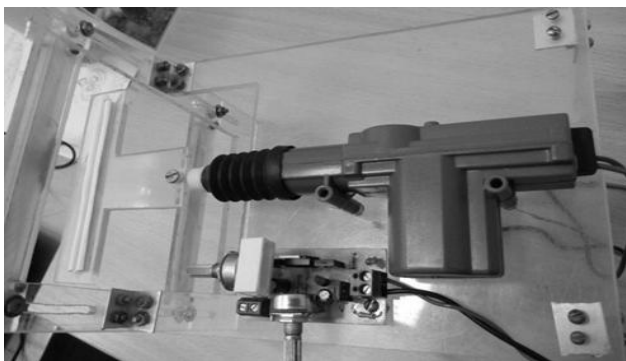


Рисунок 10 – Динамічний стенд

пу контактних площинок (КП), показаних на рис. 11, був закріплений ZIF-з'єднувачем на стенді для динамічних випробувань таким чином, щоб максимальний вплив штовхача припадав на область з'єднувача.

На даний зразок чинився вплив штовхача з наростаючою силою (від 0 до 5 Н) до тих пір, доки останній не був вирваний зі з'єднувача.

У результаті експерименту визначено, що ГС виривається зі з'єднувача з силою $F_{\text{крит}} \approx 5 \text{ Н}$.

Частота власних коливань досліджуваної ГС дорівнює $f_0 = 172 \text{ Гц}$.

На рис. 9 зображені графіки залежності зміни індуктивності L друкованої котушки, виконаної на основі ГС, від частоти прикладених коливань f для п'ятнадцяти експериментів P .

Значення індуктивності котушки за результатами трьох експериментів знаходяться у межах 7,99...8,10 мкГн. За цих змін максимальне відхилення добротності від номінального становить приблизно 0,7 %.

Максимальне ж відхилення індуктивності за умови впливу низькочастотних вібрацій становить 1,25 %. При цьому слід зауважити, що для високочастотних резонансних систем навіть такі незначні коливання індуктивності можуть призвести до суттєвих змін резонансної частоти цих систем та, у деяких випадках, наприклад, до зриву генерації.

Для дослідження результатів впливу знакозмінних навантажень, а також величини тиску, яка може призвести до руйнування рознімного з'єднання (наприклад, гнучкого шлейфа з ZIF-з'єднувачем), було розроблено стенд для динамічних випробувань (рис. 10).

Для проведення експерименту з визначення тиску, необхідного для руйнування рознімного з'єднання ГС тестовий зразок (рис. 4), що має гру-

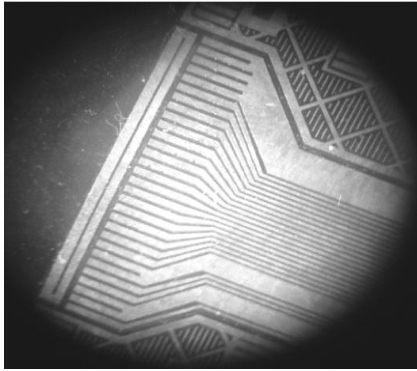


Рисунок 11 – Загальний вигляд тестового зразка та його КП

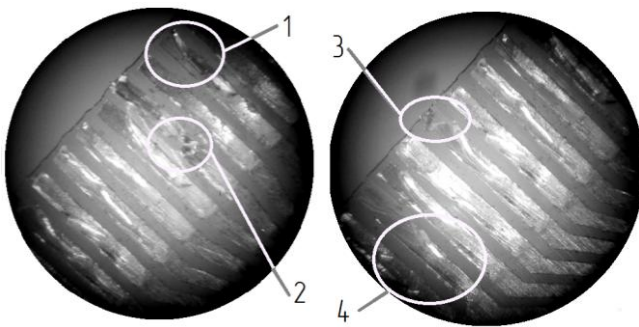


Рисунок 12 – Вигляд зразків із деформаціями

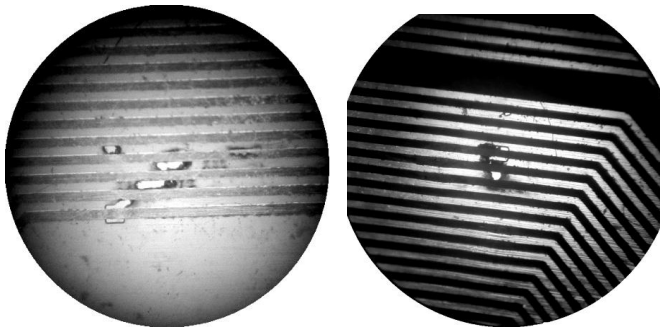


Рисунок 13 – Вигляд тестових зразків після електричного пробою

Із застосуванням методу скінченних елементів виконано моделювання напружено-деформованого стану ГС на етапі експлуатації виробів ЕТ. Зокрема, виконано дослідження втомного руйнування для ГС з полііміду.

