

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

ДЕМСЬКА НАТАЛІЯ ПАВЛІВНА

УДК. 621.3.066.6

**ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МІЖЗ'ЄДНАНЬ
МОДУЛІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2020

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Невлюдов Ігор Шакирович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та мехатроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Овчаренко Віталій Євгенович,
Науково-дослідний інститут приладобудування,
Національне космічне агентство України,
заступник директора з наукової роботи;

кандидат технічних наук, доцент,
Когдась Максим Григорович,
Кременчуцький національний університет
ім. Михайла Остроградського МОН України,
доцент кафедри автоматизації та інформаційних систем.

Захист відбудеться « 03 » вересня 2020 р. о 15.00 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 і на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 за посиланням: <https://nure.ua/branch/d-64-052-04>.

Автореферат розіслано « 31 » липня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є. М. Одаренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Основною проблемою інтеграції сучасних технічних засобів для впровадження технології Industry 4.0 залишається те, що нині всі готові деталі базуються на традиційних електронних компонентах жорстких (гнучко-жорстких) друкованих плат, які мають значну товщину й обмежені в гнучкості, а також не можуть мати повністю адаптоване апаратне рішення для кожного конкретного розміру та форми об'єкта автоматизації. Тому сучасні технології від традиційного дизайну жорсткої електроніки переходять до гнучких форм-факторів, які можуть запропонувати нові функціональні можливості, які раніше не були доступні, зокрема на таких ринках, як медицина, IoT, сенсори і смарт-текстиль, у яких особливу увагу потрібно приділяти формуванню надійних між'єднань.

На даний час цим вимогам найбільше відповідають гнучкі комутаційні структури (ГКС) до яких належать з'єднувачі, які мають забезпечити: зменшення габаритно-масових характеристик пристрою; можливість високої щільності розташування електричних контактів; простоту монтажу; низьку собівартість; використання групових методів виготовлення; велику кількість контактних елементів; можливість великої протяжності контактів; можливість об'єднання в одному між'єднанні інформаційних каналів і каналів живлення.

Однак, при численних перевагах існуючих електричних між'єднань (ЕМЗ), що відзначається науковцями та розробниками, існують серйозні проблеми забезпечення якісних показників модулів на їх основі, враховуючи що кожен модуль між'єднання часто являє собою складний автономний пристрій із великою кількістю каналів інформації та живлення. Також до чинників появи великої кількості дестабілізуючих факторів можна віднести зростання ступеня мініатюризації компонентів, що з одного боку призводить до зменшення розмірів і ваги пристрою, але з іншого призводить до зменшення жорсткості, як окремих елементів, так і всієї конструкції між'єднання в цілому.

Враховуючи вищевказане залишається протиріччя між необхідністю подальшого підвищення якості існуючих і перспективних варіантів реалізації ЕМЗ модулів електронної техніки (ЕТ) за умови зменшення їх розмірів і підвищення щільності монтажу та водночас – обмеженістю відомих підходів до технологічного забезпечення якості вказаних між'єднань.

Все це свідчить про те, що технологічне забезпечення якості ЕМЗ модулів ЕТ, а також удосконалення методів контролю та прогнозування їх якісних характеристик на етапах проектування, виробництва і експлуатації є актуальним науково-практичним 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): у рамках ініціативної науково-дослідної роботи «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями та їх впровадження» (ДР № 0113U000358); «Створення мікромініатюрних компонентів електромеханічних інтелектуальних технологічних засобів промислового обладнання та робототехніки»

(ДР № 0115U002433); та як виконавець «Безскладальні гнучко-жорсткі конструкції зі змінною конфігурацією для мікросистемної техніки та інтелектуальних роботів» (ДР № 0219U001644).

Метою дисертаційної роботи є підвищення якості високощільних рознімних і нерознімних ЕМЗ у багатошарових ГКС для модулів ЕТ шляхом розробки технології формування цих з'єднань на основі досліджень фізико-технологічних параметрів ГКС.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення таких завдань:

– побудова матриці жорсткості, що дозволить забезпечити розрахунок деформації гнучких ЕМЗ модулів ЕТ за відомого вектора зовнішніх сил;

– розробка технології контактування ГКС із пласким з'єднувачем з нульовою силою вставки у складі модулів ЕТ для забезпечення стабільності підмикання;

– отримання математичної моделі (ММ) впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача на перехідний опір у зоні контактування ГКС із його матрицею контактів;

– аналіз причин виникнення відмов у рознімних міжз'єднаннях модулів ЕТ, експериментальне підтвердження результатів теоретичних досліджень і визначення експлуатаційних характеристик з'єднувача гнучких шлейфів для міжмодульних електричних з'єднань;

– аналіз фізико-хімічних процесів, які спостерігаються під час формування та руйнування ЕМЗ у модулях ЕТ, виконаних за допомогою ультразвукового (УЗ) зварювання, і дослідження впливу технологічних факторів на кінетику формування та якість одержуваних електричних міжз'єднань;

– дослідження впливу конструктивно-технологічних рішень поліімідних ГКС на параметри їх довговічності, моделювання напружено-деформованого стану ГКС та розробка рекомендацій щодо збільшення довговічності та стійкості у модулях ЕТ;

– побудова імітаційної моделі технологічного процесу (ТП) складання модуля ЕТ із поліімідною ГКС у його складі зі зварними міжз'єднаннями, для визначення відсотку виходу придатних виробів, виготовлених на технологічній лінії складання за встановлений проміжок часу.

Об'єкт дослідження – технологічний процес формування електричних міжз'єднань модулів ЕТ.

Предмет дослідження – фізико-технологічні параметри електричних рознімних та нерознімних міжз'єднання у ГКС.

Методи дослідження. Під час проведення дисертаційних досліджень використовувалися: методи скінченних елементів (СЕ) і розв'язання диференціальних рівнянь, положення теорій пружності та руйнування твердих тіл, методи математичного та комп'ютерного моделювання – для розробки моделі руйнування ЕМЗ у ГКС, виконаних за допомогою УЗ-зварювання, та оцінки напружено-деформованого стану (НДС) ГКС; метод регресійного аналізу та положення теорії факторного експерименту – для розробки експериментальної моделі процесу контактування плаского з'єднувача з нульовою силою вставки з ГКС; положення теорії масового обслуговування (МО) – для розробки моделі ТП складання модулів ЕТ на основі поліімідних ГКС; методи експериментальних

досліджень – для оцінки впливу механічних чинників на експлуатаційні параметри запропонованого з'єднувача для ГКС.

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

- отримав подальший розвиток метод розрахунку складових матриці жорсткості СЕ для ЕМЗ, який дозволяє забезпечити розрахунок деформацій пружних елементів міжз'єднань, враховучи особливості видів деформації для різних видів зовнішніх сил;

- отримала подальший розвиток технологія ЕМЗ, що дозволило розробити конструкцію плаского з'єднувача для електронних пристроїв із нульовою силою вставки з пневматичним притисненням контактних елементів, який відрізняється від аналогів меншою вірогідністю виникнення дефектів, підвищеною щільністю розташування контактів та кількістю виводів;

- вперше розроблено модель впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача з нульовою силою вставки на перехідний опір, який виникає між з'єднувачем і шлейфом-контактором, на основі проведення багатофакторного експерименту, що дозволило оптимізувати конструкцію з'єднувача за критерієм мінімізації перехідного опору;

- удосконалено технологію складання поліімідних ГКС, що забезпечує формування високощільних нерознімних ЕМЗ за допомогою УЗ-зварювання та рознімних міжз'єднань на основі запропонованого з'єднувача з нульовою силою вставки;

- вперше розроблено математичну модель ТП складання модулів ЕТ на основі алюміній-поліімідних гнучких структур, що дозволяє за допомогою системи моделювання GPSS World виконувати оцінку надійності та стабільності ТП, визначати відсоток виходу придатних виробів, середній час виготовлення одного виробу, середню кількість зібраних виробів.

