

Міністерство освіти і науки України
харківський національний університет радіоелектроніки

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

НЕВЛЮДОВА ВІКТОРІЯ ВАЛЕРІЇВНА

УДК.621.396.6

ДИСЕРТАЦІЯ

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ
ГНУЧКИХ СТРУКТУР У ВИРОБАХ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво
електронної техніки

технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Виростання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Науковий керівник

Лучанінов Анатолій Іванович, доктор фізико-математичних наук, професор

Харків - 2017

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	6
Вступ.....	8
1 Аналіз стану проблеми створення та використання ГС у складі виробів ЕТ	16
1.1 Аналіз тенденцій розвитку виробів ЕТ та особливостей застосування гнучких структур у їх складі	16
1.2 Аналіз характеристик ГС та вимог до них	22
1.2.1 Обґрунтування необхідності використання ГС	22
1.2.2 Аналіз умов експлуатації та впливів на ГС	26
1.3 Аналіз особливостей проектування та технології виготовлення ГС у складі виробів ЕТ	35
1.4 Аналіз методів забезпечення якості ГС у виробках ЕТ	37
1.4.1 Показники якості виробів ЕТ на основі ГС	37
1.4.2 Показники надійності виробів ЕТ на основі ГС	39
1.4.3 Методи забезпечення якості виробів ЕТ на основі ГС.....	40
1.5 Висновки та постановка завдань досліджень.....	41
2 Фізико-технологічні моделі прогнозування якості ГС у виробках ЕТ.....	43
2.1 Прогнозування параметрів ГС у виробках ЕТ у рамках вирішення завдання забезпечення їх якості.....	43
2.2 Розробка та обґрунтування моделей дестабілізуючих факторів.....	45
2.3 Розробка фізико-технологічної моделі для відображення зміни параметрів ГС у виробках ЕТ	51
2.4 Метод прогнозування параметрів ГС у виробках ЕТ.....	63
2.5 Вибір змінних, що визначають поведінку ГС у виробках ЕТ	67
Висновки по розділу 2	74
3 Моделі руйнування ГС у складі виробів ЕТ і методи підвищення їх якості.....	75
3.1 Аналіз видів деформацій, що виникають у ГС.....	75

3.1.1 Механізми руйнування ГС	75
3.1.2 Деформації типу «вигин»	75
3.1.3 Деформації типу «розтягнення-стискання»	77
3.1.4 Резонансне руйнування	78
3.2 Моделювання циклічних пружнопластичних деформацій ГС під час багаторазових згинань	78
3.3 Аналіз деформацій типу «розтягнення»	86
3.4 Аналіз резонансного руйнування ГС	94
3.5 Аналіз механізму утворення тріщин у провідниковій системі ГС.....	101
3.6 Аналіз можливих руйнувань електричного контакту «електронний компонент- основа ГС»	107
3.7 Рекомендації з технологічного забезпечення якості ГС	109
Висновки по розділу 3	112
4 Експериментальні дослідження впливу механічних дій на ГС у виробках ЕТ	113
4.1 Аналіз дестабілізуючих факторів і визначення вхідних параметрів для проведення досліджень	113
4.2 Експериментальні дослідження впливу вібрацій на вихідні параметри ЕТ на основі ГС	114
4.2.1 Постановка завдань дослідження	114
4.2.2 Принцип дії та опис конструкції випробувального устаткування	115
4.2.3 Низькочастотний вібростенд для контролю параметрів ЕТ на основі ГС....	116
4.2.4 Проведення експериментальних досліджень	118
4.2.5 Аналіз результатів експериментальних досліджень.....	124
4.3 Дослідження механічних деформацій ГС.....	132
4.3.1 Опис експериментальної установки для дослідження впливу механічних навантажень на ГС.....	132
4.3.2 Проведення експерименту із визначення тиску, необхідного для руйнування рознімного з'єднання ГС.....	134
4.4 Дослідження деградації діелектричної основи ГС	136

4.4.1 Експериментальна установка для дослідження електричного пробою діелектриків.....	136
4.4.2 Експеримент із визначення напруги, необхідної для пробою основи ГС під час її експлуатації у нормальних умовах.....	137
4.4.3 Експеримент із дослідження електричного пробою основи ГС за її експлуатації в умовах із підвищеною вологістю	138
4.4.4 Експеримент із дослідження електричного пробою основи ГС за імітації експлуатації в умовах морського середовища.....	139
4.5 Дослідження зразка ГС на механічний розрив	140
4.5.1 Експериментальна установка для дослідження механічного розриву	140
4.5.2 Експеримент із дослідження механічного розриву ГС	141
4.6 Моделювання напружено-деформованого стану ГС.....	142
Висновки по розділу 4	148
5 Технологічне забезпечення якості рознімних та нерознімних з'єднань ГС у виробках ЕТ	149
5.1 Аналіз особливостей гнучких рознімних з'єднань.....	149
5.2 Плаский з'єднувач для електронних пристроїв з нульовою силою вставки на основі ГС	150
5.3 Розробка технологічного процесу виготовлення плаского з'єднувача для ГС	153
5.4 Експеримент із визначення перехідного опору ZIF FPC-з'єднувача	156
5.5 Дослідження впливу технологічних режимів операції УЗ-мікрозварювання на надійність монтажних з'єднань у ГС	163
5.5.1 Постановка завдання.....	163
5.5.2 Планування та проведення факторного експерименту, обробка результатів експерименту.....	164
5.5.3 Оптимізація експериментально-статистичної моделі процесу УЗ-зварювання.....	169
5.6 Експериментальне визначення оптимальних технологічних режимів процесу монтажу виробів ЕТ на основі ГС	172

5.6.1 Методика проведення експерименту	172
5.6.2 Експериментальні дослідження	179
Висновки по розділу 5	185
Висновки	186
Перелік посилань.....	189
Додаток А Акти впровадження.....	202
Додаток Б Список опублікованих праць за темою дисертації	209
Додаток В Патенти та авторські свідоцтва.....	214
Додаток Г Формування вимог до матеріалу ГС.....	219
Додаток Д Вихідні параметри для дослідження ГС	222
Додаток Е Аналіз електромагнітної сумісності компонентів ЕТ на основі ГС	224
Додаток Ж Результати дослідження друкованої котушки індуктивності.....	230
Додаток К Математичне формулювання задачі моделювання згинальних коливань ГС	232
Додаток Л Результати експериментальних досліджень перехідного опору	254

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ГДК – гнучкий друкований кабель;
ГДП – гнучка друкована плата;
ГЖБС – гнучко-жорстка багатошарова схема;
ГЖП – гнучко-жорстка плата;
ГМХ – габаритно-масові характеристики;
ГС – гнучка структура;
ДП – друкована плата;
ЕК – електронний компонент;
ЕТ – електронна техніка;
ЖЦ – життєвий цикл;
ІС – інтегральна схема;
КМП – компоненти, що монтуються на поверхню;
КП – контактна площадка;
МЕМС – мікроелектромеханічні системи;
МСЕ – метод скінченних елементів;
МСТ – мікросистемна техніка;
НДС – напружено-деформований стан;
ПЗ – правило зсуву;
ПМ – параметрична множина;
ПФЕ – повний факторний експеримент;
ТЗ ДГС – тестовий зразок двошарової ГС;
ТП – технологічний процес;
ТПЕ – теорія планування експериментів;
УЗ-зварювання – ультразвукове зварювання;

FFC – Flexible Flat Cable (гнучкий плоский кабель);

FPC – Flexible Printed Circuit (гнучка друкована плата);

ZIF – Zero Insertion Force (нульова сила вставки).

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний рівень розвитку техніки характеризується комплексною розробкою складних виробів електронної техніки (ЕТ) і інтенсифікацією її застосування у всіх галузях народного господарства, науки і техніки.

Прогрес сучасної техніки, розширення кола завдань, покладених на системи управління, високі вимоги до точності, завадозахищеності, швидкодії та ін. призвели до ускладнення ЕТ і до створення складних систем, призначених для вирішення цілого ряду відповідальних завдань. Ускладнення апаратури може привести до різкого зниження її надійності. Відмова в роботі виробів ЕТ, які виконують важливі завдання, стає часто подією надзвичайною, а в деяких випадках і небезпечною, наприклад, за умови використання апаратури у медицині, військовій справі, під час космічних досліджень, на транспорті та ін.

Однією з основних тенденцій розвитку 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 [1-6]. 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 (МСТ) [7-10].

Вимоги до виробів ЕТ постійно зростають у зв'язку з жорсткістю умов їх експлуатації. При цьому існує серйозна проблема забезпечення якісних показників гнучких компонентів, оскільки вони можуть піддаватися великій

кількості дестабілізуючих чинників на всіх етапах життєвого циклу (ЖЦ). Так, наприклад, модулі, що встановлюються на рухомих об'єктах – автомобілях, літаках, ракетах і т. п., у процесі експлуатації можуть піддаватися інтенсивним механічним впливам – ударам, вібраціям, лінійним перевантаженням.

Також слід зазначити, що у багатьох випадках мініатюризація підвищує ризики виробництва та знижує надійність пристроїв ЕТ, особливо, за умов збільшення інтеграції схем. Існують проблеми створення якісних матеріалів для виготовлення ГС. Стабільність їх геометричних розмірів виявляється гіршою, ніж у більшості матеріалів для виробництва традиційних жорстких модулів, отже, внаслідок більш складної структури схем, ці викликані матеріалом зміщення можуть бути локалізовані та непередбачувані у процесі виробництва. У результаті, в міру ускладнення конструкцій, це може позначитися на ефективності проектування, виробництва й експлуатації нових видів виробів на основі ГС, зокрема, за їх широкого впровадження у складі компонентів мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [11-13].

Крім того для багатошарових ГС слід враховувати взаємодію між матеріалами, конструкцію та технологію складання, щоб уникнути потенційно можливих проблем з різним ступенем розширення та гнучкістю шаруватого матеріалу, зі зміщенням матеріалу і впливом вологості та ін. [14-19].

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

Однією з серйозних проблем під час розробки вузлів ЕТ є забезпечення високої якості контактування ГС зі з'єднувачами для їх під'єднання до жорстких частин.

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. [1, 4, 6, 8, 11-23].

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 у дисертаційній роботі, проводилися відповідно до держбюджетних тем НДР, які виконувались у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ):

- держбюджетна тема «Конструктивно-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем та технологій їх виробництва» (ДР № 0108U002216);

- держбюджетна тема «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (ДР 0113U000358);

- держбюджетна тема «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями та їх впровадження» (ДР № 0113U003582);

- держбюджетна тема «Створення мікромініатюрних компонентів електромеханічних інтелектуальних технологічних засобів промислового обладнання та робототехніки» (ДР № 0115U002433).

Автор брала участь у виконанні даних робіт як виконавець.

Постановка завдання

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 плоского з'єднувача для ГС;
- моделювання напружено-деформованого стану ГС і експериментальні дослідження механічних впливів на ГС;
- вибір оптимальних технологічних режимів операції ультразвукового (УЗ) зварювання багат шарових 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 MEMC-компонентів» (від 24.06.2016 р.) та авторським свідоцтвом № 67459 «Автоматизована система проектування гнучких комутаційних структур «Flexible PCB Designer» (від 26.08.2016 р.), копії яких наведено у додатку В [24-27].

Результати, отримані у 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 (КІТАМ) ХНУРЕ (акт від 13.02.2017 р.). Акти впровадження подано у додатку А.

Обґрунтованість і достовірність досліджень підтверджується зіставленням теоретичних і експериментальних результатів за розробленою методикою та порівнянням з аналогічними результатами інших авторів, контролем розрахунків, фізичною реальністю результатів, надійною роботою і високими параметрами виготовлених зразків ЕТ на гнучкій основі.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, наведені у дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно.

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 р., м. Черкаси); 19-му та 20-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіoeлектроніка 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). Перелік публікацій наведено у додатку Б.

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).

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ГС У СКЛАДІ ВИРОБІВ ЕТ

1.1 Аналіз тенденцій розвитку виробів ЕТ та особливостей застосування гнучких структур у їх складі

Мікромініатюризація апаратури залишається одним із головних напрямків розвитку ЕТ. Поряд зі зменшенням габаритів і маси електронних пристроїв вона вирішує задачі поліпшення електрофізичних характеристик, функціональних можливостей, точності, швидкодії, надійності, технологічних показників якості – зниження трудомісткості та вартості виготовлення, ресурсозбереження, збільшення обсягів випуску продукції тощо.

Важливу роль у створенні електронної техніки нових поколінь відіграють:

- нові радіoeлектронні матеріали з високими електрофізичними параметрами, якість і чистота всіх використовуваних у виробництві матеріалів;
- використання сучасної елементної бази на основі компонентів високого рівня інтеграції, функціональної електроніки;
- нові прецизійні та високопродуктивні ТП, що реалізуються в умовах вакуумної гігієни (вимог технологічного мікроклімату), і сучасне технологічне оснащення високого рівня автоматизації та інтелектуалізації;
- розширення сфери застосування нових принципів функціонування приладів, у тому числі спільного використання різних фізичних явищ у конкретних пристроях;
- використання нового принципу конструювання та виготовлення апаратури на основі гнучких структур, що забезпечують покращення експлуатаційних властивостей виробів електронної та мікросистемної техніки з розподіленою, зосередженою гнучкістю, конструкцій зі змінною формою [2-3].

Досягнення у галузі матеріалознавства забезпечують виробництво новими матеріалами підвищеної якості, із високим рівнем технологічності та стабільності електрофізичних характеристик, у тому числі матеріалами з інтелектуальними властивостями [28].

Сучасна елементна база включає компоненти високого рівня інтеграції (мікропроцесори та мікроконтролери, запам'ятовуючі пристрої, ПЛІС та ін.) з високою швидкодією, стійкістю до певного виду дестабілізуючих впливів, такими що здатні до заміни за умови виходу з ладу окремих ділянок схеми та придатні до різних умов експлуатації, пристрої функціональної електроніки (акусто-, опто-, магніто-, кріо-, термо-, хемо-, фотоніки).

Протягом останніх 25-30 років інтенсивно розвиваються пристрої та технології МСТ, в яких одночасно можуть використовуватися елементи різної фізичної природи: електронні, механічні, оптичні, акустичні, магнітні, газо-, рідинні та інші. Мікросистемні та нанотехнології у багатьох країнах світу вважаються проривними, такими, що визначають промисловий потенціал держав.

Розглядаючи різновид конструкцій і окремих структур, компонентів, в яких умови функціонування пов'язані з властивостями пружності, гнучкості компонентів, слід відзначити збільшення їх різноманітності та підвищення ролі у виробках ЕТ і МСТ, оскільки вони у багатьох випадках дозволяють об'єднати в одному пристрої елементи різної фізичної природи і реалізувати безскладальні процеси виготовлення.

Однією з основних тенденцій розвитку ЕТ є створення у всьому світі пристроїв, які отримали загальну назву «гнучка електроніка».

Такі пристрої зараз розробляються у багатьох науково-дослідних лабораторіях найбільших виробників ЕТ. Сфера майбутніх застосувань гнучкої електроніки є досить широкою й охоплює як побутову техніку, так і компоненти військової, бортової, космічної, медичної та промислової апаратури.

Таким чином, заміна жорстких компонентів апаратури на гнучкі з метою підвищення їх якості, функціональних можливостей, надійності та зменшення габаритно-масових характеристик (ГМХ), трудомісткості виготовлення,

вартості, а також розробка технологічної оснастки для виробництва ЕТ, що використовує особливості гнучких структур, є актуальними завданнями.

У компонентах гнучкої гібридної електроніки використовуються плівкові діелектричні матеріали, гнучкі електронні компоненти та рухомі конструкції пристроїв МСТ, гнучкі та гнучко-жорсткі багатошарові друковані плати та шлейфи, які об'єднані поняттям «гнучкі структури». У цьому застосуванні вони дозволяють вирішити питання більш щільного компонування вузлів апаратури, зниження ГМХ міжз'єднань [29-36].

На основі ГС створено також засоби технологічного оснащення ТП виготовлення та контролю компонентів мікро- і нанотехнологій. Таким чином, ГС відіграють значну роль як у výroбах ЕТ, так і у технологіях їх виробництва.

У пристроях електронної та мікросистемної техніки ГС виконують різноманітні функції, у тому числі забезпечення виробництва компонентів методами групової технології без використання складальних операцій (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Застосування ГС у výroбах ЕТ

Найбільш поширеними рухливими (гнучкими) елементами конструкцій є: мікробалки, мембрани, торсіони, гнучкі шлейфи, з'єднувачі, ємнісні перетворювачі.

Консольні балки можуть реалізовувати функції пружних підвісок, плоских і спіральних пружин, торсіонів, різних актюаторів, керованих контактних пар, реле, датчиків температури, у тому числі високих і інфрачервоного випромінювання, тиску, зокрема звукового, постійних, магнітних полів, резонансних систем, приводів мікродзеркал, консолей у прецизійних вимірювальних приладах, голок зондів тунельних скануючих мікроскопів, міліпеди, біметалевих, сильфонних пристроях, МЕМС мікрофонах-телефонах і багатьох інших [37].

Гнучкі плівкові резистори, індуктивності, ємності й імпедансні елементи використовуються як чутливі елементи різних типів датчиків. Малі розміри таких компонентів у поєднанні з мікроелектронною системою управління є основою низки інтелектуальних компонентів. Відзначимо частину з них:

- тензорезистори, п'єзорезистори з еластомерів, гігістори на поліімідній плівці;
- малоінерційні плівкові термопари, плівки полівініліденфториду з п'єзоелектричним ефектом;
- плівкові п'єзоелектричні датчики, які не мають власних резонансних частот, які використовуються для спектральної сейсмологічної розвідки;
- високочастотні механічні резонатори для різних діапазонів хвиль, фільтри;
- мікрофони-телефони для різних діапазонів частот від інфраних до гігагерцових;
- п'єзодвигуни штовхального типу;
- лінійні та кутові акселерометри, гіроскопи;
- мікроманіпулятори, актюатори, гіроскопи;
- кольорові світлофільтри з мільйонами елементів для КМОН- і ПЗЗ-матриць фотоапаратів, відеокамер, тепловізорів та ін.;

- плівкові елементи сонячних батарей з перовскіту є найбільш перспективними для сонячної енергетики;
- пристрої зчитування інформації з магнітних носіїв;
- гарнітури «hand-free» мобільних телефонів.

Гнучкі структури успішно використовуються як інструменти у різних ТП виробництва ЕТ та МСТ. Так, успіх технологій наноімпрінтингу забезпечений друком через повітряну прокладку. Забезпечення рівномірного тиску у багатозондових контактних системах досягається його передачею через повітряне або рідинне середовище.

Як уже зазначалося, в області розмірів, характерних для мікроелектромеханічних компонентів (від 1 мкм до 1 мм), гнучко-жорсткі структури дозволяють отримувати функціональні вузли з рухомими деталями без використання операцій складання, у вигляді єдиної деталі (структури).

Такий метод проектування та виготовлення є альтернативою звичайним методам забезпечення міцності конструкції з необхідним коефіцієнтом запасу по відношенню до максимальних значень сил, що діють на неї.

Міцність гнучкої конструкції забезпечується розподілом навантаження між різними ділянками за умови збільшення навантаження (аналогічно до дії луку для стрільби), що і виключає перевантаження окремих ділянок. Інший варіант забезпечення міцності – дві жорсткі деталі з'єднані гнучкою перемичкою, і вся ця конструкція являє одну деталь, під час подачі навантаження зігнутися може тільки гнучка ділянка, яка дозволяє жорстким частинам увійти у жорсткий контакт між собою або утворити з'єднання «вал-втулка» і зберегти необхідний контакт після зміни форми конструкції.

Зміна форми деталі (конфігурації) може забезпечити зміну властивостей пристрою. Наприклад, змінити аеро- або гідродинамічний опір руху, підйомну силу у відповідності до заздалегідь передбаченого режиму роботи. Прикладом є утворення зазору між жорстким диском і магнітною голівкою запису-зчитування.

Мікросистемна техніка дозволяє отримувати відомі раніше властивості іншими способами та з вигодою у габаритно-масових і електрофізичних характеристиках.

Наприклад, МЕМС-мікрофон і телефон мобільних пристроїв виготовлені на кремнієвій підкладці, де створена повітряна порожнина, яка вкрита полімерною плівкою з виділеними на ній квадратами $0,5 \times 0,5$ мм для відтворення високих звукових частот. Загальна площа мембрани добре відтворює низькі частоти. Виготовляється пристрій за КМОН-технологією.

ГС використовуються як у спеціальній ЕТ (акселерометри, гіроскопи, стабілізатори положення), так і в ЕТ широкого застосування (мобільні телефони, планшети, ноутбуки, навігатори, відеокамери, диктофони та ін.). Важливим є їх використання у медицині, починаючи з тонометрів, УЗ-досліджень різних органів і завершуючи дослідженнями мозку людини, зародження думки та дій під впливом отриманої інформації. Неінвазивні методи з використанням гнучкого інструментарію є перспективним напрямком розвитку діагностики у медицині.

Із використанням методу конвергенції на кафедрі КІТАМ ХНУРЕ, де проводились дослідження у рамках виконання дисертаційної роботи, розроблені багатозондові підмикальні пристрої для контролю електричних параметрів багатозондових друкованих плат, товстоплівкових і тонкоплівкових монтажних плат, електронних компонентів з матричними кульковими виводами, плоских мікроз'єднувачів з нульовою силою вставки (ZIF), принцип дії яких заснований на використанні гнучких полімерних підмикальних пластин [38].

Розробками ГС займається багато відомих зарубіжних фірм, університетів і вчених: С. Вогель, А. Мідха, А. Хоуелл, Свідхар Кота, фірми FlexSys, IBM, лабораторії університетів, де вважають ГС компонентами, що здатні замінити у значній частині звичні жорсткі конструкції, з огляду на цілий ряд переваг гнучких «пристроїв» живої природи [3].

Проблемам розробки, виготовлення, тестування й експлуатації ГС присвячено безліч робіт авторів з країн СНД, Європи та інших (Joseph Fjelstad,

Peter Macleod, O. I. Кіліна, А. М. Медведєва, Г. В. Милова, С. М. Семеніна, Yong-Jun Kim, Mark G. Allen, Nix WD, Netting Keith та ін.). У їхніх роботах розглянуті питання проектування та розробки технологій виробництва друкованих плат, шлейфів на плівковому носії, напівпровідникових датчиків тиску [1, 6, 11, 39-40]. У Харкові на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» під керівництвом В. М. Борщова розроблено технологію створення багатошарових комутаційних плат на основі полііміду [8, 20].

Однак при цьому варто відзначити відсутність загальної теорії проектування та технології виготовлення ГС.

1.2 Аналіз характеристик ГС та вимог до них

1.2.1 Аналіз особливостей використання ГС

На сучасному етапі розвитку радіoeлектронної промисловості, особливо мікроелектронної, із появою великих і надвеликих інтегральних схем (ІС) стало очевидним, що традиційні методи конструювання та монтажу друкованих вузлів ЕТ не можуть забезпечити виконання вимог, які висувають до них, тому були запропоновані нові методи так званого поверхневого монтажу (SMT, COB, TAB, COF-технології), коли електронні компоненти (ЕК) розташовуються не на штирьових виводах, встановлених у відповідних отворах у друкованій платі (ДП) або припаяних до відповідних пелюсток, а безпосередньо на контактних площинках на ДП, сформованих струмопровідними доріжками, або для монтажу використовуються спеціальні носії, виготовлені з гнучких матеріалів (поліімід, лавсан, поліефір) [3-6]. Це дозволило не тільки досягти у величезній мірі мініатюризації складених таким чином виробів, а й призвело до значного зниження їхніх маси та вартості, оскільки дані технології передбачають наявність повністю автоматизованого виробництва.

Розробка чергових поколінь елементної бази (інтегральна, потім функціональна мікроелектроніка), посилення вимог до електронних пристроїв,

вимагали розвитку техніки друкованого монтажу та призвели до створення багатошарових, гнучких і рельєфних друкованих плат.

Різноманіття сфер застосування електроніки зумовило спільне існування різних типів ДП [41].

Гнучкі друковані плати (ГДП) та гнучко-жорсткі плати (ГЖП) є відносно новими напрямками розвитку сучасних технологій. При цьому гнучкі шлейфи давно та досить широко використовуються для внутрішньо- і міжблочної комутації вузлів ЕТ.

ГДП виготовляються на еластичній основі товщиною 0,1 ... 0,2 мм. Різновидом ГДП є гнучкий друкований кабель (ГДК) або шлейф. Такі ГС знаходять широке застосування, якщо плати піддаються вібраціям, багаторазовим вигинам або коли їм необхідно надати вигнуту форму.