Результати статичного розрахунку для зразка, зображеного на рис. 4, у вигляді розподілу нормальних напружень σ_{xx} за навантаження $F_a = 20$ Н наведені на рис. 15. З рисунка видно, що чим сильніше згинається ГС, тим більшою є концентрація

На тестових зразках (рис. 12) після даного дослідження спостерігаються значні деформації провідників, а саме: їх відшарування (1); викривлення кромки (2); розрив (3), а також утворення тріщин на поверхні провідників (4).

Дані зміни можуть спричинити утворення обривів або коротких замикань у електричних колах ГС, що у свою чергу призведе до збільшення ймовірності відмови всього виробу ЕТ.

У процесі дослідження механізму електричного пробою діелектричної основи ГС на універсальній пробивній установці УПУ-1М визначено напругу пробою основ тестових зразків ГС (рис. 13), вона становить близько 25 кВ.

Також у четвертому розділі наведено результати дослідження зразка ГС на механічний розрив із використанням розривної машини ИР 5047-50.

У результаті експерименту було виявлено, що розрив одношарової ГС на основі полііміду марки ФДИ-А-50 настає за подачі навантаження у 10–12 Н (рис. 14).

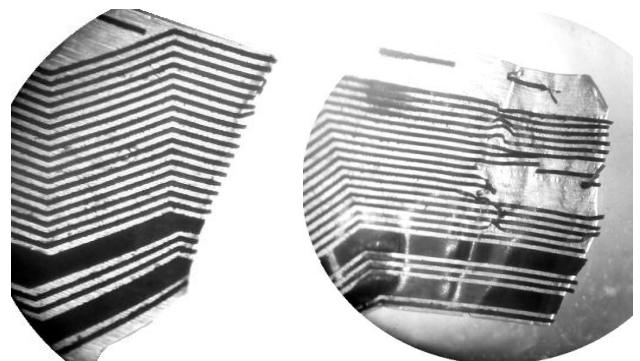


Рисунок 14 – Тестові зразки після випробування на розрив

механічних напружень. При цьому близький до середини шар ГС є нейтральною лінією поперечного перерізу, що визначає поверхню, в якій матеріал не підлягає значному розтягуванню або стисканню, тобто де нормальні напруження практично дорівнюють нулю ($\sigma_{xx} \approx 0$).

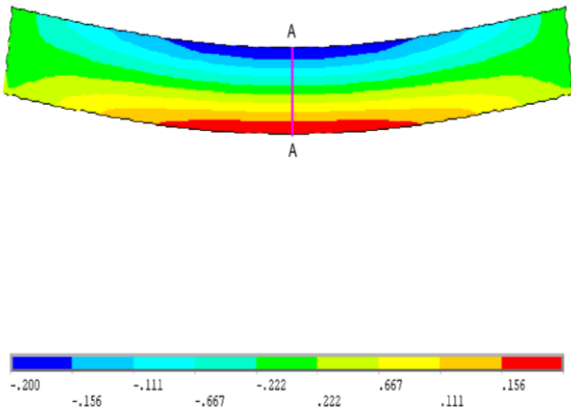


Рисунок 15 – Розподіл нормальних напружень у ГС

Чим далі шари розташовані від нейтральної лінії, тим більшою в них є концентрація механічних напружень, їх максимальна концентрація досягається у приповерхневих шарах. Такому максимально напруженому стану відповідає мінімальна довговічність, яка дорівнює 27000 циклів.

Визначено, що напруження у полііміді (поблизу від нейтральної лінії) є меншими на кілька порядків і їм відповідає максимальна довговічність, яка дорівнює 10^6 циклів, що обґрунтовує деякі з технологічних рекомендацій, сформованих у третьому розділі.

У п'ятому розділі досліджено ГС із багатошаровою провідниковою розводкою на полімерному носії, з реалізацією міжшарових з'єднань і можливістю монтажу навісних компонентів на ГС методом УЗ-зварювання, а також що містить різні сполучення зі з'єднувачем із нульовою вставкою.

Згідно зі статистичними даними близько 60 % несправностей, пов'язаних із гнучкими та гнучко-жорсткими комутаційними структурами, виникають через неякісний контакт зі з'єднувальними пристроями, а саме у зв'язку з випадінням шлейфів, корозією з'єднувачів і механічним руйнуванням шлейфів під впливом навантажень. Усім типам з'єднувачів для гнучких шлейфів (FPC) притаманні два основні недоліки: по-перше, це висока ймовірність пошкодження гнучкого шлейфа, викликана тим, що контакти з'єднувача мають значно більшу твердість порівняно з основою шлейфу; а по-друге, у разі виникнення дефектів гребінки контактів відсутня можливість відновлення працездатного стану з'єднувача.