Практична цінність. Результати досліджень реалізовані на практиці у вигляді конструктивних рішень і технологічної документації, які складають основу для технологічного забезпечення якості ЕМЗ у складі модулів ЕТ, а саме:

- розроблено конструкцію плаского з'єднувача з нульовою силою вставки та технологію його з'єднання з гнучкими комутаційними структурами у складі модулів ЕТ. Викладені рішення захищені патентом на корисну модель № 103402 «Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки» (від 10.12.2015 р.). Виготовлено дослідні зразки шлейфів плаского з'єднувача з діелектрику лакофольгового марки ФДІ-А-50;

- розроблено стенд для дослідження якості ЕМЗ гнучких структур і методика проведення експериментальних досліджень, які дозволили експериментально довести якість запропонованої конструкції плаского з'єднувача гнучких шлейфів і визначити найбільш вдалу для контактування форму притискаючої кришки з'єднувача, а також які можна використовувати для дослідження подібних рознімних міжз'єднань елементів комутації для модулів ЕТ;

- розроблено та відпрацьовано ТП складання алюміній-поліімідних ГКС зі зварними міжз'єднаннями, виконаними за допомогою УЗ-зварювання, розроблено

типовий ТП та маршрутну карту.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджені на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (м. Харків, акт від 22.10.2019 р.); на підприємстві ТОВ «НВП «Укрінтех» (акт від 27.01.2020 р.), на підприємстві ТОВ «НВП «ЛТУ» (акт від 10.06.2020 р.), а також у навчальний процес на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка» (акт від 20.05.2020 р.), на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського (акт від 30.04.2020 р.) та на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ (акт від 13.04.2020 р.).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, наведені у дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, внесок здобувача полягає: [1, 11] – розроблено методику прогнозування параметрів ЕТ та побудови моделі їх відмов; [2] – визначено основні вимоги до якості прецизійної обробки поверхонь підкладинок та їх контроль в умовах мікромініатюризації виробів ЕТ; [3, 9, 12] – проведено аналіз типової конструкції та досліджено механічні навантаження, що виникають в конструкції з'єднувача FFC і FPC шлейфів; [4, 5, 6, 13] – досліджено забезпечення якісних показників гнучких компонентів в умовах дії великої кількості дестабілізуючих чинників на всіх етапах життєвого циклу; [7, 15] – визначено особливості формування мікроз'єднань методом ультразвукового зварювання; [8, 19, 22, 23] – досліджено особливості механічних деформацій і руйнувань гнучких друкованих плат; [11, 21, 26] – запропоновані нові конструктивно-технологічні варіанти підвищення довговічності і міцності ГКС; [13, 24, 25] – описаний спосіб побудови матриці жорсткості для розрахунку деформації елементів МЕМС і гнучких ЕМЗ; [16, 20] – запропонована конструкція плоского з'єднувача електронних пристроїв з нульовою силою вставки; [17, 18] – здійснено моделювання процесів руйнування монтажного з'єднання ЕТ.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-технічних конференціях і симпозіумах: XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних та біологічних об'єктів» (Кременчук, 3-5 листопада 2017 р.); 27-я Международная конференции «Новые технологии в машиностроении», (Коблево–Харків, 3-8 вересня 2017 р.); 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, (Одеса, 10-14 вересня 2018 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Математичне моделювання процесів в економіці та управлінні проектами і програмами (ММП-2019)» (Коблево, 09-13 вересня 2019 р.); III Міжнародна науково-практична конференція «Виробництво & Мехатронні Системи» (M&MS-2019), (Харків, 24-25 жовтня 2019 р.); XVI-th International Conference Perspective technologies and methods in MEMS design (Lviv, UKRAINE, 22-26 April 2020); VI Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фото вольтаїка», (Кременчук, 14-16 травня 2020 р.).

Публікації. За темою дисертації з викладенням основних її результатів

опубліковано 26 наукових праць, у тому числі 1 патент на корисну модель, 2 розділи колективної монографії, 1 стаття у науковому виданні іншої держави, 14 статей у наукових фахових виданнях України (серед яких 7 внесені до міжнародних наукометричних баз), 8 тез доповідей у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій (серед них 2 реферовано в наукометричній базі Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота є рукописом і складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 130 найменувань (15 с.), 4 додатки (23 с.), 69 рисунків, 15 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 200 сторінок, з них 150 сторінок основного тексту.

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 технологій ЕМЗ у модулях ЕТ, наведено їх класифікацію та розглянуто особливості їх формування у ГКС, які входять до складу модулів ЕТ.

На даний час ГКС, до яких належать гнучкі шлейфи FFC або FPC знаходять все більше застосування в технології мікроелектромеханічних систем. Така популярність обумовлена насамперед необхідністю забезпечення МЗ рухомих елементів. Крім означених переваг існує ряд інших, у порівнянні з іншими способами міжз'єднань модулів: зниження габаритних розмірів і маси; динамічна гнучкість; можливість об'ємного компонування; можливість організації керованого хвильового опору ліній зв'язку; зниження часу, вартості та помилок складання; зниження опору охолоджувального потоку повітря; застосування технології «кристал-на-гнучкій платі»; зниження спотворень сигналів.

Однак, за численних переваг існує серйозна проблема забезпечення якісних показників модулів на їх основі, такі вироби можуть піддаватися великій кількості дестабілізуючих чинників на всіх етапах життєвого циклу.

Зокрема, до 50% відмов шлейфів викликають механічні впливи на ГКС: випадання шлейфів, корозія, механічне пошкодження за умови навантаження. З цього переліку основними залишаються відмови, пов'язані зі сполучними пристроями – з'єднувачами. Для з'ясування причин їх виникнення проаналізовано конструкційні особливості основних типів з'єднувачів.

Таким чином, існує необхідність розробки технологій ЕМЗ у модулях ЕТ на основі ГКС, для чого необхідно виконати ретельний теоретичний аналіз і моделювання впливів механічних навантажень на них, а також технологічних і експлуатаційних чинників, що можуть призвести до зниження їх якості та надійності.

У **другому розділі** розроблено метод розрахунку складових матриці жорсткості скінченних елементів ЕМЗ, а також мікробалок та мембран

мікроелектромеханічних систем шляхом використання матриці жорсткості елементів одиничних лінійних розмірів і введення масштабних множників, які враховують види сил і деформацій із притаманними їм особливостями жорсткості, а також механічні характеристики елементів (розміри, осьові моменти інерції, модулі жорсткості E та G , коефіцієнт Пуасона μ , коефіцієнт теплового розширення α).

У загальному випадку рівняння руху, в тому числі і деформації механічної системи, що містить основні компоненти: маси m , втрат і демпфування R , пружності (жорсткості) K , під дією зовнішніх, внутрішніх сил структури, які визначаються розподілом напружень, температури в елементах, фізичними властивостями матеріалів і особливостями конструкції, представляється у вигляді:

$$[m]\{q\} + [R]\{q\} + [K]\{q\} = \{F\}, \quad (1)$$

де $\{q\}$ – вузлові ступені свободи ($\{q\} = \{x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n\}$ – вектор (матриця) стовпців координат розташування вузлів $1 \times i$); $\{F\}$ – вектор (матриця) узагальнених сил структури.

Індивідуальні матриці малих СЕ збираються в систему матриць $[K]$, $[R]$ і $[m]$ – жорсткості, втрат і мас – відповідно. У матрицях усі елементи пов'язані з загальними вузлами, що досягається суперпозицією вузлів. Індеси елементів вказують в системній матриці безпосереднє значення вузлових координат компонентів.

Зовнішні узагальнені сили F діють на узагальнені основні фізичні елементи: маси, пружності, елементи втрат і демпфування, розподілені в малих обсягах структури ij (скінченних елементах). Матриці мас, втрати, жорсткості складаються з підматриць окремих СЕ структури з координатами, визначеними індексами ij : m_{ij} , k_{ij} , r_{ij} .

Залежно від характеру діючих сил розрізняють об'ємні, площинні та лінійні напружено-деформовані стани твердого тіла.

Для об'ємного напруженого стану деформації зсуву визначаються нормальними σ і дотичними τ напруженнями. З урахуванням просторової симетрії властивостей пружності матеріалів із кубічною кристалічною структурою число незалежних змінних дорівнює 36.