ГС є структурами з друкованими електронними схемами, що використовують гнучкий базовий матеріал та застосовуються для [42]:

- забезпечення динамічної гнучкості;
- зменшення розмірів конструкції;
- зменшення ваги (50-70 % під час заміни провідного монтажу, до 90 % під час заміни жорстких плат);
- збільшення ефективності складальних операцій;
- зменшення вартості складання (зменшення числа операцій);
- збільшення виходу придатних виробів ЕТ при їх складанні;
- підвищення надійності (через зменшення числа рівнів з'єднань);
- поліпшення розсіювання тепла;
- забезпечення високої електричної міцності;
- спрощення контролю (візуального й електричного);
- забезпечення широкого температурного діапазону (для полііміду від - 169 °С до + 200 °С), хімічної стійкості та високої радіаційної стійкості.

Більш детально властивості матеріалів для ГС описані у додатку Г.

Перевагами ГС також є:

- спрощення компонування та зменшення об'єму виробів ЕТ на 40...50 %;

- висока надійність, що забезпечується високими електроізоляційними характеристиками діелектричних основ ГС;

- поліпшені електричні характеристики (уніфіковані матеріали, хвильовий опір, зменшення індуктивності);

- висока механічна міцність;

- стійкість до вібрацій, ударів і лінійних прискорень;

- технологічність конструкції та економічність ТП виготовлення ГС; скорочення числа таких операцій, як вимірювання довжини, різання, зняття ізоляції, електричний контроль та ін.;

- можливість тривимірної конструкції упаковки; сумісність із поверхневим монтажем компонентів (сумісність за коефіцієнтом розширення);

- можливість скачувати ГДК у рулон і складати гармошкою, що підвищує ремонтпридатність виробів ЕТ за рахунок використання книжкових конструкцій і висувних блоків.

У порівнянні з жорсткими конструкціями у гнучких також є низка переваг:

- компактні розміри, які досягаються за рахунок більш тонкої діелектричної основи ДП;

- ергономічність, у залежності від ступеня жорсткості ГС їй можна надавати різних форм без втрати функціональних параметрів;

- зниження маси, що досягається також завдяки більш тонкій основі;

- зменшення часу та собівартості складання завдяки груповим методам складання та монтажу виробів.

Все це дозволило виробам ЕТ на основі ГС знайти широке застосування у різних сферах, зокрема, таких як [6, 8]:

- авіаційна та космічна апаратура (супутники, панелі, радарні системи, прилади нічного бачення);

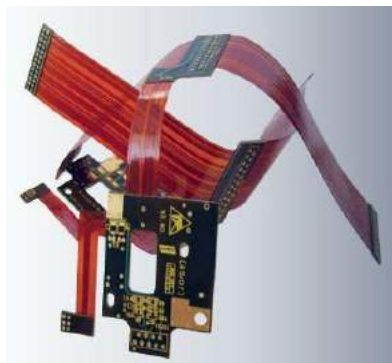
- промисловий контроль (комутуючі прилади, нагрівачі);

- автомобільна електроніка (панелі, системи контролю);

- побутова техніка (фотокамери, відеокамери, калькулятори тощо);

- медицина (слухові апарати, серцеві стимулятори);
- комп'ютери (друкуючі головки принтерів, управління дисками, кабелі);
- інструменти (рентгенівське обладнання, лічильники частинок).

На рис. 1.2 наведено приклади використання ГС у радіоелектронних модулях. На рис. 1.2 позначені: а – шестишарова гнучко-жорстка багат шарова плата для військових приладів спостереження; б – гнучко-жорстка багат шарова плата, що застосовується у військових радарх з індикаторами Е-типу, з двадцятьма сімома провідними шарами; в – 16-шарова материнська плата з послідовним з'єднанням РЕГАЛФЛЕКС для блоку електронного управління цивільними реактивними літаками.



а)



б)



в)

Рисунок 1.2 – Приклади конструкцій ЕТ на основі ГС

У функціональному відношенні ГДП використовують як:

- зовнішні та внутрішні міжз'єднання, наприклад, в блоках книжкової конструкції для з'єднання елементів між собою;
- спеціальні кабелі для регулювання опорів;
- деталі рухомої розводки (наприклад, у висувних блоках);
- основа мікробірок та ін.

Таким чином, ГС є одним з перспективних напрямків в області техніки монтажу компонентів ЕТ.

Конструктивно виконані за принципом організованих виводів ГС забезпечують посилення стійкості конструкцій виробів ЕТ до механічних

впливів, зменшення їх габаритів і ваги, можливість застосування автоматизованих процесів їх складання та монтажу, знижуючи тим самим трудомісткість ТП їх виробництва та підвищуючи якість ЕТ.

На цей час у технології ГС тенденції подальшого розвитку визначаються підвищенням вимог до щільності елементів і компонентів [38]. Багатошарові ГС містять не менше трьох провідних шарів, що з'єднані металізованими отворами, які забезпечують міжшарове з'єднання. У таких структурах простіше реалізовувати високу щільність монтажу, оскільки не потрібно забезпечувати великі значення співвідношень «висота / діаметр отвору». Прогнозується застосування таких ГС для складання на них багатокристальних ІС. Актуальним напрямком вдосконалення монтажних і складальних операцій під час виготовлення ГС є процеси ультразвукового зварювання для створення міжшарових переходів та монтажу ЕК на ГС.

Гнучко-жорсткі багатошарові схеми (ГЖБС) поєднують у собі всі переваги жорстких ДП і багатожильних кабелів. Крім того, технологія гнучких і гнучко-жорстких плат сприяє зменшенню кількості внутрішніх з'єднань у пристроях. Ця остання перевага вже продемонструвала збільшення надійності для багатьох пристроїв, застосовуваних у космосі, у медицині, у комп'ютерній, телевізійній та автомобільній техніці [43-44].

1.2.2 Аналіз умов експлуатації та впливів на ГС

За всіх численних переваг у процесі експлуатації ГС у складі виробів ЕТ піддаються великій кількості дестабілізуючих факторів, які можуть впливати на їх якість.

Можливі види впливів на ГС систематизовані у вигляді схеми, представленої на рис. 1.3. Зокрема, до них відносяться: механічні, хімічні, термічні, хвильові, електричні та кліматичні.

Класифікація ЕТ за умовами застосування та конструктивними ознаками (за стійкістю до широкого діапазону перепадів температур, до вібрації і т. д.), основні норми та вимоги для кожної класифікаційної групи за кліматичними

(температура, підвищена вологість і атмосферний тиск) і механічними впливами (синусоїдальна вібрація та механічні удари) наведена у табл. Д.1 (додаток Д).

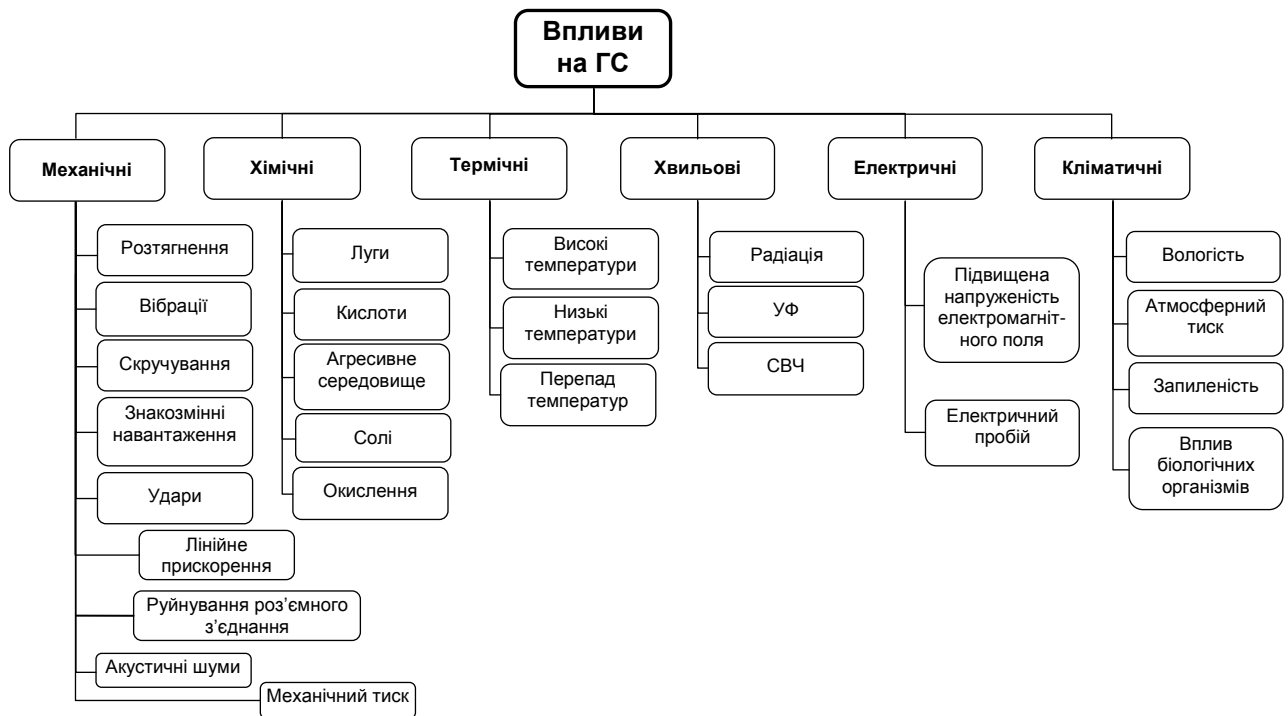


Рисунок 1.3 – Види впливів на ЕС

Розглянемо вплив цих факторів на кількох прикладах. У пристроях, до яких висувають високі вимоги, вібрація може порушувати цілісність з'єднань між жорсткими платами. Наприклад, коли пакет жорстких друкованих плат з'єднується за допомогою сукупності контактних штирів з пресовою посадкою, весь вузол під впливом вібраційних навантажень може повести себе як взаємопов'язана маса. Оскільки ці контактні штирі виконані з металу, вони мають більш високу питому щільність, ніж більшість матеріалів, з яких виготовлена схемна плата. У міру зростання кількості контактних штирів у збірному вузлі, зростає і маса. Внаслідок цього, через потенційну відсутність амортизації в зібраному вузлі, можуть послаблюватися з'єднання з пресовою посадкою або сама плата, в результаті чого з часом буде погіршуватися цілісність контактів.

Температура та вплив навколишнього середовища потенційно можуть тільки посилювати цей процес [45]. Якщо для зниження цього ефекту

використовуються гнучко-жорсткі багат шарові схемні блоки або навіть гнучкі з'єднання між жорсткими ДП, більш механічно еластичні і легкі матеріали у гнучких сполучних лініях гаситимуть будь-які викликані вібрацією навантаження та розбиватимуть загальну масу вузла на окремі пов'язані між собою маси, завдяки чому будуть зменшуватися сили, що діють на плати за вібраційних навантажень. Більш того, за використання такого підходу розривається частота форми коливань вузла, а це означає, що зібраний вузол стає менш сприйнятливим до викликаних вібрацією поломок у певному частотному діапазоні.

У випадку якщо частота форми коливань схеми знаходиться у діапазоні роботи кінцевого пристрою, напруження, що викликані вібрацією, можуть стати досить суттєвими та спричинити ранню відмову через поломки, якщо не буде проведено розривання з використанням технології гнучких або гнучко-жорстких елементів. Пристосованість гнучких і гнучко-жорстких схем до умов навколишнього середовища означає, що кількість взаємних з'єднань, що існує на жорстких друкованих платах, може бути зменшена, завдяки чому будуть зменшуватися ризики, викликані погіршенням характеристик внаслідок впливу таких факторів навколишнього середовища, як вологість і термічне окислення.

Кабелі або пласкі стрічкові кабелі зазвичай бувають більш важкими, товстими та жорсткими, ніж гнучкі схеми. Такі динамічні характеристики виявляються неможливими для жорстких плат через обмеження, що накладаються матеріалами. У першу чергу це пов'язано з високою жорсткістю матеріалів, що застосовуються для виготовлення жорстких ДП і включають скловолокно як елемент жорсткості. Для гнучких і гнучко-жорстких плат частини схем виконуються з неармованих діелектричних плівок. Ці плівки мають велику гнучкість і тому можуть слугувати опорою для металевих провідників за умов динамічного згинання для того, щоб не допустити локалізації напружень і передчасного втомного руйнування. У той же час, ці спеціально розроблені плівки є значно тоншими ніж еквівалентні шаруваті пластики, які армовані скловолокном, завдяки чому знижується напруження

згинання, яке виникає у схемі провідних шарів, що ще більше знижує ризик передчасного руйнування від втоми.

Сьогодні став можливим безпосередній монтаж компонентів на поверхні та в отворах гнучких ДП і ГЖБС, що дозволяє реалізувати велику кількість переваг у системах електронних приладів. Можуть застосовуватися технології ручного складання, встановлення ЕК у отвори або на поверхню, монтажу методом перевернутого кристала або безпосереднього монтажу.

Крім того, як уже зазначалося, для багат шарових гнучких ДП і ГЖБС слід враховувати взаємодію між матеріалами, конструкцією і технологією складання, щоб уникнути потенційно можливих проблем з різним ступенем розширення, гнучкістю шаруватого матеріалу, зміщенням матеріалу і вологістю.

Якість і надійність з'єднань пелюсткових виводів гнучкого носія із кристалом ІС багато в чому визначаються забезпеченням металургійної сумісності, високої електропровідності, механічної міцності та мінімізацією напружено-деформованого стану та правильним вибором конструктивно-технологічних параметрів зварних і паяних вузлів [46].

Важливе значення у забезпеченні надійності ЕТ на основі ГС набувають складально-монтажні процеси, включаючи мікромонтаж, зокрема за допомогою УЗ-зварювання [47].

Однією з серйозних проблем є забезпечення високої якості контактування ГС зі з'єднувачами для сполучення із жорсткими частинами вузлів ЕТ [48].

Отже, поряд із забезпеченням високих електричних і експлуатаційних характеристик, застосування ГС пов'язане з низкою особливостей і складнощів. Так, основним фактором під час експлуатації ГС у складі більшості виробів ЕТ є механічні дії на них (рис. 1.4).

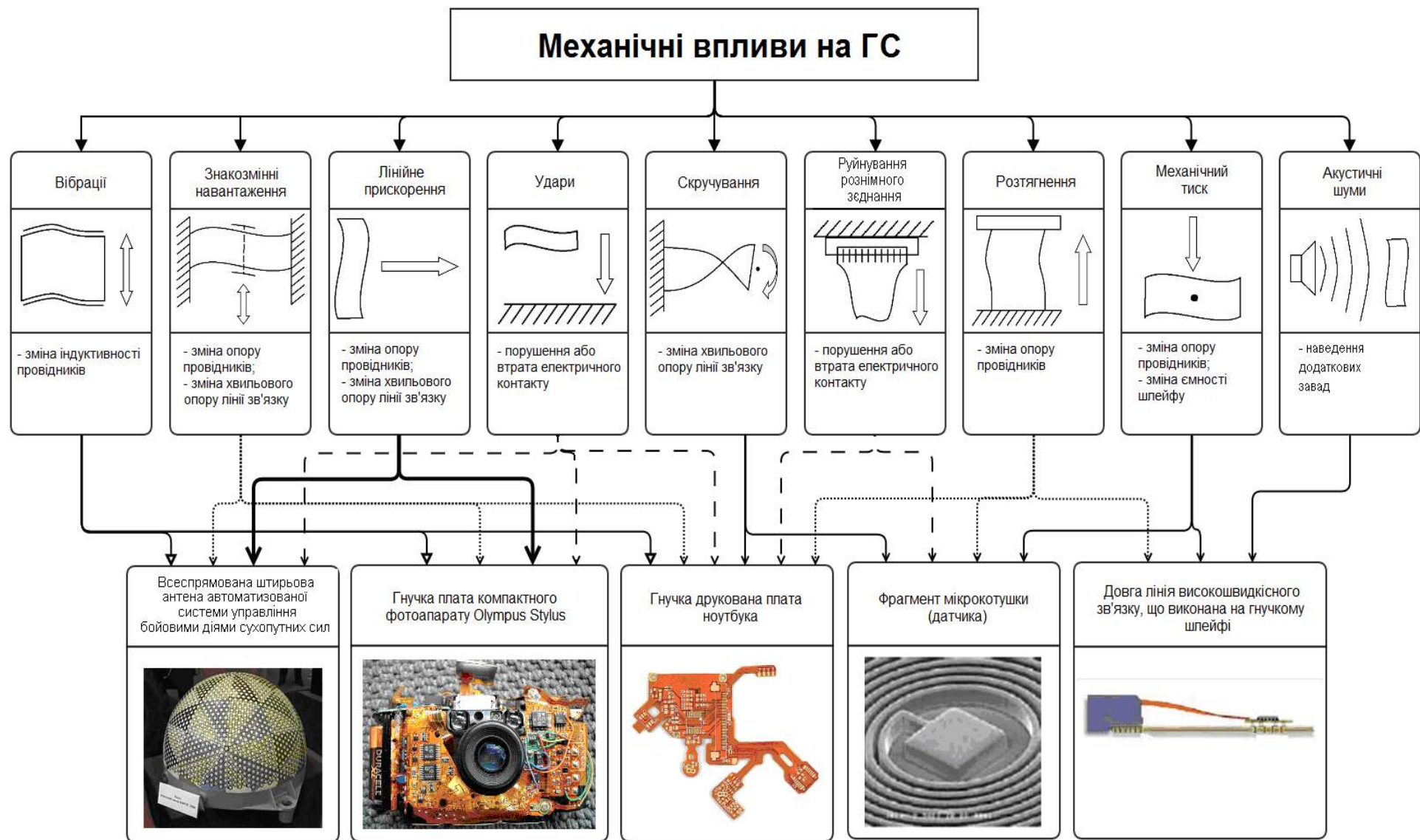


Рисунок 1.4 – Види механічних впливів на ГС у складі модулів ЕТ

ГС часто експлуатуються у динамічному режимі. Також вони можуть піддаватися таким діям, як: знакозмінні навантаження, вібрації, згинання та скручування, розтягування та ін. [49].

Вібрації можуть бути гармонійними, негармонійними, періодичними та випадковими.

Якщо зовнішній вплив є синусоїдальним, а розглянута лінійна система стійка, то після закінчення певного проміжку часу вільні коливання системи загасають і залишаються тільки вимушені коливання, параметри яких обчислити нескладно. Однак, якщо зовнішня сила є випадковою, то вільні коливання постійно поновлюються та рух системи стає складним комплексом вільних і вимушених коливань. Саме такі коливання блоків і елементів ЕТ мають місце на рухомих об'єктах, рухові установки або умови руху яких створюють випадкові механічні дії на вироби ЕТ і ГС у їх складі.

Ударні навантаження на вироби ЕТ можуть впливати не тільки під час їх експлуатації на рухомих об'єктах, але і у процесі транспортування та вантажно-розвантажувальних робіт.

Лінійні навантаження виникають за умови розгону та гальмування транспортних засобів, зміни напрямку руху.

Акустичні шуми виникають під час роботи потужних двигунів (особливо реактивних), а також через аеродинамічні ефекти, які виникають під час руху літаків або ракет у досить щільних шарах атмосфери.

Комплексні впливи – це комбінація з перших чотирьох вищеназваних. Це, наприклад, може бути одночасний вплив на апаратуру вібрацій і ударів, вібрацій і лінійних навантажень і т. д. Подібні дії найбільш часто зустрічаються у реальних умовах експлуатації, але саме їх найбільш важко відтворювати у лабораторних умовах під час випробувань апаратури.

Іноді для аналізу механічних процесів використовують математичні методи (метод скінченних різниць, метод скінченних елементів і ін.), аналогові та електромеханічні моделі [50-52].

Під час передачі вібрацій до конструкції апаратури їхня амплітуда може як послаблюватися, так і посилюватися.

За впливу на вироби ЕТ вібрацій, ударів, лінійних навантажень і акустичних шумів можливе виникнення порушень їх функціонування, які можна класифікувати як відновлювані чи невідновлювані.

Відновлювані відмови функціонування апаратури, до яких відносять спотворення або появу у корисному сигналі великого рівня шумів і паразитної модуляції корисного сигналу, що виникають через тензорезистивні ефекти, п'єзоелектричні та електромагнітні явища у компонентах ЕТ і ГС у їх складі, що мають здатність до прояву подібних ефектів за знакозмінних деформаційних навантажень.

До подібних елементів ЕТ можна віднести тонкоплівкові резистори на підкладках мікросхем, сегнетокерамічні конденсатори, напівпровідникові прилади та навіть звичайні провідники, що коливаються у магнітних полях, а також МЕМС-компоненти.

Невідновлювані відмови, до яких призводять різного роду обриви та поломки, остаточно виводять апаратуру з ладу, і її функціонування не може бути поновлено після припинення впливу вібрації. Прикладами такого роду відмов можуть бути, наприклад, розриви доріжок друкованого монтажу вібруючої плати, руйнування паяних, зварних і клеєних з'єднань, обриви виводів резисторів, конденсаторів, вихід з ладу МЕМС і т. д.

Різновиди механічних процесів, що виникають у елементах конструкцій виробів ЕТ за умови впливу вібрації, представлені на рис. 1.5.

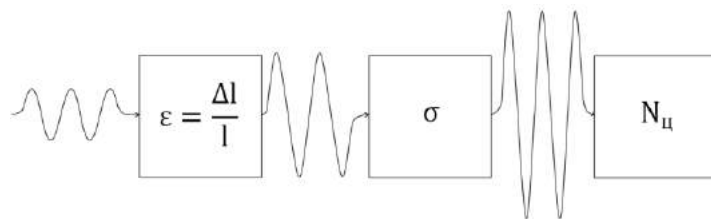


Рисунок 1.5 – Можливі види реакції конструктивного елементу виробу ЕТ на вібрацію

Під час впливу на конструктивний елемент апаратури вібрації малого рівня виникає його динамічна пружна деформація ε , яку можна оцінити відношенням величини подовження або укорочення елемента Δl до його вихідної довжини l .

За збільшення рівня вібраційного навантаження можлива поява у конструктивному елементі з металу пластичних деформацій, які призводять до виникнення залишкових механічних напружень σ .

За високих рівнів вібраційного навантаження можливе руйнування конструктивного елемента після деякої кількості циклів (N_u) зміни навантаження, зумовленого вібрацією. Визначення кількості циклів зміни навантаження до руйнування N_u проводиться для металів за лініями Веллера.

Крім механічної гілки реакції елементів виробів ЕТ на механічні дії існує й електрична гілка, обумовлена механічними процесами – деформацією та механічними напруженнями (рис. 1.6).

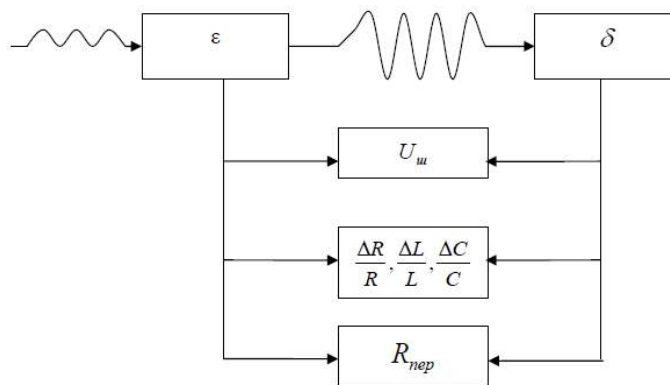


Рисунок 1.6 – Реакція активних і пасивних елементів виробів ЕТ на механічні дії

Ця гілка реакції визначає стійкість ЕТ до механічних впливів і повинна враховуватися під час проектування чутливої апаратури, за допомогою якої здійснюється перетворення сигналів малого рівня.

На рис. 1.6 використані такі позначення: $U_{ш}$ – напруга шумів; $\frac{\Delta R}{R}, \frac{\Delta L}{L}, \frac{\Delta C}{C}$ – зміна параметрів пасивних елементів ЕТ; $R_{пер}$ – нестабільність перехідних опорів.