Тому в рамках дисертаційних досліджень було запропоновано новий метод контактування ГС із компонентами виробів ЕТ на основі плоского з'єднувача з нульовою силою вставки [2]. Плоский з'єднувач (рис. 16) містить: 1 – корпус; 2 – рухому планку у вигляді кришки; 3 – контактну систему; 4 – ущільнювач; 5 – фіксатор; 6 – зовнішній вивід матриці.

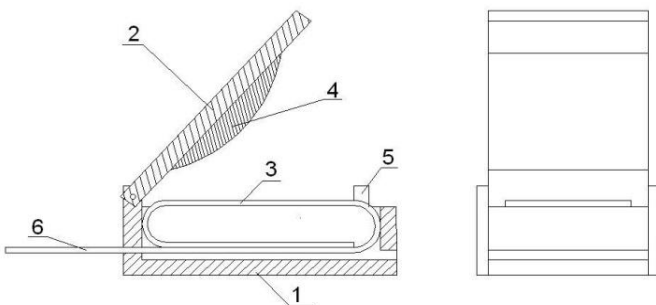


Рисунок 16 – Структура плоского з'єднувача

Матриця контактів 3 сформована з гнучкої фольгової полімерної (наприклад, поліімідної) плати, згорнутої у вигляді циліндра, і склеєна по торцях, при цьому утворюючи герметичну ємність, заповнену повітрям. На ній знаходиться безліч контактних елементів, виготовлених за допомогою травлення шару фольги.

Ступінь притиснення можна регулювати, змінюючи форму й об'єм ущільнювача. Виготовлення контактних елементів за допомогою травлення дозволяє одержати високу щільність їх розміщення та малі розміри (ширина до 50 мкм).

З'єднувач дозволяє підвищити щільність розташування контактів рознімного з'єднання, можливу кількість виводів і надійність механізму фіксації. Крім того, конструкція є ремонтпридатною: технологія виготовлення матриць і контактів досить проста і дешева, що дозволяє в разі необхідності здійснити заміну матриць і контактів у тому ж корпусі.

За критерій якості виробів ЕТ, створюваних із використанням запропонованого з'єднувача, було обрано значення перехідного опору в зоні контакту.

Проведено експеримент із визначення залежності перехідного опору ZIF FPC-з'єднувача від тиску в зоні контакту.

На рис. 17 наведено зовнішній вигляд шлейфа з контактами (а) і кінцеві друковані провідники притисного шлейфу (б).

Результати експерименту з дослідження впливу контактного тиску на перехідний опір у зоні контакту для шлейфа з чотирма провідниками представлені на рис. 18.

Перехідний опір для стандартних ZIF-з'єднувачів становить 20...50 мОм, для деяких видів з'єднувачів допускається підвищення даного значення до 100 мОм.

Таким чином, запропонований з'єднувач перевершує більшість відомих аналогів за перехідним опором, забезпечуючи більш високу якість контактування з ГС.

Для створення плоского з'єднувача розроблено типовий ТП виготовлення гнучких багатошарових структур (рис. 19).

Такий ТП дозволяє отримувати міжшарові переходи провідників і забезпечувати монтаж навісних компонентів УЗ-зварюванням, а також здійснювати паяння кулькових виводів до КП з'єднувача з нульовою силою вставки. Технологічні операції, що є відмінними особливостями запропонованого ТП, на рис. 19 позначені подвійною рамкою.