За малих значень зсувів об'ємні деформації визначаються наступними лінійними залежностями:

При малих значеннях зсувів об'ємні деформації (вздовж осей координат та кутових у площинах) визначаються наступними лінійними залежностями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= s_{11}\sigma_x + s_{12}\sigma_y + s_{13}\sigma_z + s_{14}\tau_{yz} + s_{15}\tau_{yx} + s_{16}\tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= s_{21}\sigma_x + s_{22}\sigma_y + s_{23}\sigma_z + s_{24}\tau_{yz} + s_{25}\tau_{yx} + s_{26}\tau_{xy} \\ \varepsilon_z &= s_{31}\sigma_x + s_{32}\sigma_y + s_{33}\sigma_z + s_{34}\tau_{yz} + s_{35}\tau_{yx} + s_{36}\tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= s_{41}\sigma_x + s_{42}\sigma_y + s_{43}\sigma_z + s_{44}\tau_{yz} + s_{45}\tau_{zx} + s_{46}\tau_{xy} \\ \gamma_{zx} &= s_{51}\sigma_x + s_{52}\sigma_y + s_{53}\sigma_z + s_{54}\tau_{yz} + s_{55}\tau_{zx} + s_{56}\tau_{xy} \\ \gamma_{xy} &= s_{61}\sigma_x + s_{62}\sigma_y + s_{63}\sigma_z + s_{64}\tau_{yz} + s_{65}\tau_{zx} + s_{66}\tau_{xy} \end{aligned}, \quad (2)$$

ввівши уніфіковане позначення деформації:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{xx}; \quad \varepsilon_y = \varepsilon_{yy}; \quad \varepsilon_z = \varepsilon_{zz}; \quad \gamma_{xy} = \varepsilon_{xy}; \quad \gamma_{yz} = \varepsilon_{yz}; \quad \gamma_{zx} = \varepsilon_{zx}, \quad (3)$$

та напружень:

$$\sigma_x = \sigma_{xx}; \quad \sigma_y = \sigma_{yy}; \quad \sigma_z = \sigma_{zz}; \quad \tau_{xy} = \sigma_{xy}; \quad \tau_{yz} = \sigma_{yz}; \quad \tau_{zx} = \sigma_{zx},$$

а вектор-стовпців деформацій у вигляді:

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}. \quad (4)$$

Аналогічно для вектора-стовпця напружень:

$$\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}$$

та відповідних часткових коефіцієнтів S_{ij} матриці податливості, та K_{ij} матриці жорсткості з індексами $i, j = 1, 2, \dots, 6$ у порядку, відповідному до матриці (2), отримаємо у векторно-матричному представленні:

$$\varepsilon = S\sigma, \quad (5)$$

$$\sigma = K\varepsilon. \quad (6)$$

Термічні напруження, викликані тепловими впливами, можуть розраховуватися за формулою

$$\varepsilon_{Tij} = \delta_{ij} \alpha T \quad \text{для } i, j = x, y, z, \quad (7)$$

$$\text{де символ Кронекера } \delta_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ для } j = i \\ 0 \text{ для } j \neq i \end{cases}. \quad (8)$$

Деформація структури, за умови спільного навантаження системою сил і температурних впливів (у вигляді розподілу температур) визначається сумарним впливом сил і температури

$$\varepsilon' = \varepsilon + \varepsilon_T.$$

Виходячи з узагальненого закону Гука для об'ємного напруженого стану матеріалу для матриці χ , що характеризує жорсткість елемента одиничних розмірів, має вираз:

$$\chi = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1-\mu & \mu & \mu & & & \\ \mu & 1-\mu & \mu & & & \\ \mu & \mu & 1-\mu & & & \\ \hline & & & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ & & & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ & & & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{array} \right], \quad (9)$$

Температурний вплив на напружений стан враховується матрицею χ_T

$$\chi_T = \frac{E}{1-2\mu} \{-1, -1, -1, 0, 0, 0\} = \chi_T^T, \quad (10)$$

у матричному записі маємо:

$$\sigma = \chi\varepsilon + \alpha T \chi_T. \quad (11)$$

Помноживши (11) на χ^{-1} , отримаємо матричне подання напружено-

деформованого стану:

$$\varepsilon_T = -\alpha T \chi^{-1} \chi_T = \alpha T \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\} \quad (12)$$

де $\varepsilon = \chi^{-1} \sigma - \alpha T \chi^{-1} \chi_T = \Phi \sigma + \varepsilon_T$ та $\Phi = \chi^{-1}$.

Для аналізу структури на постійному струмі рівняння (1) спрощується до рівняння рівноваги

$$[K]\{q\} = \{F\}, \quad (13)$$

тому що похідні координат дорівнюють нулю.

Матриця жорсткості $[K]$ залежить також від способу впливу на структуру узагальнених зовнішніх сил (трьох-, двох-, одномірне навантаження).

Фізичний сенс елементів матриці $[K]$ жорсткості наступний: K_{ij} визначає силу, яку необхідно прикласти в напрямку j для отримання одиничного зсуву в напрямку i .

Часткові коефіцієнти K_i матриці можна визначити як значення, що пропорційні відповідним коефіцієнтам χ_{ij} жорсткості одиничного елемента, що помножують на коефіцієнт масштабування відповідно до наступних сил діючих на елемент: осьова сила, сила зсуву, моменти згинання та скручування. На прикладі розрахунку НДС мікробалки встановлені множники, на які необхідно перемножити коефіцієнти матриці жорсткості елемента одиничних розмірів для врахування розмірів реального елемента.

Для деформації стискання-розтягування, тобто для значень $i = j = 1, 2, 3$; $K_{ij} = EA/l$, де A – площа поперечного перерізу балки, l – її довжина, множник дорівнює A/l . Для деформації крутіння $i = j = 4, 5, 6$ множник, пов'язаний із так званою жорсткістю, $K_{ij} = GI_z/l$. Множник дорівнює I_z/l .

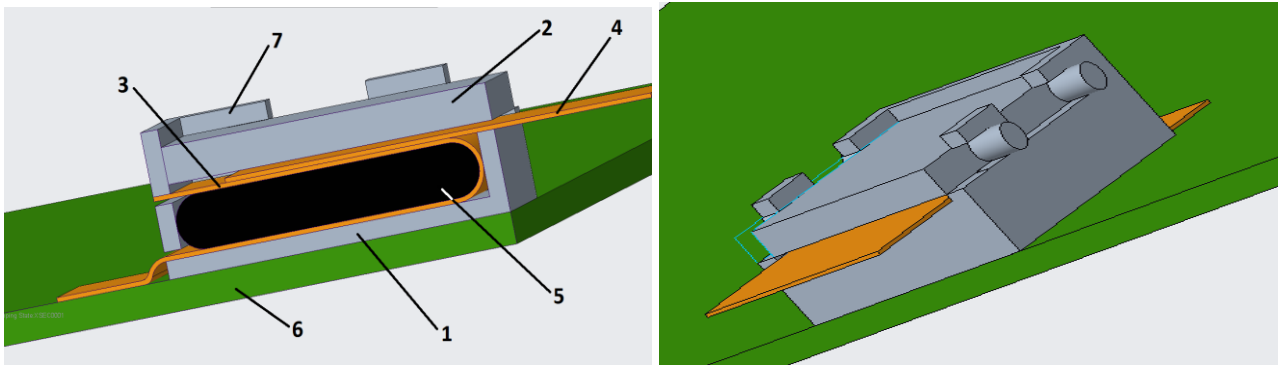
Під час деформації згання одночасно можливо діятиме момент згинання, який викликає протидію $12EI_z/(1+\Phi)l^3$, та сили зсуву з реакцією на неї A/l , де I_z – момент інерції, поперечного перерізу елемента, A – його площа. Співвідношення цих реакцій характеризується θ коефіцієнта Φ : $\Phi = 12EI_z/GAl^2$. Загальна жорсткість скінченного елемента до моменту та сили оцінюється як $(1+\Phi)$, яка складається з частки $6EI_z/(1+\Phi)l^2$ та $12EI_z/(1+\Phi)l^3$. Складові коефіцієнта K_{ij} , що розраховуються за цими правилами, складаються у матрицю K_{ij} (зв'язує напруження та зміщення).

При формуванні загальної матриці жорсткості структури коефіцієнти суміжного елемента у вузлі змінюють знак на протилежний.

У третьому розділі наведено результати планування та проведення експерименту для побудови моделі впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача електронних пристроїв з нульового силою вставки на перехідний опір у зоні контактування.

У ході виконання дисертаційних досліджень подано заявку й отримано патент України на корисну модель плаского з'єднувача для ГКС (рис. 1).

Запропонований з'єднувач у порівнянні з аналогічними рішеннями дозволяє підвищити щільність розташування контактів у рознімному МЗ ГКС, а також можливу кількість виводів і надійність механізму фіксації.



1 – корпус; 2 – кришка; 3 – шлейф-контактор; 4 – шлейф, що приєднується;
5 – ущільнювач; 6 – друкована плата; 7 – фіксатор кришки

Рисунок 1 – 3D-модель плоского з'єднувача

Крім того, конструкція є ремонтпридатною: технологія виготовлення матриць і контактів є досить простою та дешевою, що дозволяє у разі необхідності здійснити заміну матриць і контактів у тому ж корпусі.

У запропонованій конструкції на перехідний опір впливає велика кількість конструкційних параметрів: висота та кількість зубців рухомої планки, які створюються для збільшення та концентрації тиску, а також жорсткість за Шором еластичної пластини, що знаходиться у внутрішньому просторі матриці контактів.