Під стійкістю апаратури розуміють її нормальне функціонування за умов механічних впливів. Якщо модуль ЕТ не має достатньої стійкості, то в його вихідному сигналі можуть з'явитися складові, що не передбачені функціональним призначенням. Можлива поява і шумової напруги досить високого рівня. Найбільш типовими причинами порушення стійкості роботи ЕТ за механічних впливів є такі:

- зміна значення перехідного опору у контактних групах з'єднувачів, реле, герконів і т. д.;
- зміна параметрів пасивних елементів ЕТ (тонкоплівкових резисторів, котушок індуктивності, деяких типів конденсаторів);
- зміна параметрів активних елементів ЕТ – ІС, напівпровідникових приладів і компонентів МЕМС;
- поява шумових напруг у провідниках, що коливаються у магнітних полях;
- поява шумових напруг у кабелях за рахунок виникаючих електричних зарядів на високоякісних діелектриках, що деформуються під час механічних впливів.

Основні види відгуків елементів ЕТ на механічні дії і можливі захисні заходи представлені у табл. 1.1.

Провівши класифікацію дестабілізуючих чинників і аналіз їх впливу на вихідні параметри ЕТ, що містять ГС, можемо визначити набір і діапазон значень вхідних параметрів для проведення експериментальних досліджень. Список цих параметрів і їх значень наведено у табл. Д.2.

Таблиця 1.1 – Основні види реакції елементів ЕТ на механічні дії

Елементи ЕТ	Можливий механічний відгук	Можливий електричний відгук	Основні захисні заходи
Резистори і конденсатори: - дискретні; - плівкові; - змінні	- руйнування місць паяння, обриви виводів; - тріщини у плівці; - поворот осі ротора та зміщення пластин конденсатора змінної ємності; - поворот осі резистора	- розрив електричного кола; - тензоефект; - зміна значення ємності; - зміна значення опору	- виключення резонансних коливань; - розміщення елементів на ділянках підкладок із мінімальною деформацією; - додаткове кріплення компаундом
ДП, ІС	- обриви виводів, руйнування місць паяння; - деформація та розтріскування підкладок ІС	- п'єзоефект; - тензоефект	розміщення елементів на ділянках плат з мінімальною деформацією
Реле, з'єднувачі, перемикачі, геркони	взаємне переміщення контактних елементів	змінне значення перехідного опору	певна орієнтація контактних груп щодо вектора впливаючих вібрацій
Проводи та кабелі	- переміщення у просторі; - деформація та обриви, особливо у місцях паяння	віброшуми за рахунок електромагнітної індукції та кабельного ефекту	- в'язання у джгути; - додаткові точки кріплення; - використання антивібраційного кабелю

1.3 Аналіз особливостей проектування та технології виготовлення ГС у складі виробів ЕТ

Значний внесок у підвищення якості ГС у складі виробів ЕТ вносить правильний вибір топології друкованих провідників і матеріалу ГС [53].

Як зазначалося вище, застосування ГС дозволяє зменшити габарити і вагу виробів ЕТ; відмовитися від сполучних з'єднувачів; підвищити надійність з'єднань; спростити монтаж; забезпечити динамічну гнучкість з'єднань і спростити обслуговування під час експлуатації. Однак проектування гнучких багат шарових шлейфів пов'язане з низкою труднощів [54-56].

У зарубіжній практиці вже склалися правила спільної поетапної роботи конструктора і технолога:

- забезпечення технологічності – Design for Manufacturability;
- забезпечення збирання – Design for Assembly;
- забезпечення контролепридатності – Design for Testability;
- і нарешті, забезпечення надійності – Design for Reliability.

Вимоги до цих процесів взаємодії всіх служб підприємства під час проектування та виготовлення виробів ЕТ закладені у зарубіжних стандартах, зокрема, в IPC-A-620, ANS1 / J-STD-001, IPC-SM-785, IPC-D-279.

Щоб уникнути виникнення перехресних спотворень у ГС необхідно ретельно контролювати ширину провідників і зазори між ними. Рекомендується також заздалегідь оцінити значення паразитних параметрів, щоб передбачити ймовірність прояви пов'язаних з ними фізичних ефектів на високих частотах. Також необхідно враховувати діелектричні властивості багатошарового матеріалу ДП.

Під час проектування ГС необхідно враховувати також те, що збільшення кількості провідників може призвести до збільшення кількості шарів ГС і знизити її гнучкість. Також збільшення кількості шарів ГС призведе до значного зростання числа міжшарових з'єднань, що найчастіше виконуються за допомогою УЗ-зварювання. Це значно ускладнює технологію виготовлення ГС, а також збільшує час і вартість їх виробництва [57-62].

Також можна сформулювати такі рекомендації до проектування ГС. У процесі проектування ГС необхідно враховувати: можливість вигину багатошарової склеєної ГС у процесі експлуатації; особливості монтажу; можливий вплив вологи та температури. Важливо передбачити елементи посилення ГС (за необхідності), а також забезпечити надійність перехідних отворів.

Для максимального динамічного часу життя та максимальної надійності за статичної гнучкості під час проектування топології ГС повинні виконуватися наступні умови:

- перпендикулярність провідників до напрямку вигину;
- максимальна ширина провідників у області вигину;

- постійна ширина провідників;
- провідники у суміжних шарах повинні бути рознесені один відносно одного для зведення до мінімуму площі їх перекриття;
- кількість шарів у гнучкій частині має бути зведена до мінімуму;
- металізовані наскрізні отвори не допускаються.

1.4 Аналіз методів забезпечення якості ГС у виробках ЕТ

1.4.1 Показники якості виробів ЕТ на основі ГС

Під якістю виробів ЕТ розуміють сукупність властивостей, що обумовлюють здатність виробу задовольняти певні потреби відповідно до його призначення [63-64].

Кількісна характеристика одного або декількох властивостей, які обумовлюють якість модуля, називають показником його якості.

Систему показників якості виробів ЕТ загалом можна розділити на дві основні групи:

S_1 – технічні показники;

S_2 – економічні показники.

Множина технічних показників

$$S_1 = \{E, P\},$$

де E – показники якості, що характеризують процес експлуатації виробу;

P – підмножина виробничо-технологічних показників якості.

У свою чергу

$$\mathring{A} = \{P_{NAZ}, R, P_{ERG}, P_{EST}, P_{EC}, P_{PAT}\},$$

де P_{NAZ} – показники призначення;

R – показники надійності;

P_{ERG} – ергономічні показники;

P_{EST} – естетичні показники;

P_{EC} – екологічні показники;

P_{PAT} – патентно-правові показники.

Виробничо-технологічні показники якості описуються множиною

$$P = \{H, M, EN, A, T\},$$

де H – трудомісткість;

M – матеріаломісткість;

EN – енергоємність;

A – сукупність параметрів режимів виконання технологічних операцій;

T – технологічність.

Показники технологічності характеризують властивості продукції, що зумовлюють оптимальний розподіл витрат матеріалів, часу та засобів праці під час технічної підготовки виробництва, виготовлення та експлуатації виробів ЕТ на основі ГС. Це показники трудомісткості, матеріало- та фондомісткості, а також собівартості виробів.

Множина економічних показників

$$S_2 = \{K_p, K_e, S, C_o, C_r\},$$

де K_p – капіталовкладення у виготовлення виробу;

K_e – капіталовкладення в експлуатацію;

S – собівартість одиниці продукції;

C_o – відпускна ціна;

C_r – ринкова ціна.

Економічні показники характеризують витрати на розробку, виготовлення та експлуатацію виробів ЕТ на основі ГС.

Розглянемо більш детально експлуатаційні показники якості. Показники призначення характеризують ступінь відповідності об'єкта цільовому призначенню, конструктивному виконанню, стійкості до зовнішніх впливів і для ГС у складі ЕТ можуть бути представлені у вигляді:

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

де r – радіус вигину ГС;

N – кількість циклів до деформації ГС;

R_c – перехідний опір в роз'ємному з'єднанні ГС з ZIF-конектором;

P_c – зусилля притиснення ГС до виводів роз'єму;

Y – міцність нероз'ємних з'єднань в ГС.

1.4.2 Показники надійності виробів ЕТ на основі ГС

Показники надійності входять до числа найважливіших показників якості об'єкта, особливо якщо останній працює у динамічному режимі (наприклад, для ЕТ, що використовуються у транспортних засобах, бортовій апаратурі і т. д.).

Система показників надійності може бути подана у вигляді:

$$R = \{F, LQ, MA, KQ\},$$

де F – безвідмовність;

LQ – довговічність;

MA – ремонтпридатність;

KQ – збереженість.

1.4.3 Методи забезпечення якості виробів ЕТ на основі ГС

Управління якістю продукції охоплює весь життєвий цикл виробу, системно забезпечуючи стратегічні та оперативні процеси підвищення якості продукції.

Механізм управління якістю повинен забезпечувати ефективну реалізацію основних функцій управління якістю, до числа яких належать, перш за все, такі як:

- прогнозування потреб ринку, технічного рівня та якості продукції;
- планування підвищення якості продукції;
- нормування вимог до якості продукції та стандартизація;
- розробка та постановка продукції на виробництво;
- технологічна підготовка виробництва;
- забезпечення стабільності запланованого рівня якості продукції на всіх стадіях її життєвого циклу;
- контроль якості та випробування продукції;
- профілактика браку у виробництві;
- техніко-економічний аналіз зміни якості продукції;
- інформаційне забезпечення управління якістю продукції;
- матеріально-технічне забезпечення якості продукції;
- організаційне забезпечення управління якістю продукції;
- технологічне забезпечення управління якістю продукції та ін.

Наведені функції, що відносяться до управління різними технологічними факторами, необхідно буде взяти до уваги під час виконання подальших дисертаційних досліджень.

Зокрема, систему забезпечення безвідмовності можна представити у вигляді

$$S_{OB} = f(P_r, R_p, D_E, I_S, MT_S, T_S),$$

де P_r – підсистема прогнозування і планування технічного рівня та якості;

R_p – підсистема регулювання якості продукції у виробництві;

D_E – підсистема профілактики браку у виробництві;

I_s – підсистема інформаційного забезпечення;

MT_s – підсистема матеріально-технічного забезпечення;

T_s – підсистема технологічного забезпечення.

Підвищення якості продукції вимагає застосування нових технологій виробництва, починаючи з автоматизації проектування та закінчуючи автоматизованими вимірюваннями у процесі контролю якості.

1.5 Висновки та постановка задачі досліджень

Таким чином, з огляду на результати аналізу предметної області, можна зробити висновок про те, що застосування ГС у складі виробів ЕТ дозволить істотно підвищити їх якість.

При цьому мають місце певні проблеми з технологічного забезпечення якості ГС.

Актуальною є задача прогнозування фізико-технологічних параметрів ГС під час їх проектування за рахунок аналізу режимів експлуатації ГС, параметрів ТП їх виготовлення, а також вихідних параметрів виробів ЕТ на їх основі.

Особливу увагу варто приділити питанням забезпечення динамічної гнучкості ГС та заходам із захисту їх від механічних впливів.

Необхідно провести моделювання та експериментальні дослідження ГС у складі виробів ЕТ, проаналізувати технологію виконання нерознімних та рознімних з'єднань у ГС, а також розробити технологію виготовлення ГС на основі полііміду.

Зокрема, під час розробки та оптимізації ТП складання вузла ЕТ на основі ГС технічно доцільним є аналіз технологічних факторів, що визначають кінетику процесу формування монтажних з'єднань у ГС для

визначення оптимальних режимів монтажу. Крім того, необхідно проаналізувати вплив конструктивних і технологічних факторів на напружено-деформований стан елементів мікроз'єднань, виконаних за допомогою УЗ-зварювання.

Значний інтерес представляє розробка моделі руйнування ГС, а також дослідження напружено-деформованого стану ГС у складі виробів ЕТ на етапі їх експлуатації.

Критерії якості ГС і виробів ЕТ на їх основі можуть відрізнятися у залежності від призначення та конструктивно-технологічних особливостей того чи іншого об'єкта дослідження. Але як критерії якості ТП виготовлення ГС можна прийняти оптимальні режими виконання технологічних операцій, а за показники призначення ГС – радіус вигину та кількість циклів до деформації ГС; перехідний опір у контактній парі «виводи ГС-контакти з'єднувача», а також зусилля притиснення ГС до виводів з'єднувача та міцність нерознімних з'єднань у ГС, виконаних методом УЗ-зварювання.

У першому розділі використано інформацію з джерел [1-6, 8, 11, 28-64].

2 ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ГС У ВИРОБАХ ЕТ

2.1 Прогнозування параметрів ГС у виробках ЕТ у рамках вирішення завдання забезпечення їх якості

Однією з важливих задач забезпечення необхідних показників якості технічної продукції є завдання прогнозування її параметрів [65].

Прогнозування у загальному випадку являє собою дослідний процес, у результаті якого можуть бути отримані дані про майбутній стан системи на основі аналізу тенденцій її розвитку та з урахуванням багатьох факторів, що впливають на систему.

Суть прогнозування полягає в обробці наявних даних про характеристики прогнозованого процесу (у нашому випадку цими характеристиками виступатимуть параметри ГС у виробках ЕТ). У процесі такої обробки можуть бути отримані залежності, що встановлюють взаємозв'язок цих характеристик. Далі за допомогою знайдених залежностей обчислюються значення параметрів досліджуваного процесу на прогнозований період. При цьому передбачається, що досліджуваний процес на ділянці прогнозування має ті ж тенденції, що і на ділянці спостереження.

Існує два основні підходи до прогнозування параметрів виробів ЕТ. Один з них заснований на детальному математичному описі фізики процесів, що протікають у модулі ЕТ за умови впливу різних факторів і зовнішніх впливів. Такий підхід є досить трудомістким і, тим не менше, все ж може не враховувати окремих характеристик виробу.

Наприклад, існуючі способи визначення напружено-деформованого стану у виробках ЕТ, які засновані на використанні контактних методів і різного типу перетворювачів (тензометричних, реохордних, індуктивних, механічних тощо), а також безконтактних методів (поляризаційно-оптичного,

інтерференційного та ін.), не враховують впливу анізотропії, зміни властивостей і структури матеріалів у процесі навантаження, є дуже трудомісткими через необхідність встановлення та закріплення перетворювачів, нанесення покриттів на непрозорі в оптичному діапазоні довжин хвиль вироби.

Другий підхід заснований на розробці аналітичних моделей, що дозволяють оцінити теоретично значення найбільш важливих параметрів для досягнення тієї чи іншої мети дослідження модуля ЕТ.

Метод, заснований на моделюванні параметрів ГС, може включати в себе програми з оцінки якості останніх у складі виробів ЕТ, а також моделі їх функціонування з урахуванням дестабілізуючих факторів. При цьому можливий приближений розрахунок без урахування умов експлуатації.

Методи прогнозування можна поділити на три види:

- статистичні (описові);
- причинно-наслідкові;
- комбіновані.

Статистичні методи не розкривають внутрішніх зв'язків у системі та вплив зовнішнього середовища і, по суті, екстраполюють детермінований або стохастичний процес за підбіраною математичною моделлю.

Причинно-наслідкові моделі прогнозу враховують вплив навколишнього середовища та дозволяють виділити причини змін у системі. Прогноз, отриманий за такою моделлю, пояснює майбутнє системи.

Для нашої задачі будемо застосовувати моделі третього виду прогнозування, тобто комбіновані.

При цьому можна виділити два види прогнозованих характеристик системи, що залежать від часу: змінні стану та змінні інтенсивності.

Змінна стану визначається періодично, її значення протягом невеликого інтервалу часу не залежить від часу, що пройшов від початку спостереження. Змінна інтенсивності також визначається періодично, але її значення є пропорційним до часу, який пройшов з моменту попереднього

спостереження. Такі характеристики системи, як температура, швидкість, амплітуда коливань ГС є прикладами змінних стану. У той час як змінна стану характеризує кількість, змінна інтенсивності відображає швидкість її зміни.

Процеси прогнозування змінних стану і інтенсивності відрізняються один від одного такими особливостями:

- якщо вимірювання характеристик системи проводяться через рівні інтервали часу, то величину інтервалу необхідно враховувати під час оцінки змінних інтенсивності, у той час як під час оцінки змінних стану ця величина не має значення;

- оскільки прогнози зазвичай здійснюються для декількох послідовних інтервалів часу у межах деякого часу випередження, після закінчення якого стають важливими результати реалізації прийнятих рішень, то правильний прогноз змінної стану повинен визначати її значення наприкінці часу випередження, а прогноз змінної інтенсивності має являти собою суму прогнозів протягом часу випередження;

- функція розподілу в часі ймовірностей помилок прогнозу для змінної стану має відповідати функції розподілу ймовірностей помилок у вихідних даних, тоді як для змінної інтенсивності закон розподілу ймовірностей помилок прогнозу у часі наближається до нормального за будь-якого закону розподілу ймовірностей помилок у вихідних даних, оскільки ці помилки являють собою суму помилок прогнозу в окремі інтервали часу.

2.2 Розробка та обґрунтування моделей дестабілізуючих факторів

Вирішення задач із застосуванням теорії планування експериментів (ТПЕ) передбачає використання апріорної інформації про досліджуваний процес для вибору загальної послідовності управління експериментами, яка уточнюється після чергового етапу проведення досліджень на основі знову отриманих відомостей. Тим самим досягається можливість раціонального

управління експериментами за неповного початкового знання характеристик досліджуваного об'єкта. Доцільність застосування ТПЕ є тим вищою, чим складнішою є досліджувана система.

У ТПЕ досліджуваний об'єкт (реальний об'єкт, модель об'єкта) розглядається як «чорна скринька», яка має входи v (керовані незалежні параметри) і виходи y .

Область планування задається інтервалами можливої зміни факторів $v_{i \min} < v_i < v_{i \max}$ для $i = 1, 2, \dots, k$, де k – кількість факторів. У ТПЕ часто використовують нормалізацію факторів, тобто перетворення натуральних значень факторів у безрозмірні (кодовані) величини. Перехід до безрозмірних значень x_i задається перетворенням

$$x_i = (v_i - v_{i0}) / \Delta v_i, \quad (2.1)$$

де v_i – натуральне значення фактора;

v_{i0} – натуральне значення основного рівня фактора, який відповідає нулю за безрозмірною шкалою;

Δv_i – інтервал варіювання.

Активний експеримент включає: систему впливів, за яких відтворюється функціонування об'єкта, реєстрацію відгуку об'єкта.

На рис. 2.1 наведено модель проведення досліджень ГС у складі виробів ЕТ. План експерименту задає сукупність даних, що визначають кількість, умови та порядок реалізації дослідів. Дослід становить елементарну частину експерименту та передбачає відтворення досліджуваного явища у конкретних умовах з подальшою реєстрацією результату. В умовах випадковості за одних і тих же обставин проводяться паралельні (повторні) досліді в інтересах отримання статистично стійких результатів.

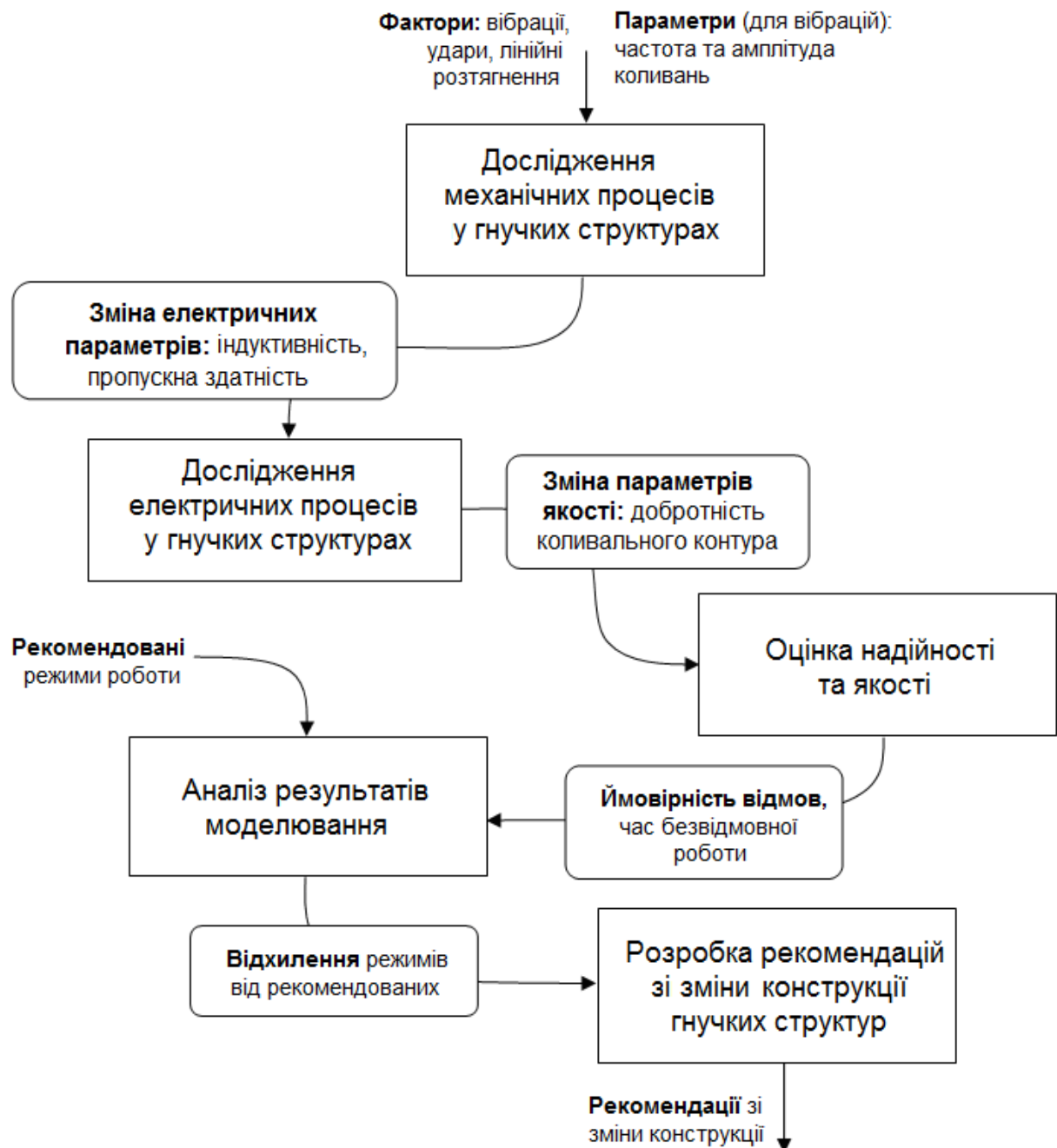


Рисунок 2.1 – Модель проведення досліджень ГС

Як видно з рис. 2.1, план проведення експерименту включає в себе:

- дослідження механічних процесів у ГС;
- дослідження електричних процесів у ГС;
- моделювання надійності та якості;
- аналіз результатів моделювання.

За результатами даного експерименту формуються рекомендації щодо

зміни конструкції ГС.

Дослідження механічних процесів у ГС виконується на основі вхідних змінних факторів: вібрацій, ударів, лінійних розтягнень. У процесі дослідження вони будуть набувати різних значень у заданому діапазоні.

Застосувавши апарат системного аналізу, представмо сукупність різномірних фізичних процесів у ГС системою рівнянь:

$$W\{X(\psi), Y(\psi), B(Z)\} = 0, \quad (2.2)$$

де W – оператори моделей, що пов'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).

Запишемо вираз (2.2) для моделі механічних процесів у ГС (2.3), моделі електричних процесів (2.4), моделі електромагнітних процесів (2.5):

$$W_1\{\alpha_{in}(\psi), [\alpha_e(\psi), \tau_p], [B_e(\psi), B_k]\} = 0, \quad (2.3)$$

$$W_2\{[L_{in}(\psi), R_{in}(\psi)], [Q_{out}(\psi), K_{out}(\psi)], [B_k]\} = 0, \quad (2.4)$$

$$W_3\{[Y_e(\psi), I_n(\psi), U_n(\psi), E_n(\psi)], [I_n(\psi), U_n(\psi), E_n(\psi)], [B_{em}(B_n(\psi)), B_k]\} = 0, \quad (2.5)$$

тут: $\alpha_{in}(\psi)$ – множина вібрацій (гармонійних і випадкових), ударів, лінійного прискорення, які впливають на досліджуваний об'єкт; $\alpha_e(\psi)$ – множина прискорень ЕК; τ_p – множина значень часу до руйнування виводів ЕК; $B_e(\psi)$ – множина внутрішніх електричних параметрів, що характеризують певний фізичний процес; B_k – множина геометричних параметрів ГС; $L_{in}(\psi)$ – множина вхідних індуктивностей; $R_{in}(\psi)$ – множина вхідних опорів для моделі електричних процесів у ГС; $Q_{out}(\psi)$ – множина вихідних добротностей коливального контуру на гнучкій основі;

$K_{out}(\psi)$ – множина вихідних коефіцієнтів, які характеризують пропускну здатність фільтра на основі ГС; $Y_e(\psi)$ – множина електричних характеристик встановлюваних на ГС електронних компонентів; $I_n(\psi), U_n(\psi), E_n(\psi)$ – множина струмів, напруг і напруженостей електромагнітних завад; $I_n(\psi), U_n(\psi)$ – множина струмів і напруг, наведених завадами в електричних ланцюгах; $E_n(\psi)$ – множина напруженостей електромагнітних полів, випромінюваних ЕТ на основі ГС; B_{em} – множина внутрішніх модельних електромагнітних випромінювань; B_n – множина внутрішніх модельних завад, що викликані електромагнітним випромінюванням.