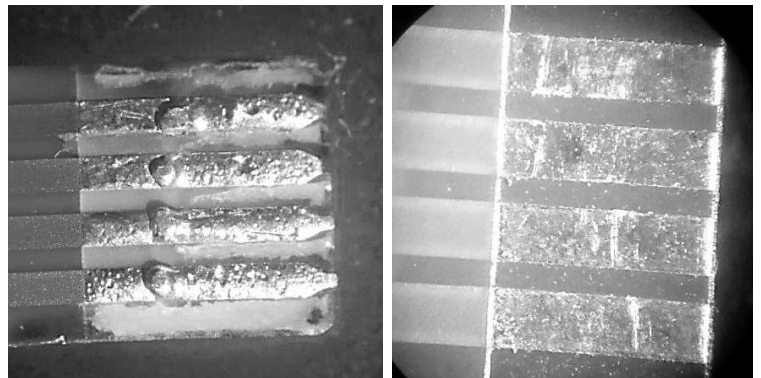


Рисунок 17 – Поверхні, що контактують

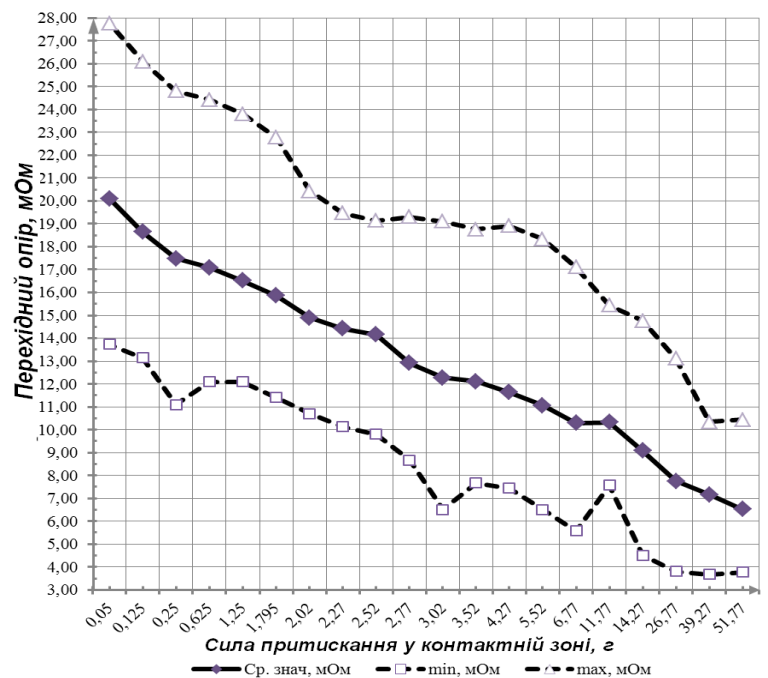


Рисунок 18 – Залежність перехідного опору у контактній зоні від сили притискання ГС



Рисунок 19 – Послідовність операцій ТП виготовлення з'єднувача

Відтворюваність якості монтажних з'єднань на необхідному рівні забезпечується оптимізацією таких основних технологічних параметрів і факторів: тиску та форми електрода, потужності імпульсу УЗ-генератора та часу зварювання, а також правильним підбором зварюваних матеріалів з відповідними фізико-хімічними властивостями та складу технологічного оснащення. Якість зварних міжшарових з'єднань провідників і навісних компонентів у розробленому ТП забезпечується технологічними розмірами вікон для зварювання у полііміді (100×100...100×150 мкм).

Зварні процеси реалізовувалися на установці УЗ-зварювання ЕМ-4092.

Можливість паяння кулькових виводів з'єднувачів досягається нанесенням підшару титан-нікель на КП майбутніх зондів ZIF-з'єднувача.

Зонди з'єднувача отримані за допомогою встановлення кульок припою ПОС-61 у вічко шаблону з необхідними розмірами вікон і кроком між ними.

Розроблено експериментально-статистичну модель процесу монтажу виробів ЕТ методом УЗ-мікрозварювання за результатами повного факторного експерименту (ПФЕ):

$$\dot{y} = 17,87 + 0,3563 x_1 + 0,2288 x_2 + 1,3713 x_3 + 0,2113 x_1 x_2 + 0,2188 x_1 x_3, \quad (7)$$

де \dot{y} – механічна міцність монтажного з'єднання; x_1 – вихідна потужність УЗ-генератора; x_2 – час зварювання; x_3 – зусилля навантаження зварювального інструменту.

За результатами експериментальних досліджень встановлені оптимальні технологічні параметри операції УЗ-зварювання, зокрема визначено граничні режими зварювання для забезпечення необхідної міцності отримуваних монтажних з'єднань.

Залежності міцності F монтажних з'єднань і коефіцієнта варіації γ від зусилля навантаження робочого інструмента P представлені на рис. 20. Залежність $F = f(P)$

має свій максимум, що визначає оптимальні умови передачі енергії без втрат від зварювального інструмента до місця зварювання.

Виявлено, що надмірне зростання зусилля навантаження P перешкоджає протіканню в зоні контакту процесів ковзання, що призводить до зниження міцності з'єднання. При цьому оцінити стабільність міцності можна за коефіцієнтом варіації міцності (рис. 20). Збільшення коефіцієнта пов'язане зі зниженням стабільності і, навпаки, підвищення стабільності приводить до зменшення коефіцієнта.