Одним з найважливіших параметрів аналогічних з'єднувачів є перехідний опір між шлейфом і контактними елементами з'єднувача. На рис. 2 зображено шлейф-контактор з еластичною пластиною з вакуумної резини, який було виготовлено з діелектрику лакофольгового марки ФДІ-А-50 (товщина алюмінію 30 мкм, товщина полііміду 20 мкм) та використано в експериментальних дослідженнях. Для оптимізації значень цих параметрів за критерієм зменшення перехідного опору проведено повний факторний експеримент, кількість факторів дорівнювала 3.

Межі змін і позначення факторів, які використано в експерименті, наведено в табл. 1.

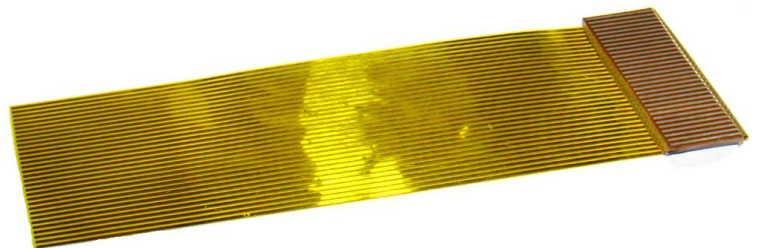


Рисунок 2 – Шлейф-контактор з еластичною пластиною

Таблиця 1 – Межі змін і позначення факторів

Фактори	Висота зубців h , мм	Кількість зубців a , шт	Жорсткість за Шором D	Перехідний опір R_n , мОм
Позначення в ПФЕ	x_1	x_2	x_3	y
Верхня межа (1)	1,5	6	160	–
Основний рівень (0)	1,0	4	100	–
Нижня межа (-1)	0,5	2	70	–

Базова функція залежності перехідного опору від параметрів з'єднувача буде мати вигляд:

$$R_n = f(h, a, D), \quad (14)$$

де h – висота зубців притискної пластини;
 a – кількість зубців притискної пластини;
 D – жорсткість за Шором еластичної пластини.

За результатами проведеного експерименту отримано рівняння регресії в кодованому вигляді:

$$R_n(h, D) = 19,183 + 4,946x_1 - 0,05631x_3. \quad (15)$$

де R_n – значення функції перехідного опору, що відповідає кількості проведених дослідів N ; x_i – значення фактора, що відповідає N .

Для оцінки адекватності отриманої моделі виконано її оцінку за критерієм Фішера. Розрахункове значення критерію Фішера склало $F_{розр} = 3,87$, а табличне значення $F_{табл} = 19,04$. Отже, отримане рівняння регресії адекватно описує процес у межах досліджуваної області зміни факторів.

Для отримання поверхні відгуку кожен з трьох факторів зафіксовано на нульовому рівні: $h = 1,0$ мм, $a = 4$ шт, $D = 100D$. Підставивши ці значення в розкодування рівняння регресії, отримуємо три рівняння з двома факторами.

Для розкодування рівняння замінимо x_i на натуральні значення:

$$x_1 = \frac{h-1,0}{1} = h-1,0, \quad x_3 = \frac{D-100}{90} = 0,0111 \cdot t - 1,1111,$$

$$R_n(h, D) = 29,73 + 4,916(h-1) + 5,073(0,0111D - 1,1111) = 29,73 + 4,916h - 4,916 + 0,05631D - 5,631.$$

Після виконання перетворень і скорочень отримано:

$$R_n(h, D) = 19,183 + 4,946h - 0,05631D.$$

Для визначення цільової функції та методу руху до оптимуму мінімізуємо функцію відгуку, тобто обираємо такі значення параметрів конструкції з'єднувача, за яких опір буде мінімальним:

$$R_n(h, D) = 19,183 + 4,946h - 0,05631D \rightarrow \min. \quad (16)$$

Функція $R_n(h, D)$ має один мінімум у заданій області працездатності з'єднувача, і є однокстремальною (унімодальною). У даному випадку завдання параметричної оптимізації відноситься до завдань лінійного програмування.

Таким чином, для зниження перехідного опору у зоні контактування необхідним є зменшення висоти зубців кришки з'єднувача та збільшення жорсткості ущільнювача.

Четвертий розділ дисертаційної роботи містить результати експериментальних підтверджень теоретичних досліджень, виконаних на попередніх етапах роботи, та визначення експлуатаційних характеристик з'єднувача гнучких шлейфів для ЕМЗ.

Завданням проведення експерименту було отримання набору статистичних даних для оцінки якості конструкції з'єднувача гнучких шлейфів.

Для проведення експерименту обрано гнучкий шлейф з 32-ма контактами та лініями зв'язку. Контакти розташовано в один ряд із кроком 1,0 мм.

Для з'єднання двох шлейфів запропоновано нову конструкцію з'єднувача, яка

дозволяє швидко та точно виконувати процес підмикання та гарантує якісне електричне з'єднання між контактами лінії зв'язку. На рис. 3 показана схема конструкції з'єднувача.

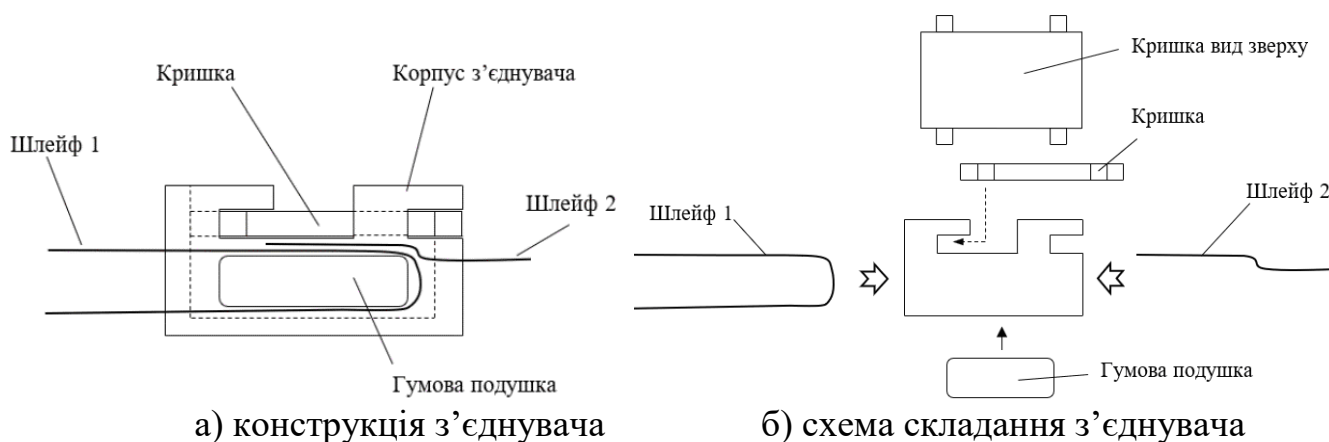


Рисунок 3 – Принцип з'єднання гнучких шлейфів

Шлейф 2 притискається до шлейфа 1 за допомогою кришки. Гумова подушка здійснює необхідний тиск на внутрішню сторону петлі шлейфа 1, тим самим притискаючи його до контактів шлейфа.

Отже, до завдань експериментальних досліджень додано ще два пункти:

- визначення впливу форми поверхні верхньої кришки з'єднувача на зусилля, що необхідне для механічного роз'єднання двох шлейфів у різні сторони;
- визначення значення перехідного опору між контактами шлейфів.

Для проведення експериментальних досліджень були виготовлені дослідні зразки шлейфів плаского з'єднувача з діелектрику лакофольгового марки ФДІ-А-50 (товщина алюмінію 30 мкм, товщина полііміду 20 мкм), зображення яких наведено на рис. 4.

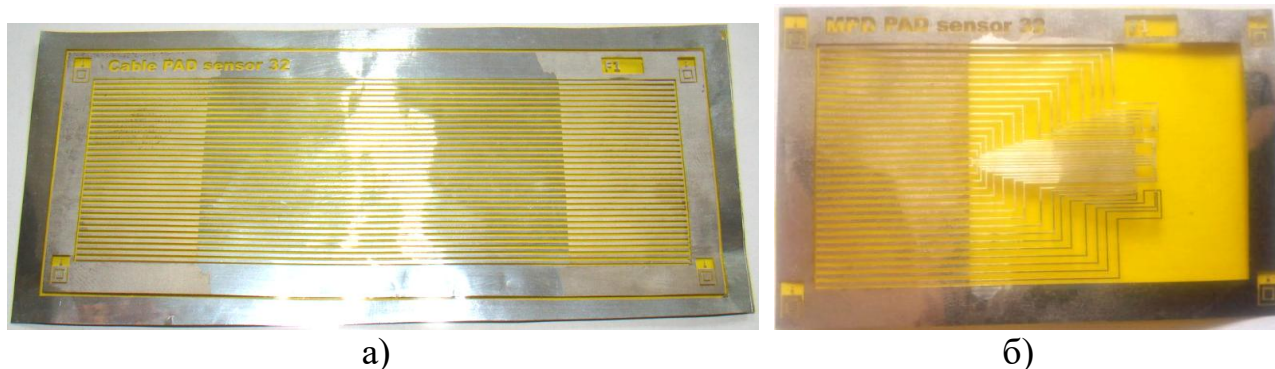


Рисунок 4 – Експериментальні зразки шлейфів (з технологічними зонами) для дослідження з'єднувача: а) шлейф 1; б) шлейф 2

Для проведення експерименту було зібрано експериментальний стенд, схема якого наведена на рис. 5 (вид збоку та зверху).