Також до структуру комплексної моделі ЕТ на основі ГС введемо підмодель надійності та якості

$$W_{нк} \{ [X_{нк}(\psi), Y_{нк}(\psi), B_{нк}((Y_e(\psi), Y_m(\psi), \alpha_e(\psi), F_{техн}, F_m))] \} = 0, \quad (2.6)$$

де $X_{нк}(\psi)$ – вхідні показники надійності та якості;

$Y_{нк}(\psi)$ – вхідні значення надійності та якості;

$B_{нк}$ – внутрішні модельні параметри, що залежать від: $Y_e(\psi)$ – множини електричних характеристик ЕК; $Y_m(\psi)$ – множини теплових характеристик ЕК; $\alpha_e(\psi)$ – множина прискорень ЕК; $F_{техн}$ – технологічних факторів; F_m – часових факторів.

Структурна схема комплексної моделі ЕТ на основі ГС з урахуванням дестабілізуючих факторів наведено на рис. 2.2 [66].

Показники надійності пристрою обираються на етапі складання технічного завдання, при цьому встановлюється основний показник надійності, який найбільш повно характеризує всю систему (ймовірність безвідмовної роботи, напрацювання до відмови, середнє напрацювання на відмову тощо).

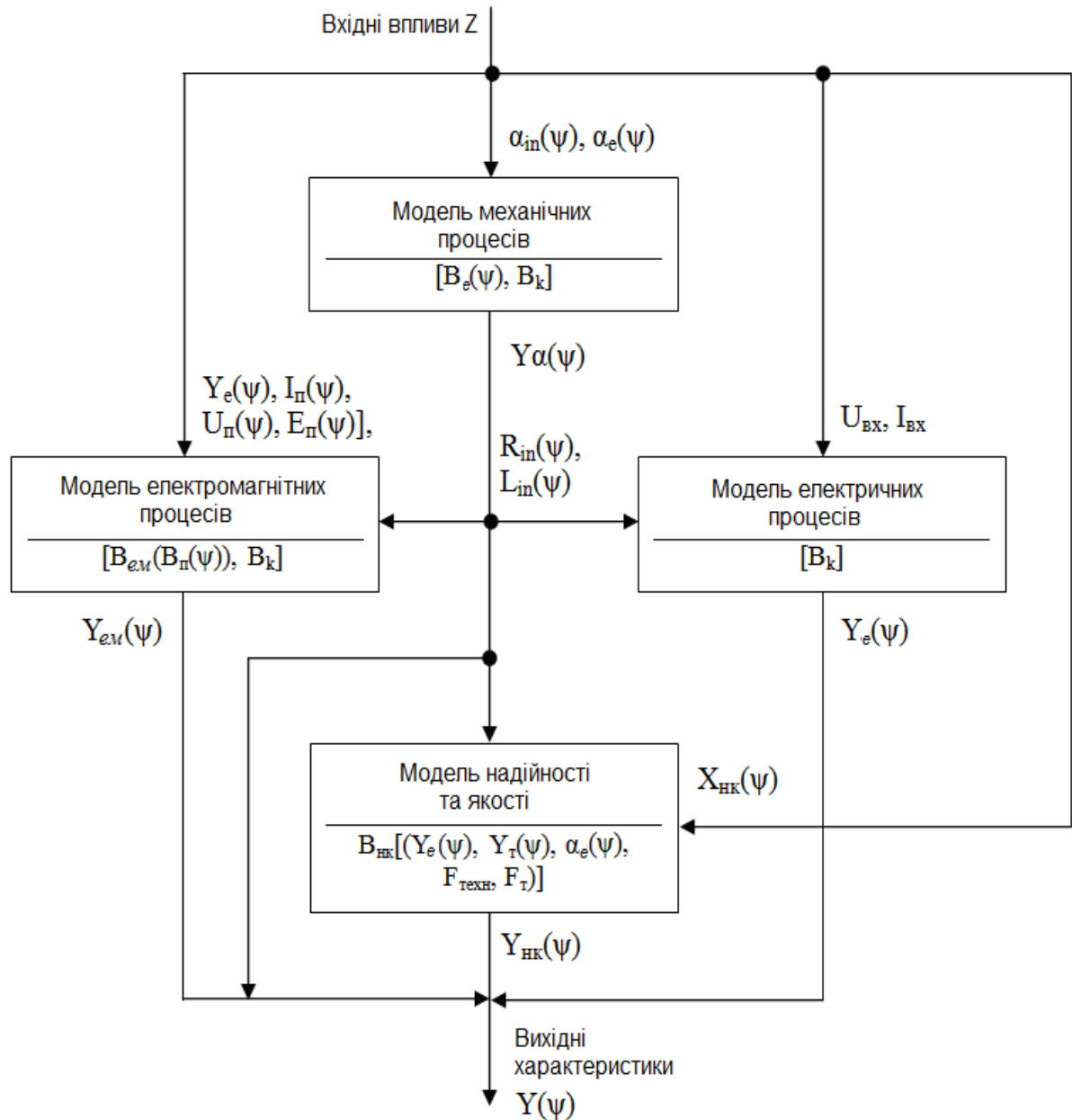


Рисунок 2.2 – Структурна схема комплексної моделі ЕТ на основі ГС з урахуванням дестабілізуючих факторів

Залежно від основного показника надійності визначаються вхідні та вихідні параметри підмоделі.

Внутрішні модельні характеристики залежать від режимів роботи виробу, отриманих у результаті моделювання різних фізичних процесів, технологічних чинників (розкид параметрів під час виготовлення) $F_{техн}$, часового фактора (поступова зміна параметрів через старіння і зношення) F_m .

Таким чином, вихідний параметр $Y(\psi)$ з урахуванням дестабілізуючих чинників матиме вигляд:

$$Y(\psi) = \{Y_e(\psi), Y_{em}(\psi), Y_\alpha(\psi), Y_{nk}(\psi)\}, \quad (2.7)$$

де $Y_e(\psi)$ – вихідний параметр моделі електричних процесів;

$Y_{em}(\psi)$ – вихідний параметр моделі електромагнітних процесів;

$Y_\alpha(\psi)$ – вихідний параметр моделі механічних процесів;

$Y_{nk}(\psi)$ – вихідний параметр моделі надійності і якості.

Для проведення експериментальних досліджень необхідно визначити набір вхідних параметрів для кожної з моделей.

2.3 Розробка фізико-технологічної моделі для відображення зміни параметрів ГС у виробках ЕТ

Системний підхід у проектуванні ЕТ призводить до комплексності вирішення завдання забезпечення якості на різних рівнях.

Для вирішення такого завдання доцільно використовувати системологічний аналіз, математичний апарат якого дозволить відображати зміну окремих, найбільш важливих, параметрів ГС із часом і прогнозувати наступні значення цих параметрів [67].

Системологія займається актуальними проблемами пошуку математичних методів вирішення міждисциплінарних завдань і має досить гнучкий апарат, що дозволяє описувати широкий спектр систем і системних задач [68-71].

Множина змінних зазвичай підрозділяється на дві підмножини, що мають назву основних змінних і параметрів.

Сукупність станів усіх параметричних змінних утворює параметричну множину (ПМ), у якій спостерігається зміна у станах окремих основних змінних.

Змінною називається операційне уявлення властивості, тобто образ властивості, яка визначається конкретною процедурою вимірювання або спостереження. Кожна змінна має певне ім'я (мітку), що відрізняє її від інших досліджуваних змінних, і пов'язується із певною множиною величин, через які вона себе проявляє. Ці величини звичайно називають станами (або значеннями) змінної, а всю множину – множиною станів.

Кожен параметр також має унікальне ім'я, і з ним пов'язується якась множина – параметрична, елементи якої – це значення параметра. Передбачається, що різні спостереження однієї і тієї ж змінної розрізняються за значеннями параметрів.

Якщо використовуються два та більше параметрів, то їх загальною ПМ є декартовий добуток окремих параметричних множин. Необхідно, щоб кожне конкретне значення параметра (із загальної ПМ) ідентифікувало одне і тільки одне спостереження відповідних змінних.

На окремих множинах станів або ПМ можуть бути визначені деякі математичні відношення, наприклад, відношення порядку або відстань. Вони відображають фундаментальні характеристики властивостей тією мірою, у якій вони властиві відповідним вимірювальним процедурам.

Найчастіше параметрами виступають час, простір і різні сукупності об'єктів одного типу. Для досліджуваних виробів ЕТ на основі ГС як параметр обираємо час.

Основні змінні можуть бути розділені на вхідні та вихідні. За такого поділу стани вхідних змінних розглядаються як умови, що впливають на вихідні змінні.

Системи, у яких змінні розділені на вхідні та вихідні, як у нашому випадку, називають спрямованими.

Після того як вихідна система буде доповнена даними, тобто дійсними станами основних змінних за певного набору параметрів, отримуємо систему даних.

Традиційне використання моделювання передбачає, що система, яка

відтворює відповідні властивості об'єкта дослідження, моделюється на комп'ютері для породження сценаріїв за різних припущень щодо середовища системи, а також за різних параметрів самої системи.

Сучасна системологія пропонує засоби опису, які будуть придатні для передачі як людині, так і автомату (комп'ютеру). Таким найбільш поширеним засобом є «таблична мова» – рис. 2.3 [70].

Згідно [70-71] під час аналізу параметрів виробів ЕТ на основі ГС ми маємо спрямовану систему даних, змінні у якій розділені на вхідні та вихідні. При цьому, як уже зазначалося, стани вхідних змінних розглядаються як умови, що впливають на вихідні параметри.

У цій вихідній системі з даними, у залежності від завдання, дані можуть бути отримані зі спостережень, або за допомогою вимірювань (для задач моделювання системи), або визначені як бажані стани (у завданні проектування).

На певному етапі аналізу системи даних можна виділити такі епістемологічні рівні системи, які будуть містити знання про деякі характеристики, що є інваріантними параметрам відношень розглянутих змінних, за допомогою яких можна генерувати дані про відповідні початкові або граничні умови. Дані, що генеруються, можуть бути точними (детермінованими) або приблизними (стохастичними, нечіткими). Слід пам'ятати, що у задачі прогнозування проектувальник ЕТ має справу з так званою нечіткістю даних, тобто варто аналізувати нечіткі змінні.

Використовуючи відповідне правило перетворення та переходячи до поняття породжувальної системи, можна використовувати для «передбачення дії» або, іншими словами, прогнозування змінних системи, математичний апарат системології [67]. У нашому випадку цими змінними виступатимуть параметри виробів ГС у складі виробів ЕТ.

Правило перетворення зазвичай являє собою взаємно однозначну функцію, яка присвоює кожному елементу множини параметрів інший (єдиний) елемент тієї ж множини.

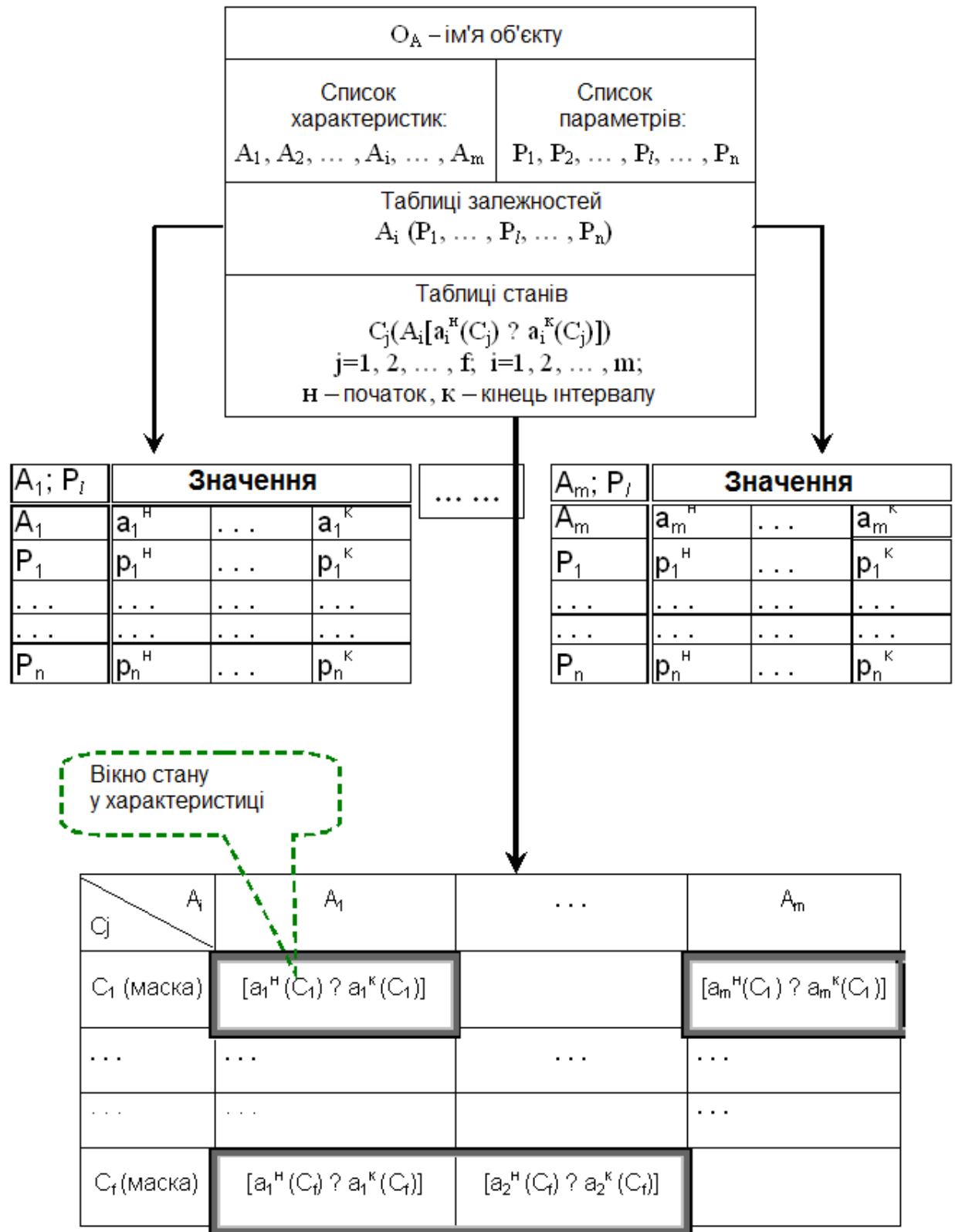


Рисунок 2.3 – Табличний опис об'єкту O_A , що має m характеристик і f станів, заданих на n параметрах, маска стану – рядок C , вікно стану у характеристиці – елемент рядка C

Таким чином, завдяки візуалізації процесу зміни параметрів ГС у складі виробів ЕТ, з використанням табличного відображення змінних у системі даних, можна простежити динаміку варіювання змінних у часі, зробити оцінку стабільності параметрів системи та характеру впливу на них, а також спрогнозувати відмови виробів ЕТ на основі ГС, визначивши граничні значення параметрів. Також дані моделі можуть бути використані для відображення параметрів ТП виготовлення ГС, наприклад, операції УЗ-зварювання.

Важливим завданням під час побудови подібної моделі є вибір даних для стовпців таблиці масиву даних, які дозволили б згодом простежити розвиток системи.

Першим етапом будь-якого емпіричного дослідження є визначення вихідної системи на відповідному об'єкті. Основною проблемою цього етапу дослідження явища є вибір зазвичай з багатьох можливостей вихідної системи, які найкращим чином відповідають меті дослідження та задовольняють наявним обмеженням.

Формально система досліджуваного об'єкта – це

$$O = (\{(a_i, A_i) / i \in N_n\}, \{b_j / j \in N_m\}),$$

де $N_n = \{1, 2, \dots, n\}$, а $N_m = \{1, 2, \dots, m\}$ (буквою N з позитивним цілим індексом позначається множина значень цілих позитивних чисел від 1 до значення цього індексу);

через a_i і A_i позначені відповідно властивість і множина її проявів;

b_j і B_j – база та множина її елементів;

O – система об'єкта.

Для побудови моделі прогнозування параметрів ГС у складі виробів ЕТ необхідно застосувати до об'єкта поняття дискретних змінних і параметрів. Оскільки множина станів будь-якої неперервної змінної або ПМ будь-якого

параметра є нескінченною, то змінні та параметри, які задані на кінцевих множинах, є альтернативою безперервним змінним і параметрам.

Також робота з безперервними змінними та параметрами має багато математичних складнощів і обмежень. Створені людиною дискретні системи можуть бути спроектовані так, щоб вони мали властивості самокорекції, що є неможливим для безперервних систем.

Під час аналізу параметрів ГС у складі виробів ЕТ додаткові змінні визначаються на ПМ за допомогою так званих правил зсуву (ПЗ).

Для заданої узагальненої представляючої системи діапазон можливих типів параметрично інваріантних обмежень залежать від властивостей, що приписувані ПМ. Якщо ПМ є впорядкованою, стан змінних може обмежуватися не тільки іншими станами, а й станами обраної суміжності для кожного конкретного значення параметра. Оскільки суміжність є основою для подання параметричного інваріантного обмеження, вона сама має бути параметрично інваріантною.

Суміжність на упорядкованій ПМ зазвичай називається маскою та визначається через змінні, ПМ і набір ПЗ на ньому. Правило зсуву m_i – це однозначна функція, яка ставить кожному елементу E у відповідність інший (причому єдиний) елемент E

$$m_i : E \rightarrow E .$$

Якщо, наприклад, ПМ упорядкована повністю (як у нашому випадку, коли під час дослідження ГС у виробі ЕТ як параметр розглядається час) і являє собою множину послідовних цілих позитивних чисел, то будь-яке ПЗ може бути задано рівнянням

$$m_i(t) = t + d, \tag{2.8}$$

де d – ціла константа (позитивна, негативна або нуль).

Нехай задана узагальнена представляюча система H через V позначимо множину змінних з H , а через M – набір ПЗ, що розглядаються для цих змінних. Тоді множина змінних

$$B = \{b_1, b_2, \dots\},$$

що мають назву вибірових змінних, може бути введена за допомогою рівнянь

$$b_{g,t} = v_{j,m_i(t)} \quad (2.9)$$

для деяких змінних $v_j \in V$ і правил зсуву $m_i \in M$; через $b_{g,t}$ позначено стан вибіркової змінної b_g за значення параметра t , а $v_{j,m_i(t)}$ – стан змінної v_j за значення параметра $m_i(t)$, тобто для значення, отриманого для заданого t за умови застосування правила зсуву m_i . Для повністю впорядкованої ПМ, правила зсуву якої мають вигляд (2.8), вираз (2.9) буде мати вигляд

$$b_{g,t} = v_{j,t+d}. \quad (2.10)$$

Оскільки будь-яке ПЗ з набору M може бути застосоване до будь-якої змінної з множини V , то множина усіх можливих вибірових змінних представляється декартовим добутком $V \times M$. Насправді розглядаються вибірові змінні, що характеризуються відношенням

$$K \subset V \times M \quad (2.11)$$

так, що будь-якій парі $(v_j, m_i) \in K$ відповідає одне рівняння (2.9).

Відношення K представляє схему суміжності на ПМ, у термінах якого визначені вибірові змінні. Ця схема носить назву маски.

Для введення ідентифікаторів вибірових змінних g вводиться однозначна функція кодування:

$$\lambda : K \rightarrow P_{/K/}, \quad (2.12)$$

де $/K/$ – це потужність множини K .

Якщо вибірова змінна b_g визначена через змінну v_j і деяке ПЗ відповідно до рівняння (2.9), то множина станів b_g буде тією ж самою, що і множина станів v_j , тобто V_j . Для зручності позначень будемо множину станів вибірової змінної позначати як B_g ; зміст будь-якого $B_g (g \in P_{/K/})$ однозначно визначається маскою у термінах однієї серед множин $V_j (j \in P_n)$. Таким чином, декартів добуток

$$Q = B_1 \times B_2 \times \dots \times B_{/K/}$$

являє собою повну множину станів вибірових змінних.

Позначимо повністю впорядковані ПМ U , а їх елементи як $u (u \in U)$.

При цьому рівняння (2.10) приймає вигляд:

$$b_{g,u} = v_{j,u+d}. \quad (2.13)$$

Для повністю впорядкованих ПМ маска може бути зображена у вигляді фрагмента матриці, що представляє декартів добуток $V \times M$. Це показано на рис. 2.4, на якому рядки позначені ідентифікаторами j змінних з множини V , а стовпці – цілими константами d , пов'язаними із ПЗ виду (2.8). Елементи матриці або порожні, або являють собою ідентифікатори g вибірових змінних, що приписані парам (j, d) згідно (2.13); порожні елементи матриці відповідають елементам $V \times M$, що не входять до маски.

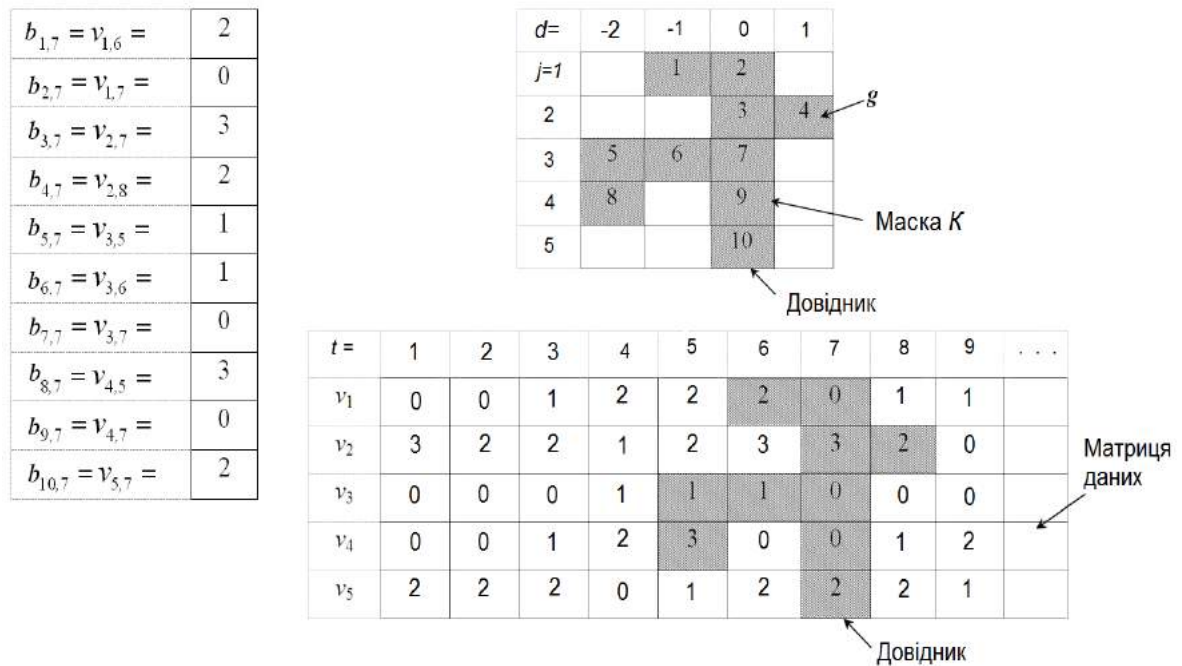


Рисунок 2.4 – Табличне представлення даних і маска для повністю впорядкованої ПМ [67]

Зручно розбити маску K на підмаски K_j , кожна з яких пов'язана з однією змінною v_j з подібної системи.

Формально

$$K_j = \{(\alpha, \beta) / (\alpha, \beta) \in K, \alpha = v_j\}. \quad (2.14)$$

У візуальному (матричному) поданні K підмаски K_i є рядки.

У будь-якій масці один стовпець відповідає тотожному правилу зсуву $d = 0$. Цей стовпець має особливе значення, оскільки пов'язані з ним вибіркові змінні є ідентичними до базових змінних заданої представляючої системи. Цей стовпець у масках називається довідником.