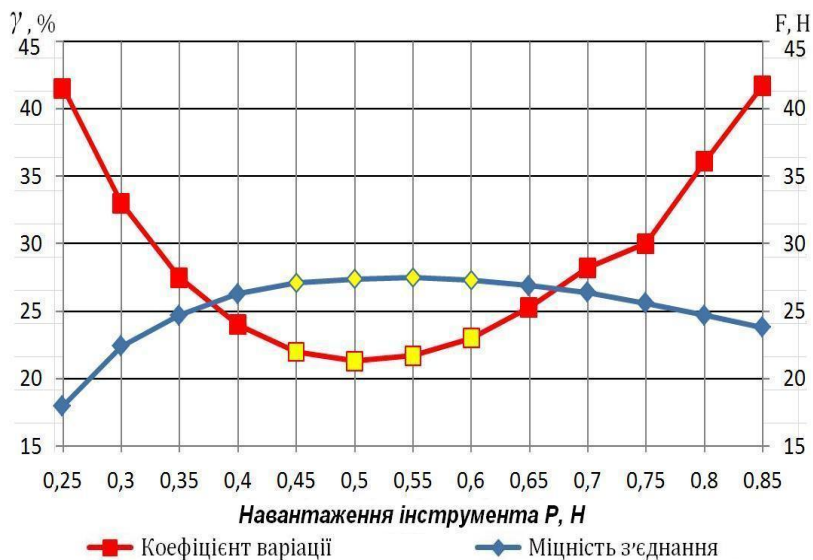


Рисунок 20 – Залежності F , γ від зусилля навантаження P

Таким чином, стабільно висока надійність мікроз'єднань забезпечувалася в експериментально встановленому діапазоні оптимальних технологічних режимів УЗ-зварювання: тривалість імпульсу – від 300 до 400 мс; потужність УЗ-коливань – від 1,75 до 2,25 Вт; зусилля навантаження інструмента – від 0,4 Н до 0,7 Н.

Результати експериментів збігаються із даними, отриманими у результаті теоретичних досліджень.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі на підставі отриманих результатів вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення якості ГС у виробках ЕТ за рахунок технологічного забезпечення, а також розробки й удосконалення методів оцінки та прогнозування якісних характеристик ГС.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Розроблено моделі та методи забезпечення якості ГС у складі виробів ЕТ на етапах проектування та виготовлення, зокрема моделі впливу дестабілізуючих факторів на вихідні параметри ГС і фізико-технологічну модель, які дозволяють прогнозувати стан ГС під впливом зовнішніх факторів, а також технологічні параметри під час їх виготовлення. Розроблено ПЗ для автоматизації даного процесу.

2. Розроблено модель руйнування ГС, яка дозволяє визначити положення нейтральної лінії та оцінити напружено-деформований стан ГС. Розроблено методику розрахунку радіуса вигину ГС, яка дозволяє, змінюючи технологічні параметри, підвищити стійкість ГС до дестабілізуючих чинників і якість виробів ЕТ на їх основі в цілому.

3. Розроблено та запатентовано конструкції випробувальних стендів для випробування ГС за умов механічних впливів, зокрема низькочастотний вібростенд і стенд для динамічних випробувань.

4. У результаті проведених експериментальних досліджень отримано дані, відповідно до яких можна провести побудову й аналіз залежностей вихідних параметрів котушки індуктивності за впливу на ГС вібрацій різної частоти.

5. За результатами експериментального дослідження впливу знакозмінних навантажень на ГС визначено силу, прикладення якої може призвести до руйнування гнучкого шлейфа з ZIF FPC-з'єднувачем.

6. Проведено дослідження зразка ГС на механічний розрив із використанням розривної машини IP 5047-50. У результаті експерименту було виявлено, що розрив одношарової ГС на основі полііміду ФДИ-А-50 відбувається за подачі навантаження в 10–12 Н.

7. Запропоновано новий метод контактування ГС із вузлами виробів ЕТ і проведено обґрунтування застосування запропонованої конструкції з'єднувача.

Максимальне значення перехідного опору під час контактування ГС зі з'єднувачем становить близько 28 мОм, з чого можна судити про те, що запропонований з'єднувач перевершує відомі аналоги за перехідним опором, забезпечуючи більш високу якість контактування з ГС.

8. На основі проведених досліджень розроблено технологію виготовлення шлейфів на поліімідному носії, що забезпечує отримання міжшарових з'єднань і монтажу безкорпусної елементної бази УЗ-зварюванням і паянням кулькових виводів для отримання контактів з'єднувача з нульовою силою вставки і дозволяє отримувати нерознімні та рознімні з'єднання мікромодулів.

9. Із використанням ПФЕ отримано математичну модель міцності монтажного з'єднання УЗ-зварюванням для обраного типу інструменту, зусилля його навантаження, потужності УЗ-коливачів і тривалості зварювання.

Експериментально визначені оптимальні технологічні режими УЗ-зварювання: тривалість імпульсу – від 300 до 400 мс; потужність УЗ-коливачів – від 1,75 до 2,25 Вт; зусилля навантаження робочого інструмента – від 0,4 Н до 0,7 Н.

10. Сформовано низку вимог до матеріалу ГС, конструкції, технології виготовлення й умов її експлуатації з точки зору забезпечення стійкості до зовнішніх впливів і, як наслідок, якості виробу ЕТ на основі ГС. Дано рекомендації щодо виконання даних вимог.

11. Результати роботи зі створення та дослідження рознімного з'єднувача впроваджені на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (м. Харків). Очікуваний економічний ефект на одиницю продукції становить 11 тис. грн.

12. Результати роботи зі створення випробувальних стендів для ГС впроваджені на підприємстві ТОВ «НВП «Укрінтех». Габаритно-масові показники стендів на 16 % менше, ніж у відомих аналогів. Похибка вимірювань параметрів ГС не перевищує 1 % у всьому діапазоні вимірювань.