На рис. 5 введені такі позначення: 1 – гнучкий шлейф; 2 – кроковий двигун; 3 – датчик тиску; 4 – кріпильний куточок; 5 – нерухомий кріпильний профіль; 6 – основа макету; 7 – телескопічна напрямна; 8 – рухлива основа; 9 – гайка; 10 – кріпильні гвинти; 11 – черв'ячна гвинтова передача; 12 – стійкі кріплення

крокового двигуна; 13 – муфта; 14 – роз’ємне з’єднання; 15 – рухливий кріпильний профіль з гайкою; 16 – притискна пластина.

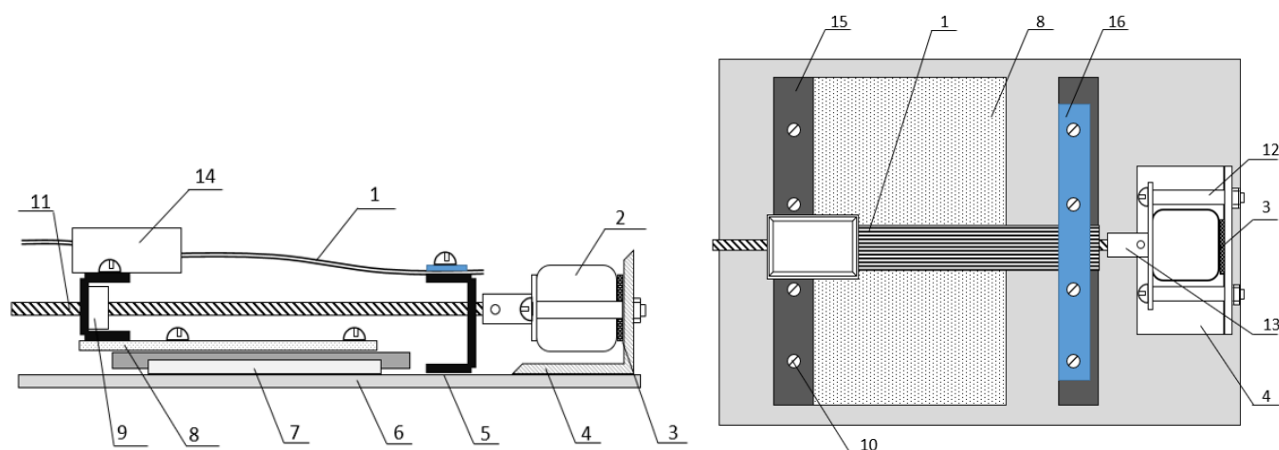


Рисунок 5 – Схема експериментального станда для дослідження якості ЕМЗ ГКС

Для вимірювання зусилля, що необхідне для руйнування з’єднання, використовувався тензодатчик резистивного типу марки СZN-СР42. Діапазон спрацьовування датчика: 0,2 Н...100 Н, габаритні розміри: 27 мм × 63,75 мм × 0,34 мм, робоча температура: -40 °С...75 °С.

Під час проведення експерименту було використано п’ять різновидів кришки плоского з’єднувача. Кожна кришка має свій рисунок поверхні, яка притискає шлейф до контактної поверхні.

У табл. 2 наведено зведені характеристики кожної з дослідних кришок. Прийняті наступні позначення: S – відстань між зубцями (кроки), мм; n – кількість зубців на кришці, шт; h – висота зубця, мм.

У результаті проведення експерименту були отримані дані з датчика тиску для різних варіантів виконання кришки з’єднувача.

На рис. 6 показано графік з результатами експериментальних досліджень для 5 різних варіантів кришок (залежність тиску та перехідного опору від поступового зміщення шлейфу).

Таблиця 2 – Зведені характеристики дослідних кришок з’єднувача

№ зразку	Профіль поверхні	Характеристики
1		$S = 4,5 \text{ мм}$ $n = 7 \text{ шт}$ $h = 1 \text{ мм}$
2		$S = 5 \text{ мм}$ $n = 6 \text{ шт}$ $h = 1 \text{ мм}$
3		$S = 9 \text{ мм}$ $n = 4 \text{ шт}$ $h = 1 \text{ мм}$
4		$S = 27 \text{ мм}$ $n = 2 \text{ шт}$ $h = 1 \text{ мм}$
5		$S = 0 \text{ мм}$ $n = 1 \text{ шт}$ $h = 1 \text{ мм}$

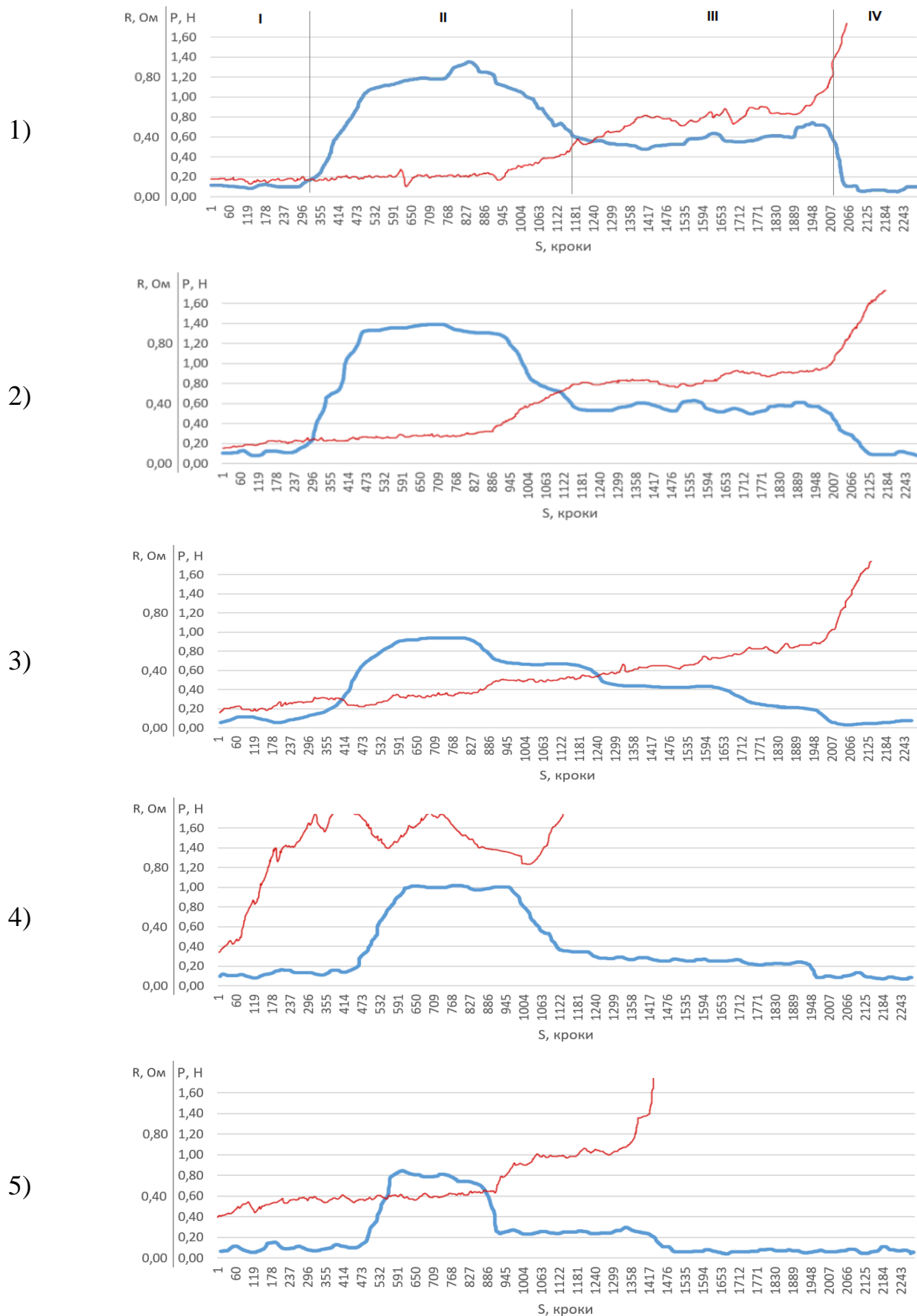


Рисунок 6 – Графік з результатами експериментальних досліджень для різних варіантів кришок

Таким чином, розроблені стенд для дослідження якості ЕМЗ ГКС і методика проведення експериментальних досліджень дозволили експериментально довести якість запропонованої конструкції плаского з'єднувача гнучких шлейфів.