Якщо маска розміщена на матриці даних таким чином, що довідник збігається з певним значенням t , то маска виділить тільки деяку підмножину елементів, а саме елементи, що представляють повний стан вибірових змінних за даного значення t . Так, на рис. 2.4 зображена маска, що

розміщена на матриці даних за $t = 7$ (довідник маски збігається з $t = 7$). Повний стан вибірових змінних для цього положення маски показано на рис. 2.4 зліва. Варто відзначити, що стани довідника вибірових змінних $b_2, b_3, b_7, b_9, b_{10}$ є точно такими ж (для будь-якого t), що і стани базових змінних відповідно v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 . Решта вибірових змінних являють собою стани з параметричної суміжності у t . Для будь-якої маски за будь-якого t схема сусідства зберігається. Якщо t – час, то змінна b_4 буде представляти майбутній (щодо розглянутого значення t) стан змінної v_2 , а змінні b_5 і b_6 представлятимуть минулі стани змінної v_3 .

Будь-яка маска являє собою певну точку зору, відповідно до якої представлені обмеження на базові змінні. Найпростіший спосіб завдання певної маски – це перерахування всіх повних станів відповідних вибірових змінних. У загальному вигляді подібний перелік є підмножиною декартового добутку Q , тобто багатовимірним відношенням, що є визначеним на Q . Це відношення визначається функцією

$$f_B : Q \rightarrow \{0, 1\}, \quad (2.15)$$

такою, що $f_B(q) = 1$, якщо стан s входить до переліку, і $f_B(q) = 0$ в іншому випадку. Таким чином, функція f_B являє собою функцію вибору. Вона обирає стан вибірових змінних із множини всіх потенційних станів (з декартового добутку Q). Оскільки подібний вибір дає принаймні деякі відомості про поведінку цих змінних, функцію f_B зазвичай називають функцією поведінки.

Функція f_B визначає стан q , що реально зустрічається, але не визначає значення параметра, за якого вони мають місце. Таким чином, ця функція є параметрично інваріантною. Також слід звернути увагу на область визначення f_B . Вона є однаковою для всіх типів функцій поведінки та

визначається через маску, яка, у свою чергу, визначається через змінні та параметри представляючої системи. Звідси випливає, що деяка система, скажімо система F_B , яка характеризує параметрично інваріантне обмеження на множину змінних через функції поведінки, визначається трійкою

$$F_B = (H, K, f_B), \quad (2.16)$$

де H – узагальнена представляюча система;

K – маска, визначена на H ;

f_B – функція поведінки, визначена через K і H . Така система називається системою з поведінкою.

Система з поведінкою, що визначається (2.16), параметрично інваріантно описує обмеження на змінні представляючої системи, проте ще не містить опису того, як використовувати це обмеження для породження даних. Для розробки такого опису потрібно розбити вибірккові змінні на дві підмножини:

- породжувані змінні – змінні, стани яких породжуються з обмеження;
- породжуючі змінні – змінні, стани яких використовуються як умови у процесі генерації.

Для заданої системи з поведінкою одним зі способів визначення породжених і породжуючих змінних є визначення для даної маски K двох підмасок K_r і $\bar{K}_r$. Будемо

$$K_R = (K, K_r, \bar{K}_r), \quad (2.17)$$

де

$$K_r, \bar{K}_r \subset K, \quad K_r \cup \bar{K}_r = K, \quad K_r \cap \bar{K}_r = \emptyset,$$

називати маскою породження, тобто це маска K та її розбиття на породжувану K_r і породжуючу $\bar{K}_r$ підмаски.

За аналогією з розбивкою K на K_r і $\bar{K}_r$ множини $K_{/K/}$ ідентифікаторів g вибірових змінних можна розбити на дві підмножини G_r і $\bar{G}_r$, що представляють ідентифікатори відповідно породжуваних і породжуючих змінних. Для зручності позначень кодуєча функція (2.12) може бути замінена двома функціями

$$\begin{aligned}\lambda_r &: K_r \rightarrow G_r, \\ \lambda_r &: K_r \rightarrow M_r,\end{aligned}\tag{2.18}$$

за допомогою яких множини станів R і $\bar{R}$ відповідно породжуються та породжують змінні, які задаються декартовими добутками

$$R = \times b_g, \quad \bar{R} = \times \bar{b}_g.\tag{2.19}$$

$$g \in G_r.$$

Тепер спосіб представлення породжуваних змінних ($r \in R$), що визначається за станом породжуючих змінних ($r \in R$), можна подати функцією

$$f_{GB} : R \times R \{0, 1\},\tag{2.20}$$

$$\text{де } f_{GB}(r, \bar{r}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } r \text{ може мати місце або якщо має місце } \bar{r} \\ 0, & \text{якщо } r \text{ не може мати місце або якщо має місце } \bar{r}. \end{cases}$$

Назвемо цю функцію породжуючою функцією поведінки.

Якщо маску K і функцію f_B з (2.16) замінити відповідно на K_R і f_{GB} , то вийде альтернативна система

$$F_{GB} = (H, K_R, f_{GB}). \quad (2.21)$$

Така система є породжуючою системою з поведінкою.

Використання породжуючої системи з поведінкою для породження даних включає наступні два етапи:

- для деякого значення $t \in T$ задано стан $r \in R$; для визначення стану $r \in R$ за того ж значення використовується функція f_{GB} ;
- значення t замінюється на нове та повторюється перший етап.

2.4 Метод прогнозування параметрів ГС у виробках ЕТ

У процесі аналізу параметрів ГС у складі виробів ЕТ для розробки фізико-технологічної моделі ГС з використанням описаного підходу необхідно:

- визначити найбільш важливий параметр. Під час одиничного спостереження властивість має одне конкретне проявлення. Для визначення можливих змін її проявів потрібно провести велику кількість спостережень цієї властивості. Для цього, однак, необхідно, щоб окремі спостереження властивості, які здійснюються за допомогою однієї і тієї ж процедури спостереження, якимось чином відрізнялися одне від одного. Будь-яка істотна властивість, яка насправді використовується для визначення відмінностей у спостереженнях однієї і тієї ж властивості, називається базою.

Вибір відповідних баз є досить гнучким, проте не зовсім довільним. Обмеження під час цього вибору достатньо виражені в описаних нижче вимогах, яким мають задовольняти правильно вибрані бази; ці обмеження можуть слугувати керівними принципами у процесі визначення системи на досліджуваному об'єкті.

По-перше, бази мають бути застосовні до всіх властивостей системи, для якої вони визначені.

По-друге, бази системи мають відповідати призначенню, для якого

визначається дана система.

І, по-третє, спостереження всіх властивостей системи мають однозначно визначатися базами системи, тобто кожен елемент базової множини (значення певного моменту часу) визначає один і тільки один прояв будь-якої з властивостей.

Типовою базою, придатною практично для будь-якої властивості, є час. У цьому випадку різні спостереження однієї властивості відрізняються одне від одного тим, що вони здійснені у різні моменти часу.

Також у процесі побудови подібних табличного подання варіацій змінних (параметрів ГС або ТП їх виготовлення) із часом виникає проблема квантування цього часу, а саме вибору одиниць його вимірювання або, іншими словами, інтервалу часу між стовпцями, що найбільш підходив би для задачі прогнозування. Так, наприклад, у нашому випадку це можуть бути хвилини, години, дні;

- виділити найбільш значущі змінні, що мають конкретні значення у певні моменти часу;

- визначити можливий діапазон зміни змінних;

- перейти до умовних позначень оброблюваних даних відповідно до діапазонів, в яких вони знаходяться;

- звести значення змінних, перетворених відповідно до попереднього пункту, до таблиці, яка показуватиме їхній зв'язок із величиною параметра;

- визначити методологічний тип змінних і параметрів, комбінації таких властивостей даних, як упорядкованість, відстань, безперервність. Найзручніше у процесі вивчення властивостей ГС дані представляти як впорядковані та використовувати дискретні змінні;

- визначити систему досліджуваного об'єкта, представляючи та вихідну систему, а також канал спостереження. Останній може бути чітким або нечітким. Каналом спостереження може бути будь-яка операція, що вводить конкретну змінну як образ властивості. Канал спостереження, за допомогою якого властивість α_i представляється змінною v_i , реалізується функцією

$$o_i : A_i \rightarrow V_i;$$

- якщо дані отримані через нечіткий канал спостереження, то необхідно виконати представлення даних за допомогою відповідних чітких даних;

- визначити допустимі маски. Будемо включати до маски ті змінні, які отримані за чітким каналом спостереження та ті, у значеннях яких із часом можна простежити певну закономірність, що вже не залежитиме від часу. Оптимальне вирішення завдання вибору маски дає можливість отримання найточнішої функції поведінки системи.

Найотпимальніша маска характеризується мірою складності, що оцінюється за використанням числом вибірових змінних $|K|=k$ і породжується маскою нечіткості.

Більш складні маски дають меншу нечіткість, але їх обробка є більш трудомісткою. Число допустимих масок $N(n, \Delta K)$ залежить у кожному конкретному випадку від вибору параметрів n (число базових змінних) і ΔK (глибина маски):

$$N(n, \Delta K) = (2^{\Delta K} - 1)^n - (2^{\Delta K - 1} - 1)^n. \quad (2.22)$$

Пошук відповідних систем з поведінкою може бути реалізований різними способами. Основний принцип полягає у тому, що змістовні маски можна отримати за допомогою деякого алгоритму з найбільшої прийнятної маски у порядку зменшення складності. Серед масок однакової складності обираються тільки маски з мінімальною породжувальною нечіткістю. При цьому, якщо значення цієї мінімальної нечіткості є меншим або дорівнює значенню нечіткості попереднього рівня складності, то всі раніше прийняті системи відкидаються. У результаті застосування цієї процедури у дослідника залишаються тільки системи, що відповідають меті дослідження.

Застосування обраної маски до існуючої системи даних, отриманих у результаті проведення певного числа досліджень, дасть перетворену систему даних, у якій використовуються вибіркові змінні. На підставі цієї системи визначається функція поведінки. Відносно цієї функції вирішується завдання реконструкції;

- визначити функцію поведінки. Обчислювати розподіл ймовірності або можливості за частотами можна у різний спосіб. Вибір способу залежить від того, який зміст вкладає користувач у ці ймовірності або можливості. Так, наприклад, якщо ймовірності розглядаються як характеристики даних, то зазвичай обчислюються відносні частоти, тобто відношення $M(c)$ до загальної кількості наявних вибірок з даних за використовуваною маскою. Звідси

$$f_B(c) = \frac{M(c)}{\sum_{\alpha \in C} M(\alpha)}, c \in C. \quad (2.23)$$

Якщо, проте, ймовірності розглядаються як оцінки частот за вже наявними результатами спостереження, то вони обчислюються за формулою

$$f_B(c) = (M(c) + 1) / (\sum_{\alpha \in C} M(\alpha) + |C|). \quad (2.24)$$

Оскільки розподіли можливостей є менш обмеженими, ніж їхні ймовірнісні аналоги (наприклад, до них не треба додавати 1), існує ще більше можливих правил для обчислення їх за частотами $M(c)$. Природний спосіб обчислень розподілу можливостей, який можна вважати аналогом формули (2.23) – це вважати значення можливості таким, що дорівнює відношенню частоти $M(c)$ до максимальної зафіксованої частоти, тобто

$$f_{нов}(c) = M(c) / \max M(\alpha), \quad \alpha \in C. \quad (2.25)$$

За іншою формулою можливості тих чи інших станів обчислюються за відповідними ймовірностями. Нехай $f_B(c)$ і $f'_B(c)$ – це відповідно можливість і ймовірність стану c ($c \in C$).

Тоді

$$f_B(c) = \sum_{\alpha \in C} \min[f'_B(c), f'_B(\alpha)]. \quad (2.26)$$

2.5 Вибір змінних, що визначають поведінку ГС у виробах ЕТ

Вибір контрольованих параметрів модуля ЕТ проводиться виходячи з особливостей проектування та технології виготовлення, а також умов його експлуатації.

Можна виділити наступні типи опису вузлів ЕТ:

- функціональний – відображає основні принципи роботи і фізичні та інформаційні процеси, що протікають у вузлі ЕТ;
- конструкторський – відображає фізичну реалізацію виробу ЕТ, його геометричні форми, розташування у просторі, використовувані матеріали та компоненти;
- технологічний – відноситься до методів і засобів виготовлення компонентів ЕТ, зокрема, власне, ГС.

Важливим завданням під час побудови моделі відображення параметрів виробів ГС є вибір даних для стовпців таблиці масиву даних, які дозволили б згодом із використанням масок простежити розвиток системи (виробу ЕТ, його компонентів, наприклад, ГС або ТП їх виготовлення).

Основні вимоги до конструкцій ЕТ різного призначення виражаються у їхній здатності протистояти кліматичним і механічним впливам у процесі експлуатації.

За умов впливу на пристрої ЕТ вібрацій, ударів і лінійних прискорень можуть виникати відновлювані та невідновлювані порушення

функціонування.

До відновлюваних відносяться електромагнітні шуми та паралельна модуляція, до невідновлюваних – обриви і поломки. До відновлюваних відмов відносяться акустичні спотворення та поява в одержуваному сигналі великого рівня шумів і паразитної модуляції позитивного сигналу, які виникають внаслідок тензоефекту та п'єзоефекту.

Такі порушення можуть виникати у тонкоплівкових резисторах, напівпровідникових приладах і навіть у звичайних провідниках, які коливаються в магнітному змінному полі. Під час впливу на конструктивний елемент вібрації малого рівня може виникнути динамічна пружна деформація, за великого рівня вібрацій може виникнути пластична деформація. Якщо ж вібрації будуть ще більшими, то може відбутися руйнування конструкції.

Крім механічної гілки реакції ЕТ існує ще й електрична. Вона обумовлена деформацією та механічним напруженням. Існує поняття стійкості ЕТ, яке характеризується нормальним функціонуванням апаратури за механічних впливів. Причинами порушення стійкості ЕТ можуть бути:

- зміна значення перехідного опору в контактних групах з'єднувачів;
- зміна параметрів пасивних елементів ЕТ;
- зміна параметрів активних елементів ЕТ;
- поява шумових напруг у провідниках, що коливаються у магнітних полях;
- поява шумових напруг у коливаннях за рахунок виникаючих електричних зарядів під час механічних впливів у високоякісних діелектриках.

На вихідні параметри конструкції ЕТ на основі ГС можуть впливати такі параметри:

- механічні: жорсткість основи, частота власних коливань, динамічна гнучкість, знос;
- електричні: паразитні параметри системи провідників,

електромагнітна сумісність тощо.

- технологічні: кількість шарів ГС, матеріали основи та провідних шарів, тип міжшарового з'єднання, ширина провідників і зазор між ними [70].

У кінцевому підсумку названі змінні, що характеризують якість виробу в цілому, можуть бути використані як змінні для табличного відображення динаміки зміни параметрів ГС у складі модулів ЕТ.

Розглянемо систему даних, що являють собою значення змінних, які характеризують параметри модуля ЕТ, виготовленого на основі ГС. При цьому параметром у системі, а отже і у таблиці відображення зміни змінних, буде час.

У систему включені змінні із множини $V(v_1 \dots v_4)$.

У нашому випадку як змінні виступатимуть наступні:

- v_1 – амплітуда коливань ГС;
- v_2 – частота коливань ГС;
- v_3 – зміщення частоти модуля ЕТ на основі ГС щодо резонансної;
- v_4 – затримка сигналу модуля ЕТ на основі ГС.

Ці діапазони можна уявити значеннями 0, 1, 2, 3 множин V_1 - V_4 .

Так, залежно від розташування елементів на друкованій основі (гнучкій або жорсткій), можливо ввести вагові коефіцієнти для того чи іншого передбачуваного варіанта конструкції. Таке розташування може впливати на зміну центру мас, а отже – частоту власних коливань ГС, її міцність і властивості за роботи в умовах вібрацій.

Наприклад, для v_1 : 0 – низькі амплітуди коливань; 1 – амплітуда в межах допустимих значень; 2 – амплітуда коливань, що перевищує межі, допустимі для ГС; 3 – амплітуди коливань, що критичні для механічної цілісності всього виробу ЕТ [71].

Тоді таблична модель представлення даних про стан ГС у складі ЕТ матиме вигляд, показаний на рис. 2.5.

$t =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
v_1	0	2	0	1	0	0	2	0	2	1
v_2	0	1	2	0	1	2	1	1	0	0
v_3	2	1	2	2	2	1	2	1	2	1
v_4	1	1	1	2	1	1	0	2	1	0
v_5	2	2	2	0	1	2	2	2	1	1

$t =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	20	21	22	23	24	25	26	27	...
v_1	0	2	0	1	0	1	2	0	2	...	0	1	0	2	1	2	1	0	0
v_2	0	1	2	0	1	2	1	1	0	...	0	1	2	0	2	0	2	0	1
v_3	0	1	2	2	2	1	2	2	2	...	2	0	0	2	1	0	2	1	2
v_4	1	1	1	2	1	2	0	2	1	...	2	2	0	1	1	1	1	2	1
$t =$	42	43	44	45	46	47	48	49	50	...	74	75	76	77	78	79	80	81	...
v_1	0	0	0	1	0	1	1	2	2	...	0	1	0	0	1	2	1	0	1
v_2	0	1	2	0	1	2	0	1	0	...	0	1	1	0	2	0	2	2	0
v_3	0	2	2	2	2	1	2	2	2	...	2	0	2	0	1	2	2	0	2
v_4	2	1	1	2	2	2	2	0	1	...	2	2	1	1	1	1	1	0	2

Рисунок 2.5 – Представлення даних експерименту
з дослідження параметрів ГС у складі ЕТ

Подібним чином можливе введення поправочних коефіцієнтів для змінних у матричній моделі в залежності від:

- типу закріплення ГС у модулі ЕТ;
- обраного матеріалу діелектричної основи;
- допустимих рівнів навантаження та вібрацій.

У процесі аналізу масиву даних великого обсягу проектувальник стикається з проблемою вибору оптимального варіанта конструкції модуля ЕТ.

Метод проектування безпосередньо пов'язаний із конструктивно-технологічними особливостями розроблюваного модуля та його передбачуваною сферою використання.

Так, для проектування виробів ЕТ, застосування яких передбачається в умовах підвищених динамічних навантажень і вібрацій, можливе використання як традиційних жорстких, так і гнучких друкованих основ.

Маючи низку вихідних параметрів для таких плат, орієнтуючись на вимоги до модулів і використовуючи дані попередніх експериментальних

досліджень того чи іншого варіанту конструкції, проектувальник може прийняти рішення, що від нього вимагається, про використання гнучких або жорстких плат.

При цьому основою для прийняття такого рішення може стати фізико-технологічна модель прогнозування параметрів ГС, запропонована у даному розділі дисертаційної роботи. За наявними теоретичними та експериментальними даними особа, яка приймає остаточне рішення про варіант конструкції виробу, 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.

Фрагмент системи даних про параметри ГС у виробі ЕТ представлений у табл. 2.1, де наведені стани системи (c) та частота їх виникнення $M(c)$. Частота станів вимірюється в умовних величинах.

Таблиця 2.1 – Стани досліджуваної ГС і значення функції поведінки

Стани c	Вибіркові змінні стану ГС				Частота стану $M(c)$	Імовірнісна функція поведінки $f_{нов}(c)$
	v_1	v_2	v_3	v_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
6	0	0	3	1	4	0,667
7	0	1	0	1	3	0,500
8	0	1	1	1	4	0,667
9	0	1	2	1	3	0,500
10	0	1	3	1	1	0,167
11	0	0	2	2	3	0,500
12	1	0	1	2	3	0,500
13	1	0	2	2	4	0,667
14	1	0	3	2	2	0,333
15	1	1	3	2	3	0,500
16	0	1	0	3	1	0,167
17	1	1	1	3	2	0,333
18	1	1	2	3	3	0,500
19	1	1	3	3	3	0,500

Продовження табл. 2.1

Стани c	Вибіркові змінні стану ГС				Частота стану $M(c)$	Імовірнісна функція поведінки $f_{нов}(c)$
	v_1	v_2	v_3	v_4		
20	0	1	2	3	4	0,667
21	1	0	1	0	2	0,333
22	1	1	2	3	1	0,167
23	0	0	0	2	2	0,333
24	1	1	1	2	4	0,667

Розглянутий підхід можна застосувати для аналізу параметрів ГС під час проведення випробувань спроектованих модулів, наприклад, на вібростійкість. Аналогічним чином можна прогнозувати зміну параметрів ГС у часі з метою визначення їх критичних значень під час експлуатації. За такого відображення динаміки зміни параметрів ГС або параметрів ТП із часом з використанням спеціально розробленого програмного засобу, що реалізує алгоритм прогнозування, можна буде значно знизити трудомісткість роботи особи, що приймає рішення про працездатність готового виробу на стадіях контролю, випробувань та експлуатації. Етап завдання змінних із застосуванням запропонованого програмного продукту показано на рис. 2.6.

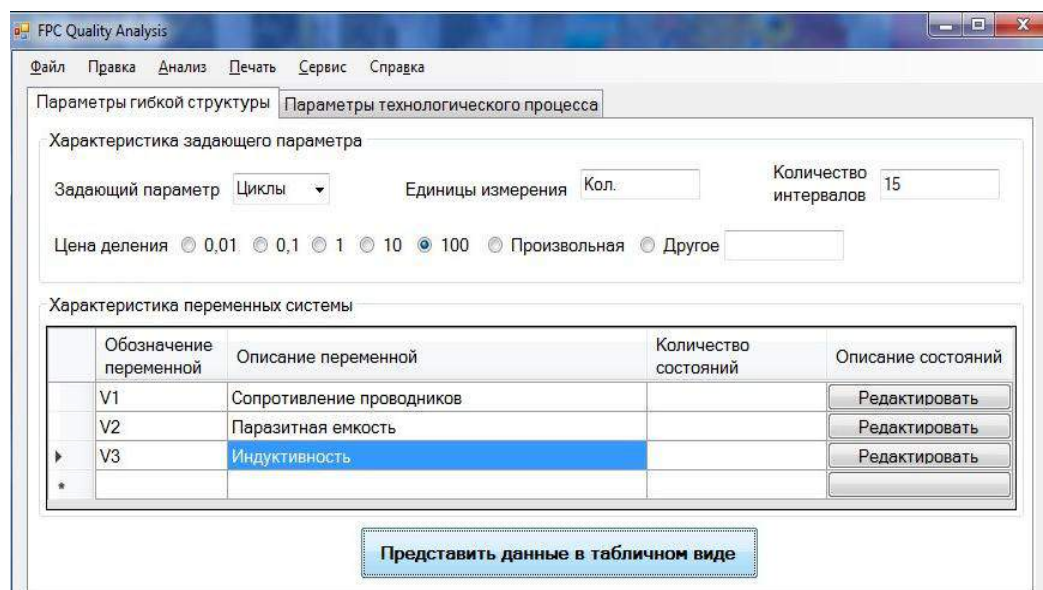


Рисунок 2.6 – Інтерфейс програми для побудови фізико-технологічної моделі ГС

На рис. 2.7 представлено відображення результатів визначення функції поведінки досліджуваної ГС.

The screenshot shows the 'FPC Quality Analysis' window with the 'Отображение результатов' (Display results) tab selected. The table below represents the data shown in the interface.

Значение параметра	V1	V2	V3	V4	Частота состояний	Значение функции поведения
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
6	0	0	3	1	4	0.667
7	0	1	0	1	3	0.500
8	0	1	1	1	4	0.667
9	0	1	2	1	3	0.500
10	0	1	3	1	1	0.167

Рисунок 2.7 – Результаты визначення функції поведінки

На рис. 2.8 наведено графічне відображення функції поведінки ГС, параметри якої представлені вище у табл. 2.1 [68].