13. Результати дисертаційних досліджень впроваджені у навчальному процесі на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету, а також у науково-дослідних роботах і навчальному процесі на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ, що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Патенти та авторські свідоцтва

1. Низькочастотний вібростенд: патент № 102880 України на корисну модель : МПК (2015.01) G01M 7/00 / О. С. Боцман, В. В. Невлюдова, С. П. Новоселов, І. В. Жарікова; заявл. 18.05.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22. – 3 с.
2. Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки: патент № 103402 України на корисну модель / Ю. І. Богдан, Н. П. Демська, В. В. Невлюдова, В. А. Палагін, Є. А. Разумов-Фризюк, В. І. Роменський; заявл. 10.07.2015; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23. – 3 с.
3. Стенд для динамічних випробувань гнучких комутаційних шлейфів та МЕМС-компонентів: патент № 108066 України на корисну модель: МПК G01M 7/02 (2006.01) / О. С. Боцман, І. В. Жарікова, В. В. Невлюдова, С. П. Новоселов та ін.; заявл. 12.02.2016; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. – 3 с.
4. Комп'ютерна програма «Автоматизированная система проектирования гибких коммутационных структур «Flexible PCB Designer»: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 67459 / Б. О. Степаненко, І. В. Жарікова, В. В. Невлюдова; дата реєстрації: 26.08.2016.

Статті в іноземних виданнях

5. Новоселов С. П. Экспериментальная установка для исследования влияния механических вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств на основе гибких модулей / С. П. Новоселов, А. С. Боцман, В. В. Невлюдова // Приборы и методы измерений (Республика Беларусь, Минск: БНТУ). – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 156–162. (Включено до міжнародної науково-метричної бази РИНЦ та бази Google Scholar).

Статті у наукових фахових виданнях

6. Пономарева А. В. Влияние технологических режимов операции ультразвуковой сварки на надежность монтажных соединений / А. В. Пономарева, В. В. Невлюдова // Радиотехника. – 2012. – Вып. 170. – С. 143–148.
7. Андрусевич А. А. Отображение процесса изменения параметров РЭС на основе системологической модели / А. А. Андрусевич, И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова, Н. П. Демская // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 8 (124). – С. 8–12. (Включено до міжнародних науково-метричних баз даних Index Copernicus, CiteFactor та Scientific Indexing Services).
8. Невлюдова В. В. Моделирование технического ресурса радиоэлектронных средств / В. В. Невлюдова // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (Включено до міжнародних науково-метричних баз «Ulrich's Periodicals Directory», CrossRef, РИНЦ, DOAJ та бази Google Scholar). – 2014. – Вип. 4. – С. 3–7.
9. Андрусевич А. А. Выбор топологии гибких коммутационных шлейфов для телекоммуникационных устройств на основе теоремы Байеса / А. А. Андрусевич, В. А. Палагін, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова // Проблемы телекоммуникаций. – 2014. – № 3 (15). – С. 95–105. (Включено до науково-метричних баз Index Copernicus, РИНЦ та бази Google Scholar).

10. Невлюдова В. В. Анализ особенностей проектирования модулей радиотехнических систем на основе гибких коммутационных структур // *Технология приборостроения*. – 2015. – №1. – С. 69–72.

11. Разумов-Фризюк Е. А. Оценка влияния механических воздействий на гибкие печатные платы / Е. А. Разумов-Фризюк, В. В. Невлюдова, Н. П. Демская и др. // *Проблеми тертя та зношування*. – 2016. – № 1 (70).– С. 143–149. (Включено до міжнародних науково-метричних баз EBSCO, WorldCat, PИЦ та бази Google Scholar).

12. Палагин В.А. Анализ и разработка конструкций разъемов для FFC или FPC шлейфов / В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, Н. П. Демская, В. В. Невлюдова // *Технология приборостроения*. – 2016. – №.1 – С. 50–53.

13. Filipenko O. Development of MEMS construction connect devices with a self-test connections / O. Filipenko, V. Palagin, I. Razumov-Friuzyk, V. Nevliudova etc. // *Information and Telecommunication Sciences*. – 2016. – № 2. – P. 10–19. (Включено до баз даних «Україніка наукова», УРЖ «Джерело», ВІНІТ).

14. Невлюдова В. В. Анализ процесса формирования микросоединений методом сварки ультразвуком при изготовлении гибких печатных плат / В. В. Невлюдова // *Технология приборостроения*. – 2016. – №.2 – С. 35–38.

Міжнародні науково-технічні та науково-практичні конференції

15. Невлюдова В. В. Модернизация мониторинга жизненного цикла информационно-коммуникационных систем / В. В. Невлюдова // *Сборник трудов 9-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013»*, 22–26 апреля 2013 г., Севастополь, Украина. – С. 47.

16. Жарикова И. В. Анализ параметров гибких коммутационных шлейфов на основе системологической модели РЭС / И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова, Ж. И. Хоменко // *Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»*, 17–19 вересня 2014 р., м. Запоріжжя. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С. 278–279.