Як можна бачити з наведених на рис. 6 графіків, максимальне зусилля, яке витримує з'єднувач, становить 1,3...1,4 Н. Також показано, що перехідний опір у контактах з'єднувача становить максимум 0,2...0,3 Ом. Експеримент показав надійність і стабільність параметрів під час прикладення механічних впливів і їх збереження протягом всієї другої стадії роботи з'єднувача, поки шлейф не зривається та не починає «ковзати» відносно нерухомого елемента конструкції.

Тож, отримані результати показали придатність конструкції з'єднувача для практичного застосування у складі сучасних модулів ЕТ.

П'ятий розділ дисертаційної роботи містить результати дослідження процесів формування зварних мікроз'єднань (ЗМЗ), отриманих за допомогою УЗ-зварювання. Проаналізовано фізико-хімічні процеси, які спостерігаються у процесі формування та руйнування монтажних з'єднань, і вплив конструктивно-технологічних факторів на кінетику формування ЗМЗ.

Для дослідження фізико-хімічних процесів, що спостерігаються під час формування та руйнування ЗМЗ, застосовані положення теорії руйнування твердих тіл. Механізм руйнування ЗМЗ заснований на зародженні та розвитку тріщин і мікротріщин у середовищі, що сформувалося під час утворення ЗМЗ та містить дефекти мікроструктури. Поява тріщини довжиною l , призводить до концентрації напружень біля її країв, якщо до зразку прикладено розтягувальне зусилля $F_{вн}$.

Величина напруження біля краю гострої тріщини, що має радіус округлення a , визначається співвідношенням:

$$\sigma_k = \sigma(1 + 2\sqrt{l/a}), \quad (17)$$

де σ_k – напруження біля краю тріщини; σ – середнє напруження в поперечному перерізі зразка.

Реальна міцність МЗ σ_p може бути визначена наступним чином:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_0}{1 + 2\sqrt{l/a}} \approx \frac{\sigma_0}{2\sqrt{l/a}}, \quad (18)$$

де σ_0 – теоретична міцність матеріалу.

Зі співвідношення (18) видно, що реальна міцність МЗ є тим нижчою, чим довше виникла в ньому тріщина та чим меншим є радіус кривизни її краю. Значна концентрація напружень біля країв тріщини призводить до умов, коли час руйнування матеріалу стає значно меншим за час релаксації.

Встановлено, що відтворюваність міцності ЗМЗ у модулях ЕТ на заданому в технічній документації рівні забезпечується оптимізацією наступних основних технологічних параметрів (факторів): зусилля навантаження, потужності імпульсу та часу зварювання, а також правильним підбором зварюваних матеріалів із відповідними фізико-хімічними властивостями та складу технологічного оснащення.

Також із використанням САД-системи SolidWorks досліджено НДС поліімідних двошарових ГКС з мідним струмопровідним шаром.

Аналіз НДС матеріалів шлейфа з товщиною мідних провідників 35 мкм вказує, що несуча здатність шлейфа істотно підвищується в порівнянні з базовою товщиною провідників. Для оцінки впливу товщини провідників на міцність шлейфу розроблена модель, де перегин здійснювали за постійного навантаження (рис. 7), згинальний момент дорівнював 21 Н·мкм.

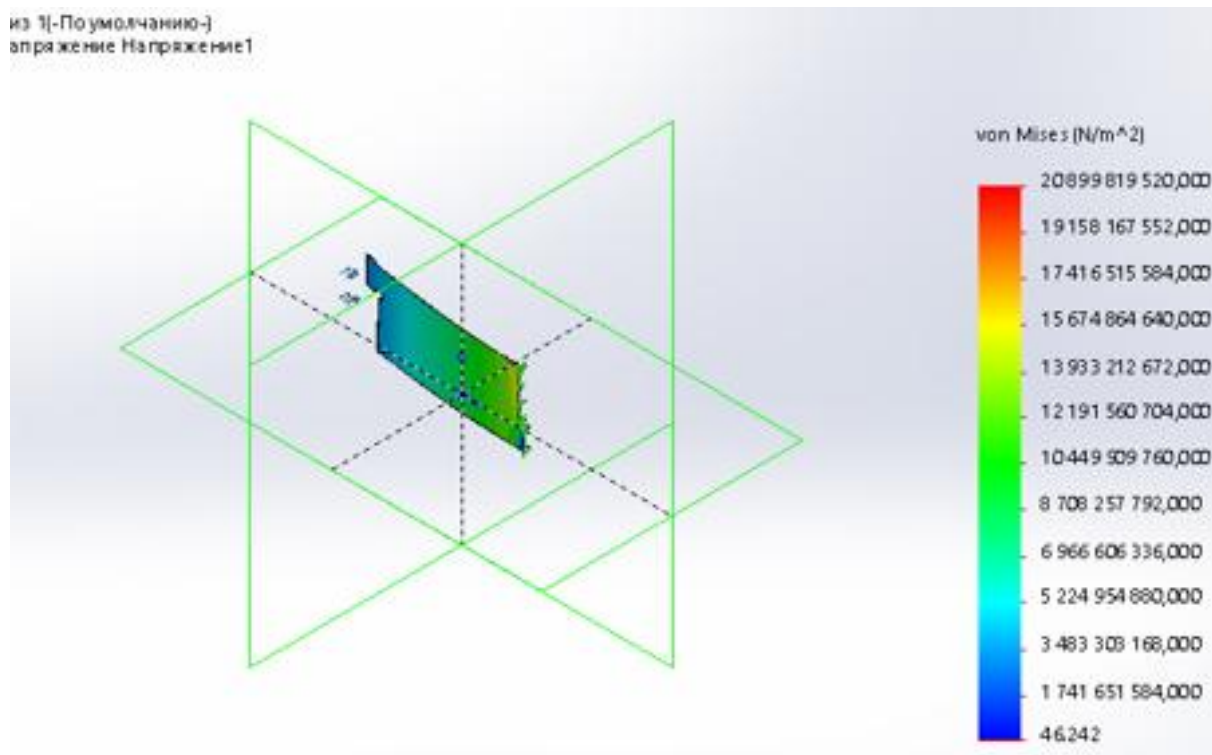


Рисунок 7 – НДС шлейфа за постійного силового навантаження з провідниками товщиною 35 мкм

За умови збільшення товщини провідника з 15 мкм до 35 мкм (у 2,33 рази) напруження в міді знизилися з 391 МПа до 194 МПа, міцність підвищилася в 2,04 рази. Отримані результати показують сприятливі умови для досягнення високої якості виготовлення гнучких міднополіімідних шлейфів та друкованих плат для модулів ЕТ.

У шостому розділі дисертаційної роботи розроблено імітаційну модель ТП складання типоутворюючого модуля ЕТ на гнучкій алюміній-поліімідній основі з використанням математичного апарату та спеціальних інструментальних засобів моделювання (GPSS World), що дало можливість отримати математичну модель ТП складання виробів для визначення відсотку виходу придатних модулів ЕТ, виготовлених на технологічній лінії складання за

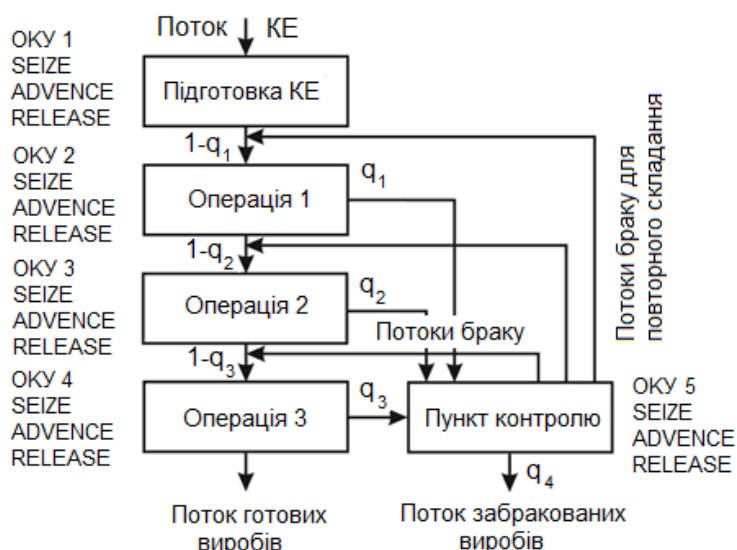


Рисунок 8 – ТП складання модуля ЕТ як система МО

встановлений проміжок часу.