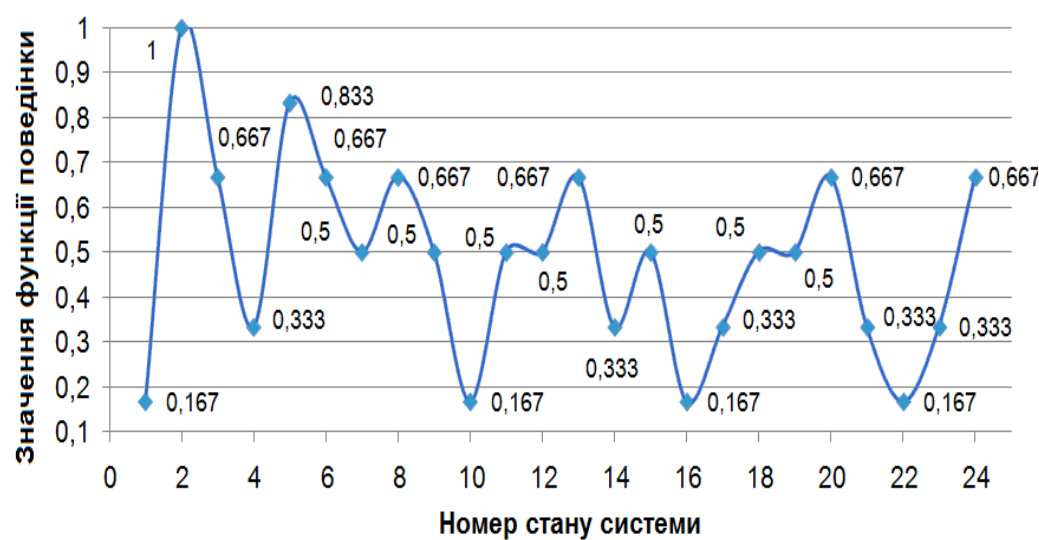


Рисунок 2.8 – Графічне відображення функції поведінки ГС у залежності від зміни задавального параметра

Висновки по розділу 2

Таким чином, завдяки запропонованому підходу, а саме використанню табличного представлення даних про стан ГС чи ТП їх виготовлення, визначенню масок і обчисленню функцій поведінки стає можливим забезпечити необхідні показники якості ГС у складі ЕТ, а також прогнозувати зміну їх параметрів у часі, зокрема, визначати допустимий діапазон варіювання змінних.

При цьому відмінною рисою такого підходу може також стати можливість комплексної оцінки параметрів ГС на тих етапах життєвого циклу виробів, що включають проектування, виробництво й експлуатацію [72].

Зокрема, універсальність розробленої фізико-технологічної моделі дозволяє прогнозувати також параметри технологічного процесу виготовлення ГС і виробів ЕТ на їх основі.

У другому розділі використано інформацію з джерел [65-72].

3 МОДЕЛІ РУЙНУВАННЯ ГС У СКЛАДІ ВИРОБІВ ЕТ І МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЯКОСТІ

3.1 Аналіз видів деформацій, що виникають у ГС

3.1.1 Механізми руйнування ГС

Як уже зазначалося, поряд із перевагами ГС виникає також багато труднощів. Більшість з них під час розробки, виготовлення та експлуатації ГС пов'язані з іншим, у порівнянні з жорсткими ДП, механізмом руйнування.

Існує три найбільш небезпечних і поширених причини руйнування ГС:

- циклічні пружнопластичні деформації під час багаторазових згинань. Даний вид деформацій прийнято вважати найбільш небезпечним;
- пружнопластичні деформації розтягування;
- резонансне руйнування за «робочого» (розтягнутого) стану ГС.

Крім руйнування гнучкої основи ГС також можливе порушення її працездатності через руйнування електричних з'єднань встановлених на ГС елементів з основою.

Відповідно до розглянутих вище варіантів застосування ГС у виробках ЕТ і МЕМС-компонентах можна виділити типові схеми деформації гнучких конструкцій [73-74]:

- поперечний (рис. 3.1, а) та багаторазовий (рис. 3.1, б) вигини ГС;
- розтягнення-стиснення ГС (рис. 3.1, в);
- резонансна деформація ГС (рис. 3.1, г);

3.1.2 Деформації типу «вигин»

Найбільш небезпечними поширеними видами впливів, за яких відбувається руйнування ГС, є пружнопластичні деформації за багаторазових згинань або так звана малоциклова втома матеріалу [49]. Тому одним із завдань дисертаційних досліджень є дослідження даного виду впливів на ГС.

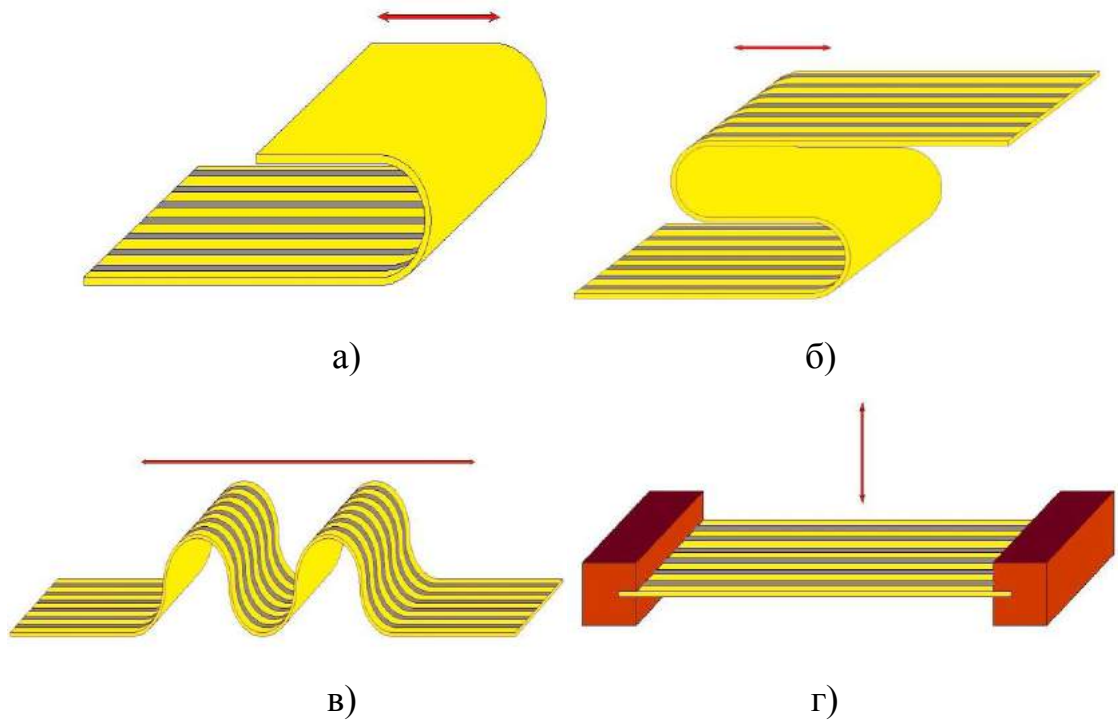
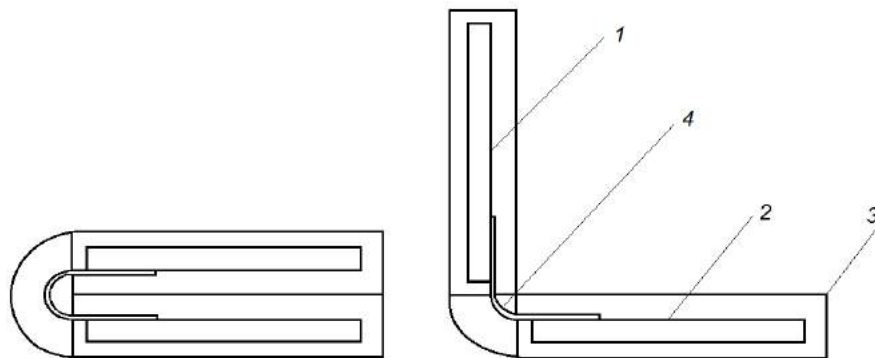


Рисунок 3.1 – Види деформацій ГС

Найбільш поширеною причиною таких видів деформацій є перехід з компактного вимкненого стану виробу ЕТ, що містить ГС, у робочий – ввімкнений (рис. 3.2).



1, 2 – жорсткі ДП; 3 – корпус; 4 – ГС

Рисунок 3.2 – Приклади структур модулів ЕТ з використанням ГС

Також даний вид деформації виникає у виробках ЕТ і компонентах МЕМС, у яких ГС використовується для з'єднання двох або більшої кількості жорстких модулів, які обертаються один відносно іншого вздовж певної осі,

наприклад в антенах, ноутбуках, датчиках, HDD та ін.

Така деформація може призвести до відшарування фольгованого провідника від діелектричної основи, пластичної деформації провідникової системи, виникнення тріщин у провідниках [75].

Деформації, які представлені на рис. 3.1, а і 3.1, б є характерними для портативних виробів ЕТ і МЕМС-пристроїв різного застосування, наприклад для ГС, що застосовуються у сонячних батареях, принтерах тощо. Дефекти, що виникають під час таких деформацій, аналогічні до тих, що мають місце під час «чистого» вигину.

Відповідно до літератури, найбільшу небезпеку за таких видів деформації представляють вигини ГС із малим радіусом. Радіус перегину ГС є визначальним параметром виникнення дефектів. Розробивши методику розрахунку даного параметра та змінюючи технологічні параметри ГС, можливо підвищити довговічність і стійкість виробів ЕТ за умови впливу на них дестабілізуючих факторів.

3.1.3 Деформації типу «розтягнення-стискання»

Ще одним різновидом розповсюджених деформацій ГС, що виникають у довгих лініях, антенній апаратурі тощо, є дефекти, що викликані розтягуванням-стисканням ГС. Даному виду деформації можуть піддаватися як окремі ділянки ГС, так і вся вона цілком [49].

На відміну від друкованих модулів на жорсткій основі, складова «стискання» даного виду деформації не є небезпечною для ГС завдяки їх конструкційним особливостям. У той же час «розтягнення» для ГС створює значну ймовірність виникнення дефектів через більш тонку основу ГС у порівнянні з жорсткими конструкціями.

Основними дефектами, що виникають за такого роду деформацій, відповідно до проведеного аналізу, є обрив провідників і руйнування ГС у місцях контакту зі з'єднувачами.

3.1.4 Резонансне руйнування

Досить рідкісним, але вкрай небезпечним є резонансне руйнування ДП, що виникає за умови співпадіння частоти зовнішніх вібрацій із власною частотою ДП. На відміну від жорстких ДП, для ГС даний тип впливів є небезпечним лише за її знаходження у «розтягнутому» робочому стані.

Під час попереднього розрахунку власної частоти коливань ГС існує можливість розробки автоматичної системи детектування частоти зовнішніх коливань, яка за умови співпадіння даних частот змінює тип натягу ГС або переводить її у «неробочий» стан з метою уникнення можливих дефектів.

Таким чином, у процесі проведеного огляду проаналізовано можливі причини та варіанти виникнення дефектів ГС у складі виробів ЕТ і компонентів МЕМС, а також поставлені завдання запобігання їх виникнення за допомогою розробки технологічних і конструкційних методів виготовлення ГС.

А саме, сформовані наступні завдання:

- розробити математичну модель, що дозволить визначити мінімальний допустимий радіус вигину ГС і запропонувати технологічні та конструкційні методи запобігання дефектам за умови деформації типу «вигин», а також провести експериментальні дослідження параметрів ГС для підтвердження отриманих результатів;
- провести аналіз гранично допустимих деформацій розтягування для найбільш поширених матеріалів ГС, розробити технологічні методи підвищення стійкості ГС до розтягування за допомогою різних видів їх трасування;
- розробити модель руйнування ГС.

3.2 Моделювання циклічних пружнопластичних деформацій ГС під час багаторазових згинань

Небезпеку деформацій типу «вигин» можливо знизити шляхом визначення мінімального допустимого радіуса кривизни та розробки конструкції модуля, у

якому ГС встановлена таким чином, щоб не допускати подібний вигин; а також шляхом попереднього розрахунку максимальної кількості допустимих вигинів із метою визначення терміну заміни ГС.

Розглянемо типовий випадок деформації ГС на прикладі вигину шлейфу, що складається з двох різнорідних матеріалів: алюмінієвого шару провідників і діелектричної основи з поліімідної плівки.

За умови деформації ГС знаходиться у стані чистого вигину: справа на рис. 3.3 знаходяться стиснення, а зліва – розтягнуті шари, також існує нейтральна лінія поперечного перерізу – площина, у якій нормальні напруження дорівнюють нулю, тобто $\sigma = 0$.

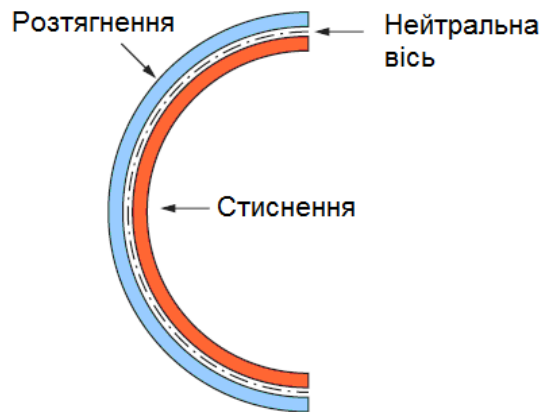


Рисунок 3.3 – Деформація ГС під час згинання

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

$$\begin{aligned}\sigma_a &= \frac{y_1}{\rho} E_a, \\ \sigma_n &= \frac{y_2}{\rho} E_n,\end{aligned}\tag{3.1}$$

де ρ – радіус кривизни ГС;

y_1 і y_2 – відстань від нейтральної лінії;

E_a – модуль пружності алюмінію;

E_n – модуль пружності полііміду.

Визначити положення нейтральної лінії можливо за умови, якщо дорівнює нулю сумарна сила у поперечному перерізі:

$$\int \sigma_a dF + \int \sigma_n dF = E_a \int y dF + E_n \int y dF = 0. \quad (3.2)$$

Статичний момент визначається за формулою

$$M = \int \sigma y dF. \quad (3.3)$$

З урахуванням того, що розглянута ГС являє собою двошарову структуру поліімід-алюміній, отримано такий вираз:

$$M = \int \sigma_a y dF + \int \sigma_n y dF = \frac{J_a E_a + J_n E_n}{\rho}, \quad (3.4)$$

де J_a – момент інерції площі алюмінію відносно нейтральної осі;

J_n – момент інерції площі полііміду відносно нейтральної осі.

Визначивши радіус кривизни балки з рівняння (3.4) і підставивши його у рівняння (3.1), отримаємо залежності розподілу напружень ГС:

$$\sigma_a = \frac{My E_a}{J_a E_a + J_n E_n}, \quad (3.5)$$

$$\sigma_n = \frac{My E_n}{J_a E_a + J_n E_n}.$$

Проведено аналіз деформації типу «вигин» і визначення нейтральної

лінії провідника ГС з розмірами 100×50 мм, виготовленої з лакофольгованого діелектрика ФДИ-А-50 з товщиною алюмінію $h_a = 30$ мкм і товщиною полііміду $h_i = 20$ мкм (рис. 3.4).

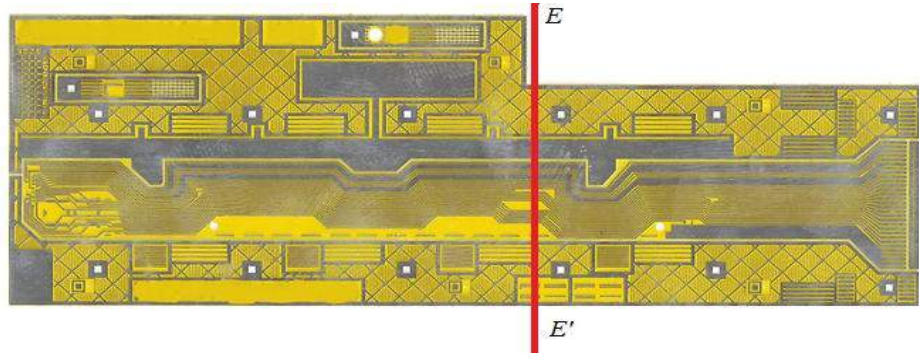


Рисунок 3.4 – Досліджувана ГС

ГС на основі безадгезійних лакофольгованих алюміній-поліімідних діелектриків типу ФДИ-А характеризуються пластичністю, гнучкістю та стабільністю електричних характеристик [28]. Більш детальний аналіз переваг і властивостей матеріалів основ ГС наведено у Додатку Г, а основні характеристики полііміду марки ФДИ-А представлені у таблиці 3.1.

Розглянемо вигин ГС за віссю Е-Е', яка позначена лінією на рис. 3.4.

Таблиця 3.1 – Характеристики полііміду марки ФДИ-А

Шар	σ , МПа	E , МПа	μ
Al	150	$1,0 \cdot 10^5$	0,33
Pi	170	$0,03 \cdot 10^5$	0,3

Провідники ГС мають ширину 0,3 мм, 1 мм і 2,8 мм та розташовуються під кутами 90° і 45° відносно лінії вигину (рис. 3.5). Відстань між провідниками становить 0,3 мм.

У зв'язку з тим, що модуль пружності шару алюмінію значно перевищує модуль пружності шару полііміду, нейтральна лінія розташовується у шарі алюмінію:



а) 90°; б) 45° в) 0°

Рисунок 3.5 – Варіанти розташування провідників
відносно осі вигину ГС

$$\begin{aligned} E_a \int y dF &= E_a \left(-\frac{h_a}{2} h_1 B_a + \frac{H_a - h_a}{2} [H_a - h_a] B_a \right), \\ E_n \int y dF &= E_n \left(\left[H_a - h_a + \frac{H_n}{2} \right] H_n B_n \right), \end{aligned} \quad (3.6)$$

де H_a – товщина шару алюмінію;

H_n – товщина шару полііміду;

h_a – відстань від нейтральної лінії до верхньої поверхні шару алюмінію;

B_a – ширина алюмінієвого провідника;

B_n – ширина полііміду під провідником (ширина провідника та відстань між провідниками ГС).

Підставивши рівняння (3.6) у рівняння (3.2) отримуємо значення нейтральної лінії:

$$E_a \left(-\frac{h_a}{2} h_1 B_a + \frac{H_a - h_a}{2} [H_a - h_a] B_a \right) + E_n \left(\left[H_a - h_a + \frac{H_n}{2} \right] H_n B_n \right) = 0. \quad (3.7)$$

З рівняння (3.7) знаходимо вираз для визначення відстані від нейтральної лінії до верхньої поверхні шару алюмінію:

$$h_a = \frac{0,5 \cdot E_a B_a H_a^2 + E_n H_n B_n H_a + 0,5 \cdot E_n B_n H_n^2}{E_a B_a H_a + E_n B_n H_n}. \quad (3.8)$$

Відстань від нейтральної лінії до верхньої поверхні шару алюмінію для провідника товщиною h_a за величини кута провідника 90° відносно лінії вигину:

- 0,3 мм $h_a = 15,30769$ мкм;
- 1 мм $h_a = 15,633528$ мкм;
- 2,8 мм $h_a = 15,541579$ мкм.

За величини кута провідника 45° відносно лінії вигину:

- 0,3 мм $h_a = 15,961538$ мкм;
- 1 мм $h_a = 15,63352$ мкм;
- 2,8 мм $h_a = 15,54158$ мкм.

Таким чином, можна зробити висновок, що для даного обраного матеріалу положення нейтральної лінії за різних значень ширини провідників і їхнього різного розташування відносно осі вигину змінюється не суттєво, і максимальне зміщення нейтральної лінії становить 0,654 мкм.

Значення нейтральної лінії відрізняються лише для провідників малої товщини. Залежно від відстані до нейтральної лінії у матеріалі виникають різні напруження (рис. 3.6).

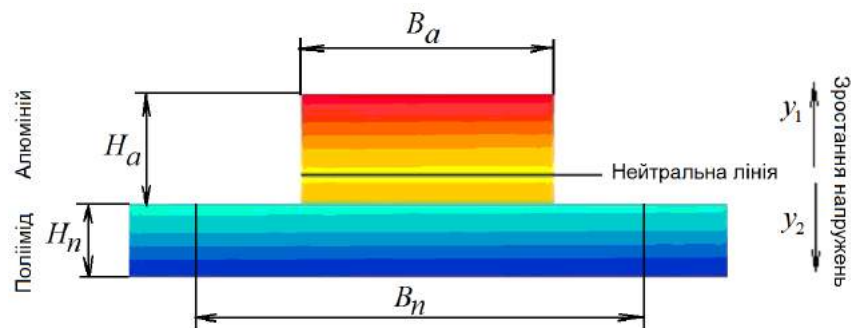


Рисунок 3.6 – Зростання внутрішніх напружень у провіднику ГС у залежності від відстані до нейтральної лінії

На рисунку 3.7 наведено залежність розташування нейтральної лінії від ширини провідника. Згідно з отриманими результатами, ширина провідника має незначний вплив на параметр h_a .

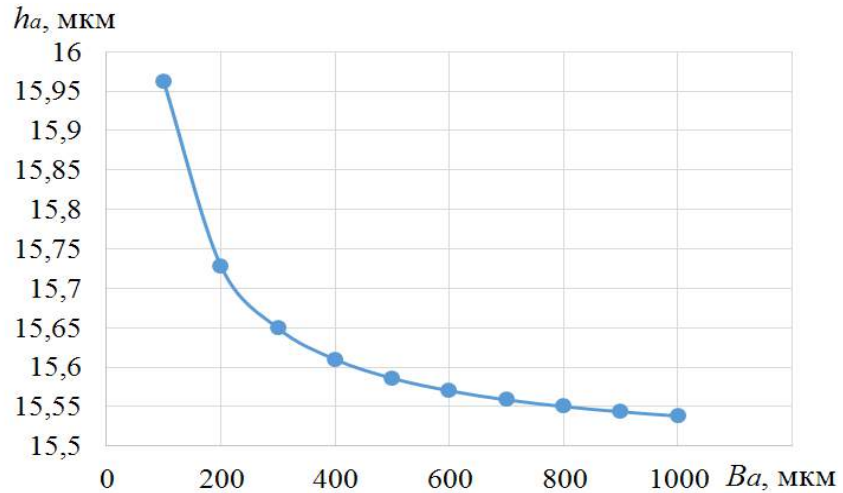


Рисунок 3.7 – Розташування нейтральної лінії у залежності від ширини провідників

На рис. 3.8 наведено залежність механічних напружень, що виникають у граничних ділянках алюмінієвих провідників, від радіуса вигину шлейфа для провідників шириною 100, 200, 600 та 1000 мкм.

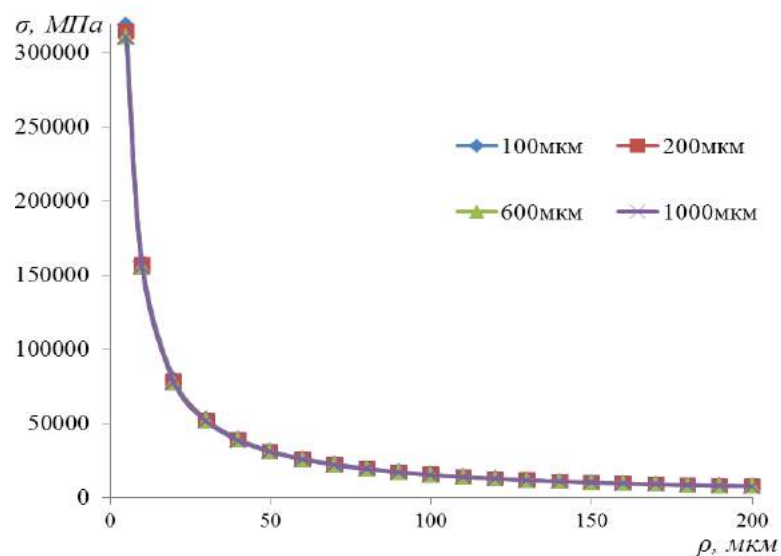


Рисунок 3.8 – Залежність механічних напружень, що виникають у граничних ділянках провідників, від радіуса вигину шлейфа

Із проведених розрахунків можна зробити висновок, що максимальні напруження спостерігаються у шарі алюмінію на поверхні, яка максимально віддалена від нейтральної лінії. Напруження у полііміді є значно меншими та ними можна знехтувати. Крім того, напруження зростають обернено пропорційно до радіусу кривизни провідника.

Виходячи з отриманих результатів моделювання, ширина провідників, змінювана у досить великому діапазоні від 100 мкм до 1 мм, незначно впливає на значення механічних напружень, що виникають у ГС за умови вигину. Також для ГС, виготовлених з матеріалу марки ФДИ-А-50, не бажано допускати радіус вигину менший за 200 мкм, оскільки при цьому напруження, що виникають у структурі, не будуть спричиняти пластичних деформацій провідників.