17. Невлюдова В. В. Анализ влияния надежности сварных монтажных соединений на безотказность РЭС на базе ГКС / В. В. Невлюдова // *Материалы 19-го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»*, 20–22 апреля 2015 г., Харьков. – Т.2. – С. 137–138.

18. Стародубцев Н. Г. Моделирование процесса монтажа РЭС методом УЗ-микросварки / Н. Г. Стародубцев, В. В. Невлюдова // *Труды 25 международной конференции «Новые технологии в машиностроении»*, 3–8 сентября 2015 г., Коблево-Харьков. – 2015. – С. 15–16.

19. Zharikova Irina. Electromagnetic Compatibility Analysis of the Infocommunication Systems Components on the Flexible Structures Basis / Irina Zharikova, Sergey Novoselov, Viktoriya Nevlyudova, Oleksandr Botsman // *Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology*. – October 13–15, 2015. – Kharkiv, Ukraine. – PP. 101–103. (Включено до міжнародних наукометричних баз «SCOPUS» та «INSPEC»).

20. Невлюдова В. В. Исследование гибких коммутационных структур при механических воздействиях / В. В. Невлюдова, И. В. Жарикова // Збірник доповідей 20-го Ювілейного Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті», Т. 2. Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіоелектронного приладобудування, Харків, 19–21 квітня 2016 р. – Х.: ХНУРЕ, 2016. – С. 43–44.

21. Невлюдова В. В. Системологический метод анализа изменения параметров РЭА / В. В. Невлюдова, И. В. Жарикова, А. С. Боцман // Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ-2016), Кременчук, 26–28 травня 2016 року. – Кременчук: Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, 2016. – С. 269–270.

22. Боцман И. В. Динамические испытания гибких коммутационных структур / И. В. Боцман, А. С. Боцман, В. В. Невлюдова // Тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», м. Запоріжжя, 21–23 вересня 2016 р. – Запоріжжя: ЗНТУ. – С. 211–212.

23. Боцман И. В. Разработка моделей гибких коммутационных структур для автоматизации их проектирования / И. В. Боцман, Б. А. Степаненко, В. В. Невлюдова // Збірник матеріалів XV міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (м. Кременчук, 7–9 листопада 2016 р.). – Кременчук: КрНУ, 2016. – С. 120–121.

Всеукраїнські та міжрегіональні конференції й інші видання

24. Жарикова И. В. Автоматизация процесса прогнозирования отказов РЭС на основе системологической модели / И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку», 16–20 березня 2015 року. – Черкаси, 2015. – С. 135–137.

25. Жарикова И. В. Дослідження параметрів гнучких шлейфів під впливом вібрацій / И. В. Жарикова, С. П. Новоселов, В. В. Невлюдова, О. С. Боцман // Зб. доповідей Міжрегіон. наук.-практ. конф. молодих вчених «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології, 16–17 листопада 2015 р. – Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2015. – С. 37–39.

26. Жарикова И. В. Усовершенствование методов контроля параметров гибких коммутационных структур в составе РЭА / И. В. Жарикова, В. В. Невлюдова, А. С. Боцман // II Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів «Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень» (АКУ-2016), м. Красноармійськ, 23–27 травня 2016 р. – Красноармійськ: ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», 2016. – С. 56–58.

АНОТАЦІЯ

Невлюдова В. В. Технологічне забезпечення якості гнучких структур у виробках електронної техніки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2017.

У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення якості ГС у виробках ЕТ за рахунок технологічного забезпечення їх виробництва, а також розробки й удосконалення методів оцінки та прогнозування параметрів ГС на етапах проектування, виготовлення та експлуатації.

Розроблено фізико-технологічну модель параметрів ГС і ТП їх виготовлення, що дозволяє прогнозувати їх якісні характеристики.

Розроблено модель руйнування ГС під час циклічних пружнопластичних деформацій, що дозволяє проводити аналіз нейтральної лінії ГС і радіусу її вигину. Сформовано рекомендації з технологічного забезпечення якості ГС.

Запропоновано нові конструктивно-технічні рішення випробувальних стендів для дослідження механічних впливів на ГС. Проведено експериментальні дослідження з визначення впливу вібрацій на параметри друкованої котушки індуктивності, а також визначення сил, з якими ГС виривається з ZIF-з'єднувача та розривається під час розтягування. Досліджено механізми пробою ГС.

Вперше запропоновано новий метод контактування ГС із компонентами ЕТ на основі плаского з'єднувача з нульовою силою вставки, що забезпечує підвищення якості контактування за рахунок створення рівномірного тиску на всі виводи ГС і зниження перехідного опору у контактній зоні порівняно з відомими аналогами. Розроблено технологічний процес виготовлення з'єднувача.

Досліджено технологічні режими операцій із формування міжшарових з'єднань і монтажу електронних компонентів на ГС за допомогою ультразвукового зварювання.