Основні результати моделювання ТП складання модуля ЕТ подано в табл. 3, а графічне представлення моделі наведено на рис. 8.

У табл. 3 використано такі позначення: готВироби – кількість готових виробів; часткаГотВир – відносна частка готових виробів; бракВиробу – кількість бракованих виробів; часткаБрВир – відносна частка бракованих виробів; срЧасПідгВир – середній час складання одного виробу. ТП складання модуля ЕТ, структурна схема якого представлена на рис. 8, включає в себе наступні операції: вхідний контроль і підготовку конструктивних елементів (КЕ) до складання (блок «Підготовка КЕ»); розміщення КЕ на монтажному полі (блок «Операція 1»); позиціонування КЕ відносно один одного (блок «Операція 2»); монтаж КЕ за допомогою УЗ-мікрозварювання (блок «Операція 3»); міжопераційний і вихідний контроль виробу, що виготовляється (блок «Пункт контролю»).

Таблиця 3 – Результати моделювання ТП складання виробу ЕТ у середовищі GPSS World

Показники	Початкові числа генератора випадкових чисел			
	23	731	9722	72685
Час роботи технологічної лінії складання 8 годин (480 хв)				
готВироби	9,885	9,909	9,884	9,905
часткаГотВир	0,721	0,721	0,721	0,722
бракВиробу	3,821	3,833	3,823	3,821
часткаБрВир	0,279	0,279	0,279	0,278
срЧасПідгВир	48,559	48,440	48,563	48,460
Δ часткаГотВир	$\Delta_1 = 0,721 - 0,722 = 0,001$			
Δ срЧасПідгВир	$\Delta_2 = 48,563 - 48,440 = 0,123$			
Час роботи технологічної лінії складання 48 годин (2880 хв)				
готВироби	49,496	59,405	59,432	59,496
часткаГотВир	0,722	0,722	0,722	0,722
бракВиробу	22,890	22,855	22,850	22,890
часткаБрВир	0,278	0,278	0,278	0,278
срЧасПідгВир	48,406	48,481	48,459	48,406
Δ часткаГотВир	$\Delta_3 = 0,722 - 0,722 = 0$			
Δ срЧасПідгВир	$\Delta_4 = 48,481 - 48,406 = 0,075$			

Запропонована ММ функціонування ТП складання виробу ЕТ-типопредставника дозволяє проводити прогнозування стабільності ТП – визначати відносну кількість придатних модулів, середній час виготовлення одного виробу, середню кількість виготовлених за зміну виробів ЕТ.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі на підставі отриманих результатів вирішено актуальне науково-прикладне завдання забезпечення якості високощільних рознімних і

нерознімних ЕМЗ у багатошарових ГКС для модулів ЕТ шляхом розробки технології формування цих з'єднань на основі досліджень фізико-технологічних параметрів ГКС.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Із використанням матричного функціонального аналізу побудовано матрицю жорсткості, яка дозволяє забезпечити розрахунок деформації пружних елементів гнучких ЕМЗ, а також елементів мікроелектромеханічних систем за відомого вектора зовнішніх сил.

2. Проведено аналіз розробленої конструкції плаского з'єднувача з нульовою силою вставки для модулів ЕТ та виявлено фактори, що мають вплив на перехідний опір між шлейфом і матрицею контактів. До таких факторів відносяться: висота h і кількість зубців a на притискній пластині та шорсткість D еластичної пластини.

3. Виготовлено дослідні зразки шлейфів плаского з'єднувача з діелектрику лакофольгового марки ФДІ-А-50 (товщина алюмінію 30 мкм, товщина полііміду 20 мкм) та проведено трифакторний експеримент, на основі якого отримано ММ впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача на перехідний опір у зоні контактування. За допомогою отриманої моделі виявлено оптимальні конструкційні параметри конструкції плаского з'єднувача за критерієм мінімізації перехідного опору. Оптимальними параметрами є висота зубців $h = 1,17$ мм і жорсткість за Шором притискної пластини $D = 93$.

4. Розроблені стенд для дослідження якості ЕМЗ і методика проведення експериментальних досліджень, які дозволили експериментально довести якість запропонованої конструкції плаского з'єднувача гнучких шлейфів і визначити найбільш вдалу для контактування форму притискаючої кришки з'єднувача, а також які можна використовувати для дослідження подібних рознімних МЗ елементів комутації для модулів ЕТ.

5. Експериментально визначене максимальне зусилля, яке витримує з'єднувач, становить $1,3 \dots 1,4$ Н. Показано, що перехідний опір у контактах з'єднувача становить максимум $0,2 \dots 0,3$ Ом. Отримані результати свідчать про придатність конструкції з'єднувача для практичного застосування у складі сучасних модулів ЕТ. Виходячи з отриманих результатів була визначена форма притискаючої кришки з'єднувача. Відповідно до результатів експерименту, кришка повинна мати 6 або 7 зубців

6. Визначено, що максимальна пластичність алюмінієвого стрічкового виводу з матеріалу марки А-995Д з перетином 242×18 мкм² (8 %) досягається за температури відпалювання близько 573 К, а середовище відпалювання істотного впливу на досліджувані механічні властивості виводів не виявляє. Визначено режими УЗ-зварювання для гнучких комутаційних структур з шириною провідників нижнього шару 210 мкм і верхнього шару 100 мкм та відстанню між провідниками нижнього шару 300 мкм і верхнього шару – 200 мкм, за яких забезпечується максимальна міцність ($27 \cdot 10^{-2}$ Н) мікроз'єднань: потужність УЗ-генератора – 2,5 Вт; час зварювання – 380 мс, навантаження робочого інструмента – $76 \cdot 10^{-2}$ Н.

7. За результатами виконаних досліджень розроблено та відпрацьовано ТП складання алюміній-поліімідних ГКС зі зварними міжз'єднаннями для визначення

відсотку виходу придатних виробів, виготовлених на технологічній лінії складання за встановлений проміжок часу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Отображение процесса изменения параметров РЭС на основе системологической модели / А. А. Андрусевич, И. В. Жарикова, Н. П. Демская, В. В. Невлюдова. // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет повітряних сил ім. І. Кожедуба, 2014. – Вип. 8(124). С. 8-13.

2. Контроль толщины полупроводниковых пластин в процессе производства / Н. Г. Стародубцев, Н. П. Демская, С. И. Теслюк, А. Ю. Ихтияров // Технология приборостроения. – 2015. – №2. С. 56-58.

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

4. Методи контролю якості гнучких структур / С. Е. Притчин, Н. П. Демська, Д. В. Гуріна // Радиоэлектроника и информатика. – 2016. – № 3. С. 3-6.

5. Прогнозування параметрів гнучких структур у рамках вирішення завдання забезпечення їх якості / І. В. Боцман, С. П. Новоселов, Н. П. Демська, В. В. Невлюдова // Технология приборостроения. - 2017, № 1. С. 42-48.

6. Демська Н. П. Гнучкі комутаційні структури: аналіз технологій та галузі застосування / Н. П. Демська. // Технология приборостроения. – 2019. – №1. С. 38–42.

7. Вплив конструктивно-технологічних чинників на кінетику формування зварних між'єднань / І. Ш. Невлюдов, Н. П. Демська, М. Г. Стародубцев // Технология приборостроения. – 2020. – № 1. С. 19-23.

Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних:

8. Оцінка впливу механічних дій на гнучкі друковані плати / І. Ш. Невлюдов, Є. А. Разумов-Фризюк, Н. П. Демська, В. В. Невлюдова // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 1 (70). С. 143-149.

9. Аналіз впливу механічних напружень на можливість мініатюризації гнучких структур електронної техніки на прикладі ZIF з'єднувача / І. Ш. Невлюдов, Є. А. Разумов-Фризюк, Н. П. Демська // Проблеми тертя та зношування. – 2017, № 3 (76). С. 74-80.

10. Математическое моделирование выбора информативных признаков для анализа состояния процессов жизненного цикла радиоэлектронных средств // [Н. Г. Стародубцев, Ф. В. Фомовский, Н. П. Демская та ін.]. // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2017. No. 1 (1). С. 82-89.

11. Новітні конструктивно-технологічні рішення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів / [І. Ш. Невлюдов, В. М. Борщов, Н. П. Демська та ін.]. // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. № 5 (3). С. 67-78.

12. Дослідження напружено-деформованого стану поліімідних комунікаційних структур на прикладі гнучкого шлейфу / [І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, Н. П. Демська та ін.]. // Проблеми тертя та зношування. – 2019. – № 2 (83). С. 54-64.