Основною причиною руйнування ГС є малоциклова втома алюмінію, що викликає пластичні деформації. Для визначення довговічності матеріалів за малоциклових впливів використовується рівняння Басквіна-Менсона-Коффіна [74]. Відносно ГС можливе використання спрощеного критерію Коффіна-Менсона:

$$N = 0,25 \left(\frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_n} \right)^2, \quad (3.9)$$

де ε_B – залишкова деформація матеріалу під час розриву;

ε_n – розмах циклічної пластичної деформації «розтягнення-стиснення», що визначається за формулою:

$$\varepsilon_n = \Delta\varepsilon - \varepsilon_y = \frac{2\sigma}{E_n} - \frac{2\sigma_y}{E}, \quad (3.10)$$

де $\Delta\varepsilon$ – повна відносна деформація;

ε_y – пружна відносна деформація;

σ – максимальне напруження;

σ_y – межа пружності матеріалу;

E_n – модуль пружності матеріалу за межами пружності.

Довговічність гнучких шлейфів за радіусу перегину від 1 до 10 мм становить $200 \cdot 10^3$ циклів. Для підвищення довговічності необхідно знизити напруження та деформацію, чого можна досягти шляхом обмеження радіусу перегину шлейфу. Відносна деформація під час згинання визначається за формулою

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho}. \quad (3.11)$$

Допустимий радіус вигину визначається за формулою

$$\rho = \frac{h}{\varepsilon_y} a. \quad (3.12)$$

Відповідно до формули (3.10) допустимий радіус вигину має пропорційну залежність від товщини шару алюмінію.

3.3 Аналіз деформацій типу «розтягнення»

У відповідності до довідкових даних, алюміній має значно менші межі пружності у порівнянні з поліімідом. Отже, під час аналізу деформацій типу «розтягнення» необхідно розглядати лише міцність провідникової системи ГС [73-74].

Під час розтягування провідника його довжина збільшується, а

поперечні розміри зменшуються (рис. 3.9).

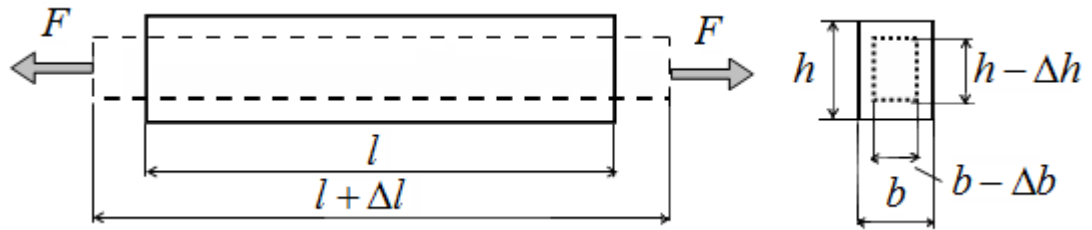


Рисунок 3.9 – Деформації розтягнутого провідника

Як відомо, зміна довжини Δl називається абсолютною поздовжньою деформацією, а зміна поперечних розмірів Δb і Δh – абсолютними поперечними деформаціями. За цими величинам обчислюють відносну поздовжню деформацію (3.13) і відносну поперечну деформацію

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (3.13)$$

$$\varepsilon' = \frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta h}{h}. \quad (3.14)$$

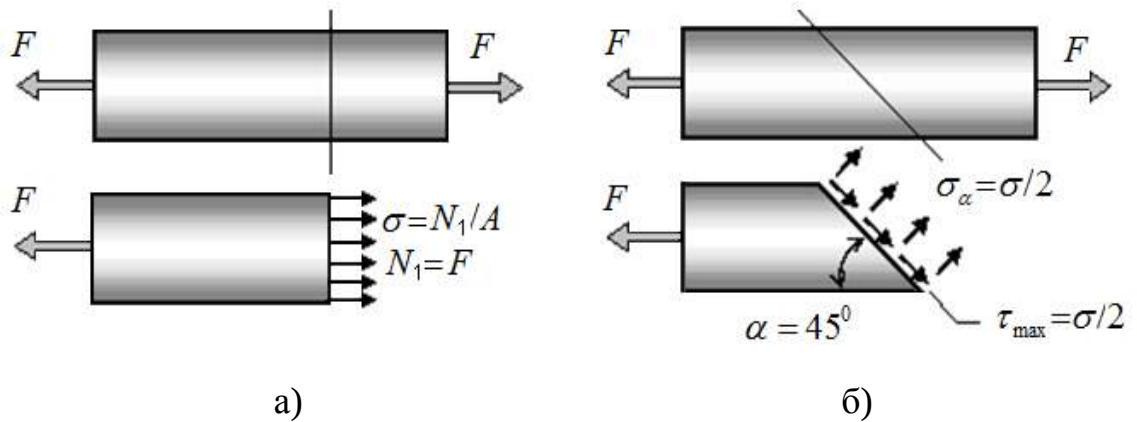
Експериментально встановлено, що відношення

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| \quad (3.15)$$

залишається постійним для кожного матеріалу і знаходиться в інтервалі $0 \dots 0,5$. Параметр μ називається коефіцієнтом Пуассона [73].

У поперечних перетинах провідника виникають нормальні напруження, які, відповідно до гіпотези плоских поперечних перерізів, рівномірно розподілені вздовж усієї площі перетину (рис. 3.10) і дорівнюють відношенню поздовжньої сили N до площі поперечного перерізу A

$$\sigma = \frac{N_1}{A}. \quad (3.16)$$



а – поперечний переріз; б – нахильний переріз

Рисунок 3.10 – Нормальні напруження у перетинах провідника

Між нормальними напруженнями та відносною поздовжньою деформацією існує залежність, що описується законом Гука:

$$\sigma = \varepsilon E. \quad (3.17)$$

Коефіцієнт пропорційності E , як відомо, називається модулем пружності, він визначається дослідним шляхом і є важливою характеристикою матеріалу. Одиниці вимірювання модуля пружності збігаються з одиницями вимірювання тиску (МПа, кН / см²).

Абсолютну поздовжню деформацію обчислюють за формулою

$$\Delta l = \frac{N_1 l}{EA}, \quad (3.18)$$

де добуток EA називається жорсткістю під час розтягування.

Аналіз напруженого стану показує, що у поперечних перетинах провідника діють тільки нормальні напруження, у поздовжніх перетинах

немає ніякого напруження, а у нахильних перетинах виникають нормальні та дотичні напруження. Найбільші дотичні напруження дорівнюють половині нормальних напружень у поперечному перерізі та діють на площинках, нахилених під кутом 45° до поздовжньої вісі провідника (рис. 3.16, б).

Різниця у способах прикладення зовнішніх сил до провідника позначається на розподілі деформацій і напружень тільки на порівняно коротких ділянках провідника поблизу місця прикладення зусиль.

У цьому полягає принцип Сен-Венана, який підтверджується даними експериментів.

Для визначення міцності провідників необхідно уточнити механічні властивості алюмінієвої провідникової системи.

Основні параметри механічних властивостей технічного алюмінію наведені у табл. 3.2:

Таблиця 3.2 – Механічні параметри алюмінієвих провідників

Параметр	Одиниці вимірювання	Деформований алюміній	Відпалений алюміній
Межа текучості $\sigma_{0,2}$	МПа	78,5-117,7	39,2-78,5
Межа міцності під час розтягування σ_s	МПа	1250,35-1540	769,82
Відносне подовження під час розриву	%	5-10	30-40
Відносне звуження під час розриву	%	50-60	70-90
Межа міцності під час зрізу	МПа	98	58,8
Твердість	НВ	30-35	20

Наведені показники дуже орієнтовні:

- для відпаленого та литого алюмінію ці значення залежать від марки технічного алюмінію. Чим більше домішок, тим більшими є міцність, твердість і нижчою – пластичність. Наприклад, твердість литого алюмінію

складає: для А0 – 25НВ, для А5 – 20НВ, а для алюмінію високої чистоти А995 – 15НВ. Межа міцності під час розтягування для цих випадків становить: 83; 74 і 50 МПа, а відносне подовження 20; 30 і 45 % відповідно;

- для деформованого алюмінію механічні властивості залежать від ступеня деформації, виду прокату та його розмірів.

Однак, у будь-якому випадку, технічний алюміній – це м'який і неміцний метал. Низька межа текучості (навіть для нагартованого прокату вона не перевищує 117,7 МПа), що обмежує застосування алюмінію за допустимими навантаженнями.

Алюміній має низьку межу текучості: за 20 °С ~ 50 МПа, а за 200 °С – 6,9 МПа. Для порівняння: у міді ці показники дорівнюють 69 і 49 МПа відповідно.

Низька температура плавлення та температура початку рекристалізації (для технічного алюмінію приблизно 150 °С), низька межа текучості обмежують температурний діапазон експлуатації алюмінію за високих температур.

Пластичність алюмінію не погіршується за низьких температур, аж до гелієвих. За зниження температури від +20 °С до -269 °С межа міцності зростає у 4 рази у технічного алюмінію та у 7 разів у високочистого. Межа пружності при цьому зростає у 1,5 рази.

Для визначення механічних характеристик провідникових матеріалів на спеціальних установках форма, розміри зразків, порядок випробувань регламентуються технічними умовами для можливості зіставлення отриманих результатів. У процесі випробувань фіксуються величини розтягуючих або стискаючих сил, поздовжніх деформацій, автоматично викреслюються діаграми залежності між деформаціями зразків Δl і зусиллями у зразках N_1 . Від отриманих діаграм переходять до діаграм напружень, на яких по осі абсцис відкладають відносну поздовжню деформацію зразку, а вздовж осі ординат – нормальне напруження. Типовий вид діаграми алюмінію та його сплавів показано на рис. 3.11. На даній

діаграмі можна відзначити кілька основних точок, які відповідають механічним характеристикам міцності матеріалу.

Межа пропорційності σ_{nc} – найбільше напруження, за якого ще є справедливим закон Гука (точка 3).

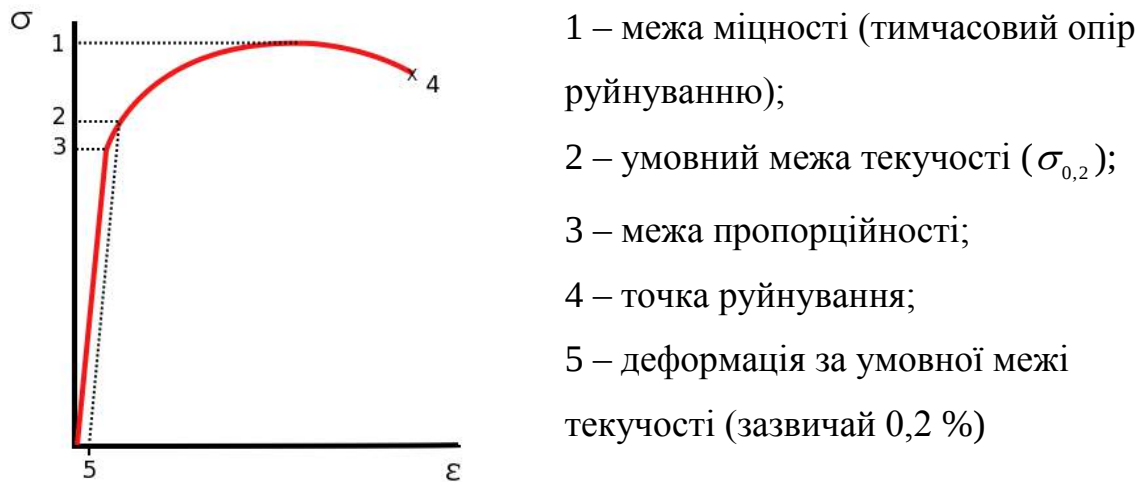


Рисунок 3.11 – Типова діаграма $\sigma - \varepsilon$ для алюмінієвих сплавів

Межа пружності σ_y – напруження, за якого відносна поздовжня залишкова деформація має малу величину (0,02 ... 0,05 %).

Тимчасовий опір (межа міцності) σ_s (σ_{nc}) – напруження, яке відповідає найбільшому навантаженню на зразок (точка 1 на рис. 3.13).

На рис. 3.12 зображена межа пружності алюмінію $\sigma_y = 50,1$ МПа, яка є основною для визначення механічних властивостей провідників ГС.

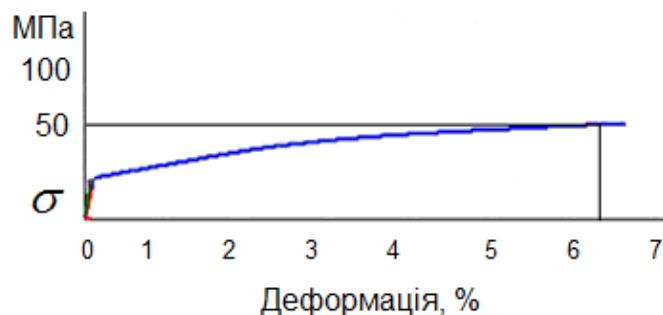


Рисунок 3.12 – Діаграма напружень алюмінію

Характеристики пластичності матеріалу обчислюються так:

- відносне залишкове подовження:

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100\%; \quad (3.19)$$

де L_0 – початкова довжина зразка;

L_1 – довжина зразка після розтягнення;

- відносне залишкове звуження:

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%, \quad (3.20)$$

де A_0 – початкова площа зразка;

A_1 – площа зразка після розтягнення.

Для розрахунків на міцність використовують метод допустимих напружень, метод руйнівних навантажень і метод граничних станів.

У методі допустимих напружень вводиться поняття допустимого напруження $[\sigma]$, величину якого отримують як відношення небезпечного напруження σ_{on} на коефіцієнт запасу міцності n :

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{on}}{n}. \quad (3.21)$$

За небезпечне напруження приймається межа пружності. Коефіцієнт запасу міцності $n > 1$, який враховує природний розкид результатів дослідів із визначення σ_{on} , неточність значення зовнішнього навантаження, умови експлуатації конструкції та інші чинники.

Умова міцності матеріалу має вигляд

$$\sigma_{\max} = \frac{N_1}{A} \leq [\sigma]. \quad (3.22)$$

Ця умова дозволяє вирішувати три типи завдань:

- за заданих навантажень, розмірів поперечного перерізу та допустимих напружень перевіряти міцність провідника (3.22);
- за заданих навантажень і величини допустимих напружень визначати площу, а потім розміри поперечного перерізу

$$A \geq \frac{N_1}{[\sigma]}; \quad (3.23)$$

- за заданих розмірів поперечного перерізу та величини допустимих напружень визначати величину допустимої поздовжньої сили у провіднику

$$N_1 \leq [\sigma]A. \quad (3.24)$$

Найбільш імовірним місцем виникнення дефектів, викликаних деформацією «розтягнення», є перетин Е-Е' з причини мінімальної поперечної товщини діелектричної основи та ширини провідників, а також технологічних елементів.

Технологічні елементи – це мітки суміщення шарів і масок, зварювальні тестові елементи. Крім того у технологічній зоні знаходяться елементи у шарі алюмінію, що збільшують міцність ГС (рис. 3.13).

За рахунок технологічної зони ширина провідникової системи у зоні деформації збільшується до 14 мм, а товщина шару алюмінію у полііміді марки ФДИ-А-50 становить 30 мкм. Межа пружності алюмінію провідників становить $\sigma_y = 51$ МПа.

Таким чином, гранично допустиме навантаження на дану ГС за деформації типу «розтягнення» становить близько 21,4177 Н.

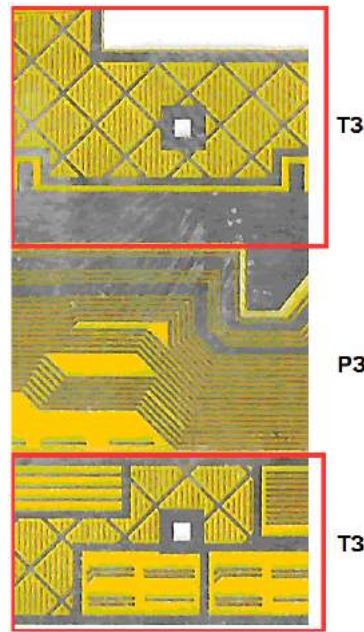


Рисунок 3.13 – Робоча зона (РЗ) і технологічні зони (ТЗ) ГС

3.4 Аналіз резонансного руйнування ГС

Явище резонансного руйнування є найбільш небезпечним для «робочого», ввімкненого стану ГС.

У такому випадку власні частоти коливання ГС визначаються за умови наступних припущень:

- пружні деформації підкоряються закону Гука;
- ГС має постійну товщину;
- у ГС є нейтральний шар, який під час згинальних коливань пластини не схильний до деформацій розтягування-стиснення (методика його визначення наведена вище);
- матеріал ГС є ідеально пружним, однорідним і ізотропним;
- якщо справедливою є гіпотеза прямих нормалей, згідно з якою всі прямі, нормальні до середнього прошарку ГС до деформування, залишаються прямими та нормальними до неї і після деформації.

Для розрахунку ГС розглядається як пластина з певними граничними умовами. Граничні умови вибираються у залежності від реального її закріплення у модулі ЕТ. Існують три типи класичних граничних умов:

- опертий край (уздовж краю прогин і згинальний момент дорівнюють нулю);
- затиснений край (уздовж краю прогин і кут повороту перерізу дорівнюють нулю);
- вільний край (уздовж краю вигинаючий момент і перерізуєча сила дорівнюють нулю).

Якщо край ГС є приклеєним до рамки, то це закріплення розглядається як опертий край.

Якщо край ГС поміщено до рамки, що накриває його зверху, знизу і з торця, то цю конструкцію розглядають як затиснений край. Якщо ГС двома протилежними краями вставляється до пружного з'єднання, то два інші краї будуть вважатимуться вільними.

Від того, наскільки точно відповідає реальне закріплення ГС теоретичним класичним умовам, залежить і точність розрахунку власних резонансних частот.

Для прямокутних пластинок існує 21 варіант можливих поєднань класичних граничних умов. У зв'язку зі специфікою закріплення ГС не всі класичні варіанти граничних умов для них можуть бути застосовні.

Змінюючи граничні умови можливо змінити власні резонансні частоти ГС.

Під час складання рівнянь руху можна використовувати рівняння вигину пластини за дії розподіленого статистичного навантаження $q(x, y)$.

$$D \left(\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) = q(x, y), \quad (3.25)$$

де $\omega = \omega(x, y)$ – прогин ГС у точці з координатами x і y ;

D – циліндрична жорсткість пластин

$$D = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3.26)$$

де E – модуль пружності матеріалу ГС;

ν – коефіцієнт Пуасона матеріалу ГС;

H – товщина ГС.

Замінюючи у (3.25) відповідно до принципу Д'Аламбера статистичне навантаження силою інерції $m\left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}\right)$, отримуємо рівняння вільних незгасаючих (власних) коливань ГС:

$$m\left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}\right) + D\left(\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4}\right) = 0, \quad (3.27)$$

де $z = z(x, y, t)$.

Найбільшого поширення для вирішення завдань щодо власних коливань отримали точні методи, засновані на безпосередньому вирішенні рівняння (3.27), а також наближені енергетичні методи, засновані на законі збереження енергії.

Для подальших розрахунків необхідно визначити формули для обчислення максимальних значень кінетичної $T_{\max}$ і потенційної $H_{\max}$ енергії пластини:

$$T_{\max} = \frac{\rho H \omega_0^2}{2} \iint_{S_n} \omega^2 dx dy, \quad (3.28)$$

$$H_{\max} = \frac{D}{2} \iint_{S_n} \left[\left(\frac{\partial \omega^2}{\partial x^2} + \frac{\partial \omega^2}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left\{ \frac{\partial \omega^2}{\partial x^2} \frac{\partial \omega^2}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial \omega^2}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} \right] dx dy, \quad (3.29)$$

де S_n – площа ГС;

ρ – щільність матеріалу.

Відомий так званий точний метод розрахунку власних частот коливань пластин. Він застосується, коли дві протилежні сторони пластини вільно оперті за будь-яких граничних умов на двох інших краях. Найбільш просте рішення виходить, коли всі краї пластини є вільно опертими. Але для ГС дане рішення не може бути застосовано. На практиці часто необхідно визначити власні частоти коливань конструкцій, які не задовольняють ці вимоги. У таких випадках застосовуються наближені методи Релея, Ритца, Бубнова-Гальоркіна та ін. [73-74].

За методом Релея власна частота визначається шляхом зіставлення виразів для кінетичної та потенційної енергії коливань системи.

Максимальні значення кінетичної і потенційної енергій пластин, які роблять одне з головних коливань, визначаються у вигляді:

$$\omega_0 = \frac{D}{\rho H} \frac{\int_0^a \int_0^b \left\{ (\Delta w)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy}{\int_0^a \int_0^b w^2 dx dy}, \quad (3.30)$$

де Δ – оператор Лапласа.

Власна форма коливань пластини запишеться у вигляді:

$$w_{if}(x, y) = w_i(x)w_f(y), \quad (3.31)$$

де $w_i(x)$, $w_f(y)$ – базисні функції.

Найбільш часто ці функції подаються у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} w_i(x) &= \sin k_i x + \bar{A}_i \cos k_i x + \bar{B}_i \sinh k_i x + \bar{C}_i \cosh k_i x \\ w_f(y) &= \sin k_f y + \bar{A}_f \cos k_f y + \bar{B}_f \sinh k_f y + \bar{C}_f \cosh k_f y \end{aligned} \right\}, \quad (3.32)$$

$$\text{де } k_i = \frac{\lambda_i}{a};$$

$$k_f = \frac{\lambda_f}{b};$$

a та b – розміри сторін пластини;

i та f – число напівхвиль синусоїди у напрямку осей x і y відповідно.

Коефіцієнти $\bar{A}_i, \bar{A}_f, \bar{B}_i, \bar{B}_f, \bar{C}_i, \bar{C}_f$ і параметри λ_i, λ_f визначаються із граничних умов.

Якщо на ГС є елементи, які необхідно розглядати як зосереджені маси m_0 , то значення максимальної кінетичної енергії визначаються за формулою

$$T_{\max} = \frac{m_0 \omega_0^2}{2} \int_{(S)} w^2(x, y) dS + \sum_{n=1}^S m_n w_n^2(x, y), \quad (3.34)$$

де $w_n(x, y)$ – максимальний прогин у точці зосередження n -ї маси.

Метод Релея дає добрі наближення для основного тону пластини, з збільшенням номера обертона точність зменшується.

Метод Рітца є розвитком методу Релея, тому його часто називають методом Релея-Рітца. Для пластин власна форма коливань визначається у вигляді ряду:

$$w(x, y) = \sum_{i,f=1}^n a_{if} w_{if}(x, y), \quad (3.35)$$

де $w_{if}(x, y)$ – базисні функції, які обираються відповідно до граничних умов;

a_{if} – коефіцієнти, що визначаються з умови екстремуму функціоналу $(T_{\max} - \Pi_{\max})$, тобто з рівняння

$$\frac{\partial}{\partial a_{if}} (T_{\max} - \Pi_{\max} = 0). \quad (3.36)$$

Знайшовши похідну, визначимо систему з n алгебричних рівнянь. Прирівнюючи до нуля визначник, складений із коефіцієнтів при a_i , отримуємо частотне рівняння, розв'язуючи яке, знайдемо n власних частот коливань. За допомогою цього методу отримані формули розрахунку пластин із різними способами закріплення.

$$\omega_i = \left(\frac{a_i}{a^2} \right) \sqrt{\frac{D}{mK_{EK}}}, \text{ рад/с}; \quad (3.37)$$

$$f_i = \left(\frac{a_i}{a^2} \right) \sqrt{\frac{D}{mK_{EK}}}, \text{ Гц}, \quad (3.38)$$

де K_{EK} – коефіцієнт, що враховує масу ЕК;

a – коефіцієнт, що залежить від способу закріплення пластини, співвідношення її сторін, номери обертони.

Формулу (3.38) можна привести до вигляду:

$$f = \frac{10^5 K_m K_{EK} B H}{a^2}, \quad (3.39)$$

де

$$K_m = \sqrt{\frac{E_{\rho c}}{E_{cp}}}, \quad (3.40)$$

де E – модуль пружності застосовуваного матеріалу;

E_c – модуль пружності сталі;

ρ – щільність застосовуваного матеріалу;

ρ_c – щільність сталі;

H – товщина ГС;

a – довжина ГС;

$$K_{EK} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_e}{m_{GC}}}}, \quad (3.41)$$

де m_e – маса елементів, рівномірно розміщених на ГС;

m_{GC} – маса ГС;

B – частотний коефіцієнт:

$$B = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_0}}. \quad (3.42)$$

Для наближених розрахунків спектру власних частот за різних граничних умов коефіцієнт α , що входить до формули (3.42), можна розрахувати за виразом

$$\alpha = \pi^2 \sqrt{A_i^4 + A_f^4 \beta^4 + 2\beta^2 [\sigma B_i B_f + (1 - \sigma) C_i C_f]}. \quad (3.43)$$

Виконаємо розрахунок перших двох власних частот коливань жорстко затисненої по контуру ГС з розмірами $a = b = 0,1$ м і товщиною $H = 50 \cdot 10^{-6}$ м. Матеріал ГС – поліімід, фольгований алюмінієм, $E = 10^{10}$ Па, $\sigma = 0,15$, $\rho = 2,6989 \cdot 10^3$ кг / м³. Маса ЕК на ГСдорівнює 0,053 кг.