Ключові слова: гнучкі структури, фізико-технологічна модель, модель руйнування, випробувальні стенди, плаский з'єднувач, технологічні режими, ультразвукове зварювання.

АННОТАЦИЯ

Невлюдова В. В. Технологическое обеспечение качества гибких структур в изделиях электронной техники. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2017.

В работе решена актуальная научно-прикладная задача повышения качества гибких структур (ГС) в изделиях электронной техники (ЭТ) за счет

технологического обеспечения их производства, а также разработки и усовершенствования методов оценки и прогнозирования параметров ГС на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации.

Разработана физико-технологическая модель параметров ГС и технологического процесса их изготовления, которая позволяет прогнозировать их качественные характеристики за счет обработки большого массива данных. Разработано ПО для автоматизации данного процесса.

Разработана математическая модель разрушения ГС при циклических упругопластических деформациях, которая позволяет определить положение нейтральной линии ГС, а также оценить допустимый радиус изгиба ГС.

Сформирован ряд требований к материалу и конструкции ГС, технологии изготовления и условиям ее эксплуатации с точки зрения обеспечения стойкости ко внешним воздействиям и, как следствие, качества ГС в составе изделий ЭТ. Даны рекомендации по выполнению данных требований.

Предложены и запатентованы новые конструктивно-технические решения испытательных стендов для исследования механических воздействий на ГС. Проведены экспериментальные исследования по определению влияния вибраций на параметры печатной катушки индуктивности. По результатам экспериментального исследования воздействия знакопеременных нагрузок на ГС определена сила, приложение которой может привести к разрушению разъемного соединения.

Проведены исследования образца ГС из фольгированного алюминием полиимида марки ФДИ-А на механический разрыв с использованием разрывной машины. Экспериментально исследованы механизмы пробоя ГС.

На основе метода конечных элементов проведено моделирование напряженно-деформированного состояния ГС и определено минимально и максимально возможное количество циклов работы исследуемого образца из полиимида.

Впервые предложен и обоснован метод контактирования ГС с компонентами ЭТ на основе плоского разъема с нулевой силой вставки, который обеспечивает повышение качества контакта за счет создания равномерного давления на все выводы ГС и снижения переходного сопротивления в контактной зоне по сравнению с известными аналогами.

Разработана и обоснована технология изготовления ГС на полиимидном носителе, обеспечивающая формирование качественных неразъемных и разъемных соединений микромодулей за счет реализации межслойных соединений и монтажа бескорпусной элементной базы методом ультразвуковой (УЗ) сварки и пайки шариковых выводов для получения контактов соединителя с нулевой силой вставки.

С использованием факторного эксперимента получена математическая модель прочности монтажного соединения УЗ-сваркой для выбранного типа инструмента, усилия его нагрузки, мощности УЗ-колебаний и длительности сварки. По методу крутого восхождения определены оптимальные режимы операции сварки для алюминий-полиимидной ГС.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены на Государственном предприятии «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения»; на предприятии ООО «НПП «Укринтех» (г. Харьков), а

также в учебном процессе на кафедре электронных аппаратов Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, на кафедре информационных технологий электронных средств Запорожского национального технического университета, а также на кафедре компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники ХНУРЭ, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Ключевые слова: гибкие структуры, физико-технологическая модель, модель разрушения, испытательные стенды, плоский соединитель, технологические режимы, ультразвуковая сварка.

ABSTRACT

Nevliudova V. V. The technological support of flexible structures quality in electronic devices. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.27.06 – Technology, equipment and production of electronic devices. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2017.

In the work the actual scientific and applied task of improving the quality of flexible structures (FS) in electronic devices (ED) products is solved due to technological support of their production, as well as the development and improvement of methods for FS parameters estimating and predicting at the design, manufacturing and operation stages.

The physical-technological model which allows to predict FS parameters and parameters of technological process of their fabrication is developed.

The FS destruction model for cyclic elastoplastic deformations which allows to analyze the neutral line of FS and its bending radius is also proposed. The recommendations on technological quality assurance of FS are formulated.

New design and technical solutions of test stands for the study of mechanical effects on the FS are proposed. Experimental studies have been carried out to determine the influence of vibrations on the parameters of the printed inductor, as well as to determine the forces which cause the FS break out of the ZIF-connector and FS break down under tension. Mechanisms of FS electrical breakdown are investigated.

New method of FS contacting with ED components on the basis of a flat connector with zero insertion force is proposed. Such connector ensures the contact quality improvement by creating uniform pressure on all the FS pins and reducing the transient resistance in the contact zone in comparison with known analogues. The technological process of connector manufacturing is developed.

The technological modes of ultrasonic welding operation for the formation of FS interlayer connections and for the installation of electronic components on the FS are researched.

Keywords: flexible structures, physical-technological model, destruction model, test benches, ZIF-connector, technological modes, ultrasonic welding.