13. Матрично-структурний аналіз напружено-деформованого стану гнучких між'єднань і компонентів МЕМС / І. Ш. Невлюдов, Н. П. Демська, В. А. Палагін, І. В. Боцман // Innovative technologies and scientific solutions for industries. – 2020. – № 1 (11). С. 122-133.

14. Контроль якості електричних між'єднань гнучких структур / І. Ш. Невлюдов, Н. П. Демська, С. П. Новоселов, Є. А. Разумов-Фризюк // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2020. – № 1 (63). 103-112.

Стаття у науковому виданні іншої держави:

15. Nevliudov I., Omarov M., Botsman I., Demska N., et all Research of factors influencing the process of formation of welded microconnections in electronic modules. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering, 20 (2019), pp. 181-187.

Патент на корисну модель:

16. Богдан Ю.І., Демська Н.П., Невлюдова В.В., Палагін В.А., Разумов-Фризюк Є.А., Роменський В.І. Патент України № 103402 МПК H01R 12/82 (2011.01), Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки; заявник і власник Харківський національний університет радіоелектроніки. опубл. 10.12.2015, бюл. № 23.

Розділи колективної монографії:

17. Nevliudov I., Demska N., Starodubcev N., Nevliudova V. Modeling of destruction processes of the installation connection of electronic equipment // Information systems and innovative technologies in project and program management: Collective monograph. – Riga: ISMA, 2019. pp. 248-257.

18. Nevliudov I., Starodubcev N., Demska N., Omarov Sh. Visual monitoring of the break surface of the installation connection of electronic equipment // Information systems and innovative technologies in project and program management: Collective monograph. – Riga: ISMA, 2019. pp. 258-270.

Матеріали та тези наукових доповідей:

19. Невлюдова В.В., Демская Н.П., Бондаренко Ю.В. Основные причины отказов гибких коммутационных плат // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних та біологічних об'єктів» (Кременчук, 3-5 листопада 2017 р.). С. 33-34.

20. Разумов-Фризюк Є.А., Невлюдова В.В., Демська Н.П. Плоский роз'єм для електронних пристроїв з нульовою силою вставки // 27-я Международная конференции «Новые технологии в машиностроении», (Коблево-Харьков, 3-8 сентября 2017 г.). С. 77-78.

21. Botsman I., Demska N., Nevliudova V. Research of Mechanical Influences on Flexible Printed Circuits Parameters // 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-4.

22. Невлюдов І.Ш., Новоселов С.П., Боцман І.В., Демська Н.П. Розробка параметричної моделі гнучких комутаційних структур для дослідження механічних впливів на них // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»: матеріали конференції (Кременчук, 2-4 листопада 2018 р.). – С. 141-143.

23. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Демська Н. П., Разумов-Фризюк Є. А. Моделювання вигину двошарової структури при термовпливах // Міжнародна науково-практична конференція «Математичне моделювання процесів в економіці та управлінні проектами і програмами (ММП-2019)». (Коблево, 09-13 вересня 2019 р.). С. 55-58.

24. Демська Н. П. Математичні моделі мікроелектромеханічних міжз'єднань / Н. П. Демська, В. А. Палагін, Ш. А. Омаров // III Міжнародна науково-практична конференція «Виробництво & Мехатронні Системи» (M&MS-2019), (Харків, 24-25 жовтня 2019 р.). С. 119-122.

25. Nevliudov I., Demska N., Palagin V., Botsman I., et all. Stiffness Matrix of MEMS on the Stress-Strain Method Basis // 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, Ukraine, 2020, pp. 142-145.

26. Демская Н. П. Эксплуатационные характеристики гибких печатных структур МЭМС-устройств / Н. П. Демская, И. Ш. Невлюдов, И. В. Боцман, Н. Г. Старобудцев // VI Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка», (Кременчук, 14-16 травня 2020 р.). С. 62.

АНОТАЦІЯ

Демська Н. П. Технологія електричних міжз'єднань модулів 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, 2020.

У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання забезпечення якості високощільних рознімних і нерознімних електричних міжз'єднань у багатошарових гнучких комутаційних структур (ГКС) для модулів електронної техніки (ЕТ) шляхом розробки технології формування цих з'єднань на основі досліджень фізико-технологічних параметрів ГКС. Отримала подальший розвиток технологія електричних комутаційних елементів, що дозволило розробити конструкцію плаского з'єднувача для електронних пристроїв із нульовою силою вставки з пневматичним притисненням контактних елементів, який відрізняється від аналогів меншою вірогідністю виникнення дефектів, підвищеною щільністю розташування контактів та кількістю виводів. Вперше за допомогою багатофакторного експерименту отримано модель впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача на перехідний опір, який виникає між з'єднувачем і шлейфом, яка дозволила оптимізувати конструкцію з'єднувача за критерієм мінімізації

перехідного опору. Розроблено й обґрунтовано технологію складання поліімідних ГКС, що забезпечує формування високощільних нерознімних електричних міжз'єднань за допомогою УЗ-зварювання та рознімних міжз'єднань на основі запропонованого з'єднувача. Вперше запропоновано математичну модель технологічного процесу складання модулів ЕТ на основі алюміній-поліімідних ГКС, що дозволяє виконувати оцінку надійності та стабільності технологічного процесу, визначати відсоток виходу придатних виробів, середній час виготовлення одного виробу, середню кількість зібраних виробів.

Ключові слова: електричні міжз'єднання, гнучкі комутаційні структури, з'єднувач із нульовою силою вставки, ультразвукове зварювання, матриця жорсткості, напружено-деформований стан, технологічний процес.

АННОТАЦІЯ

Демская Н. П. Технология электрических межсоединений модулей электронной техники. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной техники. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2020.

В работе решена актуальная научно-прикладная задача обеспечения качества высокоплотных разъемных и неразъемных электрических межсоединений в многослойных гибких коммутационных структур (ГКС) для модулей электронной техники (ЭТ) путем разработки технологии формирования этих соединений на основе исследований физико-технологических параметров ГКС. Получила дальнейшее развитие технология электрических коммутационных элементов, позволившая разработать конструкцию плоского разъема для электронных устройств с нулевой силой вставки с пневматическим прижатием контактных элементов, отличающаяся от аналогов меньшей вероятностью возникновения дефектов, повышенной плотностью расположения контактов и количеством выводов. Впервые с помощью многофакторного эксперимента получена модель влияния конструкционных параметров плоского разъема на переходное сопротивление, возникающее между разъемом и шлейфом, позволившая оптимизировать конструкцию разъема по критерию минимизации переходного сопротивления. Разработана и обоснована технология сборки полиимидной ГКС, обеспечивающая формирование высокоплотных неразъемных электрических межсоединений с помощью УЗ-сварки и разъемных межсоединений на основе предложенного разъема. Впервые предложена математическая модель технологического процесса сборки модулей ЭТ на основе алюминий-полиимидных ГКС, позволяющая выполнять оценку надежности и стабильности технологического процесса, определить процент выхода годных изделий, среднее время изготовления одного изделия, среднее количество собранных изделий.

Ключевые слова: электрические межсоединения, гибкие коммутационные структуры, разъем с нулевой силой вставки, ультразвуковая сварка, матрица жесткости, напряженно-деформированное состояние, технологический процесс.

ABSTRACT

Demka N. P. Technology of electrical interconnections of electronic equipment modules. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.27.06 – Technology, equipment and production of electronics. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2020.

The paper solved topical scientific and practical task of ensuring quality of high-density detachable and non-detachable electrical interconnections in multilayer flexible commutative structures (FCS) for electronic equipment (EE) modules is solved by developing the technology of forming these connections based on studies of physical and technological parameters of FCS. The technology of electrical switching elements was further developed, which allowed to develop the design of a flat connector for electronic devices with zero insertion force with pneumatic pressing of contact elements, which differs from analogues: less likely to cause defects, increased contact density and number of pins. For the first time, a multifactor experiment was used to get the influence model of the design parameters of a flat connector on the transient resistance that occurs between the connector and the loop, which allowed to optimize the design of the connector by minimizing the transient resistance. The technology of assembling polyimide corticosteroids, which provides the formation of high-density fixed electrical interconnections by means of ultrasonic welding and detachable interconnections on the basis of the proposed connector has been developed and substantiated. For the first time a mathematical model of the technological process of assembling EE modules based on aluminum-polyimide FCS was proposed, which allows to evaluate the reliability and stability of the technological process, determine the percentage of suitable products, average manufacturing time of one product, average number of assembled products.

Keywords: electrical interconnections, flexible commutative structures, flat zif-connector, ultrasonic welding, stiffness matrix, stress-strain state, technological process.