Циліндрична жорсткість:

$$D = \frac{10^{10} \cdot (50 \cdot 10^{-6})^3}{12 \cdot (1 - 0,15^2)} = 0,426 \cdot 10^{-6} \text{ (Н/м)}.$$

З огляду на те, що на першій власній частоті коливань у напрямках x та y є по дві вузлові лінії (у місцях закріплення), для випадку $i = j = 2$ знаходимо:

$$\alpha_{22} = 3,14^2 \sqrt{1,506^4 + 1,506^4 + 2(0,15 \cdot 1,248^2 + (1 - 0,15)1,248^2)} = 39,09608.$$

Тоді:

$$f_{01} = \frac{39,09608}{2\pi \cdot 0,1^2} \sqrt{\frac{0,426 \cdot 10^{-6}}{2,6989 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5} + \frac{0,053}{0,1^2}}} = 0,17429 \text{ (Гц)}.$$

Для другої власної частоти коливань $i = 2, j = 3$:

$$\alpha_{23} = \pi^2 \sqrt{1,25^2 + 2,25^2 \cdot 0,94^4 + 2 \cdot 0,94^2 (0,15 \cdot 1,248 \cdot 4,66 + [1 - 0,15]1,248 \cdot 4,66)} = 39,822526.$$

$$f_{02} = 39,822526 \cdot 7,4 = 294,68669 \text{ (Гц)}.$$

3.5 Аналіз механізму утворення тріщин у провідниковій системі ГС

Алюміній, з якого виконана провідникова система розглянутих ГС, відноситься до крихких матеріалів.

Крихким називається матеріал, який зберігає пружні властивості аж до руйнування.

При теоретичному розрахунку міцності кристалічної решітки металу можна отримати більш високі значення міцності реальних деталей,

виготовлених з даного матеріалу.

В процесі виготовлення в деталі виникають різного роду мікродефекти і мікротріщини. При деякому значенні навантаженості ці тріщини своєю довжиною не збільшують, але при деяких значеннях навантаження вони приходять в рух і таким чином збільшують свою довжину. Одна з таких тріщин збільшує свій розмір швидше за інших до розмірів поперечного перерізу провідника і, таким чином, відбувається розрив провідника.

Руйнування крихкого матеріалу – результат розвитку тріщин, які були присутні в ньому спочатку. Гріффітс спробував визначити умову (критерій), після досягнення якого спочатку «сплячі» в матеріалі тріщини починають інтенсивно рости (перерозподіл енергії). Гріффітс припустив, що:

- щоб збільшити існуючу тріщину, потрібно додатково «порвати» матеріал у її вершини: створити всередині деталі дві вільні поверхні і «витратити» на це деяку енергію ΔW ;

- збільшення тріщини знижує напруги в її межах, при цьому «вивільняється» потенційна енергія ΔU .

Коли напруги досягнуть певного рівня, ΔU зрівняється з ΔW і тріщина почне рости самовільно.

Нехай є смужка з крихкого матеріалу, навантажена розтягуючою напругою σ . Товщина смужки t , уздовж смужки є тріщина довжиною l . Зона знижених напружень буде перебувати в районі тріщини. Припустимо, що ця зона має вигляд півкола радіусом l . В іншому обсязі напружений стан точок одинісний. Збільшимо значення тріщини на невелике значення Δl . Тоді зона знижених напружень збільшить свій радіус і стане більше на обсяг «кільця» шириною Δl .

При цьому виділиться кількість енергії:

$$U = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)]. \quad (3.44)$$

У всій смужці, за винятком розвантаженої області, має місце вираз:

$$\sigma_1 = \sigma, \quad \sigma_2 = 0, \quad \sigma_3 = 0.$$

Звідси потенційна енергія навантаженої частини полоси:

$$u = \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (3.45)$$

При збільшенні тріщини виділилася енергія:

$$\Delta u = u_0 \cdot \Delta V. \quad (3.46)$$

Об'єм півкола ΔV обчислюється таким чином:

$$\Delta V = \frac{1}{2}(2 \cdot \pi \cdot l) \cdot \Delta l \cdot t = \pi \cdot l \cdot \Delta l \cdot t, \quad (3.47)$$

де $\frac{1}{2}(2 \cdot \pi \cdot l)$ – довжина півкола;

Δl – товщина;

t – ширина тріщини.

Значить, потенційна енергія збільшиться на

$$\Delta u = u_0 \cdot \Delta V = \frac{\sigma^2}{2E} \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta l \cdot t. \quad (3.48)$$

Робота з розкриття тріщини (робота, витрачена на утворення двох вільних поверхонь):

$$\Delta W = 2 \cdot \gamma \cdot \Delta l \cdot t, \quad (3.49)$$

де $\gamma = 0,01 \cdot E \cdot r_0 \left[\frac{H \cdot \text{м}}{\text{м}^2} \right]$ – робота утворення одиниці площі вільної поверхні;

r_0 – відстань між атомами в ненавантаженому стані.

При $\Delta u < \Delta W$ тріщина не росте, а при $\Delta u > \Delta W$ відбувається самовільне зростання тріщини.

$\Delta u = \Delta W$ – критерій зростання тріщини, таким чином:

$$\frac{\sigma^2}{2E} \cdot \pi \cdot l \cdot \Delta l \cdot t = 2 \cdot \gamma \cdot \Delta l \cdot t. \quad (3.50)$$

$$\frac{\sigma^2 \pi \cdot l \cdot}{E} = 4 \cdot \gamma \text{ – енергетичний критерій Гріффітса.}$$

Цей критерій полягає у встановленні зв'язку між розтягуючими напруженнями σ і довжиною тріщини l .

Недолік формули Гріффітса полягає в тому, що вона застосовується до матеріалу з ідеально крихкими властивостями.

При застосуванні формули Гріффітса до інших крихким речовин (метали) виявилось, що вона дає занижені значення навантажень.

Крім енергетичного підходу (Гріффітса) до аналізу розвитку тріщин, заснованого на законі збереження і перетворення енергії, існує також силовий підхід (Ірвіна) до розгляду даного явища, що передбачає початок розвитку тріщини в тому випадку, коли напруги при її вершині досягнуть певного рівня.

Англійський вчений Ірвін припустив, що критерій Гріффітса дає занижені значення, тому що не враховує пластичність матеріалу (енергію, яка витрачається на пластичну деформацію в верхівці тріщини, яка її «гальмує»). Пластичні матеріали до тріщин малочутливі. Ірвін припустив, що в критерій

Гріффітса потрібно внести поправку – додати до питомої енергії утворення поверхонь питому енергію на пластичне деформування цих поверхонь. Формула отримала такий вигляд:

$$\frac{\sigma^2 \pi \cdot l \cdot}{E} = 4 \cdot (\gamma + \gamma_p), \quad (3.51)$$

де γ_p – робота пластичної деформації при утворенні одиниці поверхні; для сталі: $\gamma_p \approx 10^3 \cdot \gamma$ – саме настільки значна пластична робота і забезпечує добрий опір металів руйнування.

Розрахунки методами теорії пружності і теорії пластичності показали: величини головних напружень при вершині пропорційні множнику, іменованому коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН)

$$K = \sigma \cdot \sqrt{l} \cdot C, \quad (3.52)$$

де C – безрозмірний числовий коефіцієнт, що залежить від форми тріщини і самої деталі;

$$K = 1,12 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l} \text{ або } K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l} - \text{для різних варіантів розвитку тріщин.}$$

За збільшення напруження σ у деталі зрушення тріщини з місця починається після досягнення коефіцієнтом K деякого критичного значення K_c . K_c є такою ж характеристикою матеріалу, як і модуль пружності та визначається експериментально.

$$K_c = \sigma \cdot \sqrt{l} \cdot C. \quad (3.53)$$

Ця формула встановлює зв'язок між рівномірними напруженнями σ , що діють на тріщину, і довжиною цієї тріщини, починаючи з якої тріщина зростає самовільно:

$$\sigma < \frac{K_c}{C \cdot \sqrt{l}}. \quad (3.54)$$

Енергетичний метод (метод піддатливості) не вимагає дрібних елементів і місцевого згущення сітки. Відрізняється хорошою точністю. Відповідно до прямого методу:

- розраховується тіло з тріщиною довжиною l , підраховується пружна енергія U , або безпосередньо, або як робота зовнішніх сил;
- тріщині дається збільшення довжини Δl , знову проводиться розрахунок, визначається приріст ΔU ;
- розраховується інтенсивність звільнення пружної енергії:

$$G = \pm \frac{\partial U}{\partial l} \approx \frac{\Delta U}{\Delta l}; \quad (3.55)$$

- КІН з інтенсивністю звільнення пружної енергії пов'язаний формулами: - $G = (1 - \nu^2) \cdot \frac{K^2}{E}$ для плоского деформованого стану; $G = \frac{K^2}{E}$ – для плоского напруженого стану, де ν - коефіцієнт Пуассона.

Напруження навколо вершин тріщини виражаються формулою (3.56).

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{r}} \cdot f_{ij}(\theta). \quad (3.56)$$

Знаючи σ_{ij} з чисельного розрахунку і $f_{ij}(\theta)$ з розрахунку аналітичного можна обчислити K_I . Метод вимагає значного згущення сітки скінчених елементів (СЕ) навколо вершин тріщини. Використовувати слід квадратичні СЕ, довжина сторони яких при видаленні від вершини тріщини збільшується пропорційно $\sqrt{r}$.

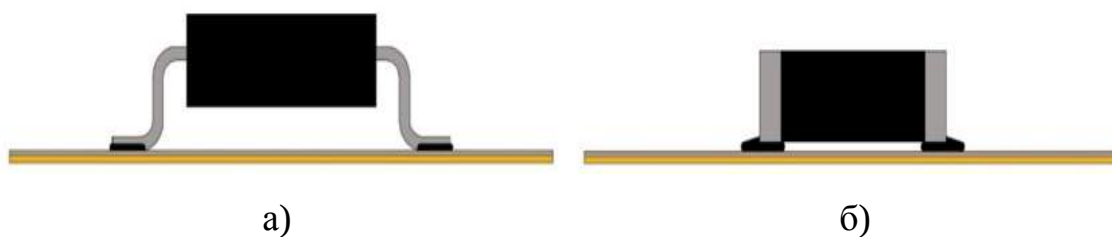
3.6 Аналіз можливих руйнувань електричного контакту «електронний компонент-основа ГС»

Дефекти основи ГС не є єдиною причиною виходу з ладу виробу ЕТ. Крім описаних вище, можуть також виникнути дефекти, що викликані виходом з ладу електронних компонентів і міжз'єднань «електронний компонент-основа ГС».

Поверхневий монтаж є основною технологією виготовлення електронних модулів на основі ГС. Для такого монтажу використовуються спеціальні компоненти, що монтуються на поверхню (КМП), тобто на контактні площадки на ГС. Руйнування електричного контакту «ЕК-основа ГС» (рис. 3.14) може відбуватися через дію двох основних впливів: критичного розтягування або вигину гнучкої основи.

Причинами руйнування є значна відмінність модулів пружності основи ГС і елементів, які на ньому встановлені.

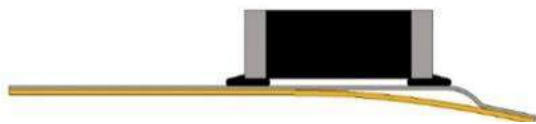
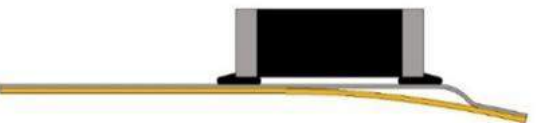
У таблиці 3.3 представлені основні види виникаючих дефектів електричних з'єднань.



а) елемент з дротовими/стрічковими виводами; б) КМП-елемент

Рисунок 3.14 – Установка елементів на ГС

Таблиця 3.3 – Дефекти електричних з'єднань «ЕК-основа ГС»

Елемент з дрововими/стрічковими виводами	КМП-елемент
Дефекти електричних з'єднань, що викликані неякісними паянням	
	
Дефекти електричних з'єднань, що викликані неякісною адгезією шарів фольгованого алюмінію та полііміду	
	
Дефекти електричних з'єднань і розрив провідників, що викликані деформацією типу «вигин»	
	
Дефекти електричних з'єднань під час розриву	
	

Можливими шляхами максимального зменшення можливості виникнення дефектів електричних з'єднань є:

- використання елементів навісного монтажу. Однак застосування даного виду монтажу викликає необхідність використовувати елементи з малою масою та невеликою кількістю виводів;

- можливість використання ультразвукового зварювання для з'єднання елементів з гнучкою основою за умови використання навісного монтажу (рис. 3.15). Однак даний вид з'єднання викликає необхідність використання

елементів із тонкими виводами з матеріалу фольги гнучкої основи. Також для створення зварних з'єднань ультразвуком виникає необхідність у створенні спеціальних вікон у полііміді. Даний вид з'єднання дозволить позбутися точок підвищеної концентрації механічних напружень, що виникають під час застосування припою;



Рисунок 3.15 – З'єднання елемента за допомогою зварювання

- розташування елементів вздовж лінії передбачуваних вигинів, що значно знизить їх деформацію та ймовірність виникнення дефектів також можливо шляхом,

3.7 Рекомендації з технологічного забезпечення якості ГС

На підставі проведеного аналізу видів деформацій, що виникають у ГС і призводять до їх руйнування, запропоновано наступні рекомендації з технологічного забезпечення якості ГС, які застосовуються у виробках ЕТ і МЕМС-компонентах:

- для зменшення впливу деформацій типу «вигин» на алюмінієву провідникову систему доцільно обирати поліімідний фольгований матеріал з більш тонким шаром алюмінію (за зберегання площі перерізу провідника за рахунок збільшення його ширини), що дозволить зменшити відстань від «нейтральної лінії» до граничних шарів провідника та призведе до зниження нормальних напружень у даних шарах і, у свою чергу, дозволить забезпечити менший радіус вигину ГС;

- під час виготовлення одношарових ГС є доцільним використання

захисного поліімідного покриття (рис. 3.16), що дозволить не тільки забезпечити більш високу ступінь захисту тонкої фольгової провідникової системи, але і дозволить змістити «нейтральну лінію» у центральні шари провідників [76]. У порівнянні з незахищеними (рис. 3.17), ГС із захисним поліімідним покриттям дозволять додатково знизити нормальні напруження у граничних шарах алюмінію;

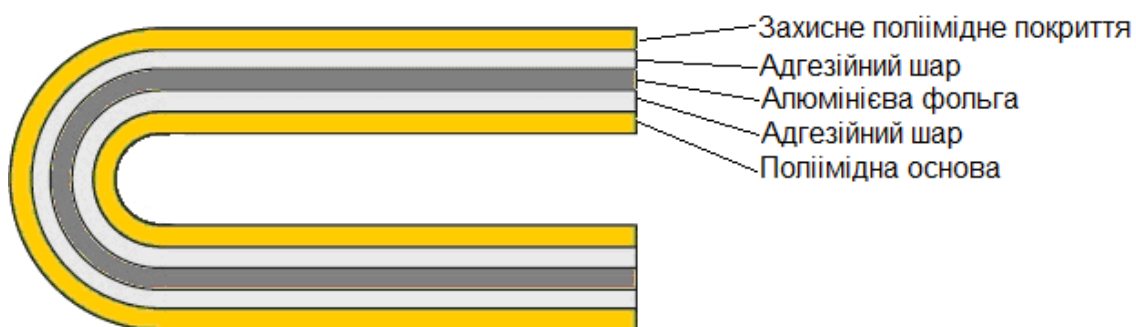


Рисунок 3.16 – Одношарова ГС із захисним поліімідним покриттям і адгезійним шаром

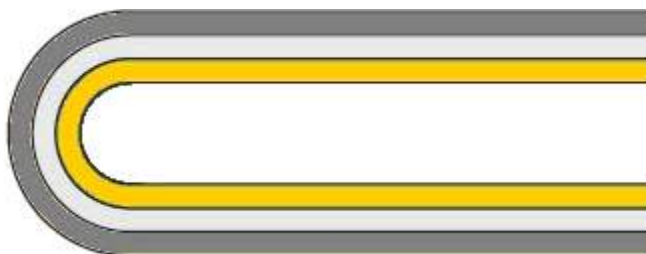


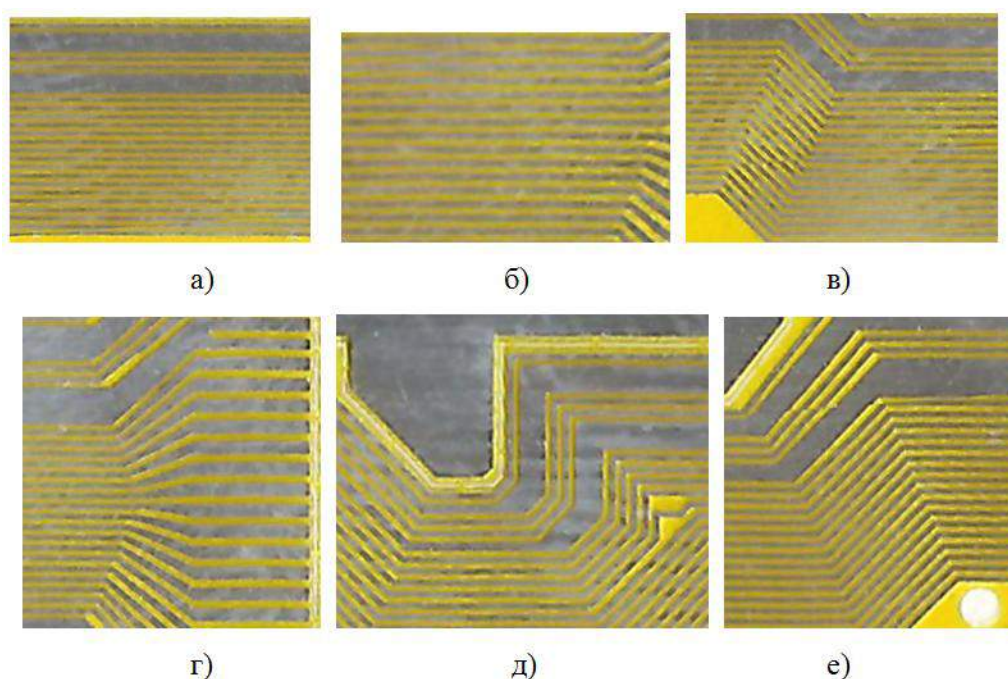
Рисунок 3.17 – Одношарова ГС з адгезійним шаром без захисного поліімідного покриття

- під час трасування ГС необхідно дотримуватися стратегії, яка дозволяє максимізувати динамічний час життя та надійність за статичної гнучкості. Для цього провідники у зоні ймовірних деформацій мають відповідати таким умовам:

- 1) перпендикулярність до напрямку вигину;
- 2) рівномірний розподіл вздовж області вигину;
- 3) максимальна ширина в області вигину;

- 4) відсутність додаткової нарощеної металізації;
- 5) постійна ширина;
- 6) «шахове» розташування у суміжних шарах (для багатошарових ГС);
- 7) кількість шарів у гнучкій частини має бути зведено до мінімуму (для багатошарових ГС);
- 8) металізовані наскрізні отвори не допускаються, для міжшарових з'єднань і для установки елементів на ГС доцільно використовувати УЗ-зварювання;
- 9) «нейтральна вісь вигину» повинна проходити через центр перерізу провідника.

На рис. 3.18 наведено варіанти бажаних, допустимих і неприпустимих змін провідників у зоні деформації.



а, б – бажана; в – допустима; г-е – неприпустима

Рисунок 3.18 – Варіанти конфігурацій провідників у зоні деформації

Зазначені вище вимоги з розробки топології ГС сприяють забезпеченню надійності ГС також і з точки зору забезпечення електромагнітної сумісності та зменшенню паразитних параметрів у процесі використання ГС у складі виробів ЕТ [77-78]. Більш детально дані вимоги описані в Додатку Е [79].

Під час розробки топології ГС бажаним є створення на її краях спеціальних технологічних зон металізації (невитравлених фольгованих елементів) для додаткового зміцнення ГС за умови деформацій типу «розрив». У даних зонах можуть бути розташовані реперні мітки для суміщення фотомасок і отворів ГС, тестові елементи для міжшарових з'єднань та ін. (рис. 3.19).

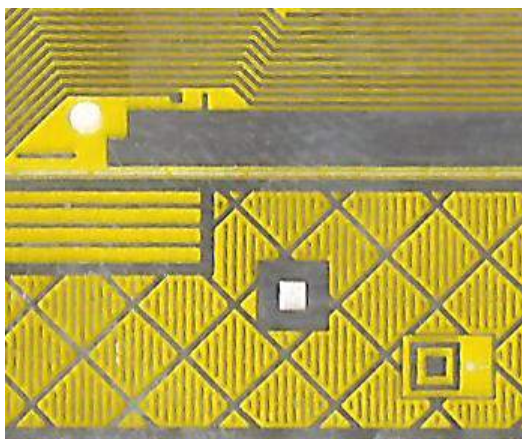


Рисунок 3.19 – Технологічна ділянка ГС

Висновки по розділу 3

У процесі розробки топології ГС необхідно максимально віддалити ЕК, встановлені на ГС, від зони деформації, або за ймовірних деформацій типу «вигин» розміщувати їх паралельно до лінії вигину, за деформацій типу «розтягнення» – перпендикулярно до вектора прикладення зусиль.

Для того щоб зменшити можливість виникнення тріщин у ГС необхідно використовувати додаткові «армуючі» покриття провідникової системи шляхом напилення на провідники матеріалів із більшою питомою жорсткістю.

У третьому розділі використано інформацію з джерел [28, 49, 73-79].

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНИХ ДІЙ НА ГС У ВИРОБАХ ЕТ

4.1 Аналіз дестабілізуючих факторів і визначення вхідних параметрів для проведення досліджень

Погіршення надійності та стабільності роботи ЕТ, що містять ГС, тісно пов'язане з механічними впливами. До найбільш небезпечних серед них можна віднести лінійні перевантаження, вібрації та удари [80-83].

У результаті впливу вібрацій, ударів і лінійних прискорень можуть мати місце такі пошкодження виробів ЕТ на основі ГС [84]:

- порушення герметичності внаслідок руйнування паяних, зварних і клейових швів і поява тріщин у металоскляних частинах;
- повне руйнування корпусу виробу ЕТ або окремих його частин у результаті механічного резонансу або втоми;
- обрив монтажних зв'язків, у тому числі зовнішніх контактів;
- відшарування друкованих провідників;
- відрив навісних ЕК;
- розшарування багатошарових ДП та ГС;
- розтріскування керамічних і сітлових підкладок;
- тимчасовий або остаточний вихід з ладу рознімних і нерознімних електричних контактів (у реле, з'єднувачах, ланцюгах заземлення, екранування тощо);
- модуляція розмірів хвильоводних трактів, коаксіальних кабелів, конденсаторів змінної ємності, коливальних контурів, електровакуумних приладів;
- зміна паразитних зв'язків;
- зміщення положення органів налаштування та управління;
- зміна вихідних параметрів елементів.

Таким чином, механічні впливи на вироби ЕТ на основі ГС, у тому числі і МЕМС-компоненти, можуть спричинити зміни діаграм спрямованості антен, збої цифрових пристроїв, зниження чутливості та зміщення частотного діапазону, підвищення енергоспоживання (за короткого замикання), зниження точності роботи. Це є найбільш ймовірним у тих випадках, коли компоненти ЕТ одночасно піддаються різним впливам: вібраціям, ударам, лінійним прискоренням, монтажним зусиллям (під час зварювання, паяння, сполучення зі з'єднувачами тощо), а також внутрішнім напруженням, що виникли у результаті полімеризації.

Також встановлено, що відмова у виробі ЕТ може наступити, по-перше, через руйнування елемента ЕТ, і, по-друге, через відхилення його вихідних параметрів від номінального значення. Істотним у нашому випадку є те, що під дією механічних впливів відбувається зміна вихідних параметрів виробів ЕТ на основі ГС [85-86].

За умови впливу вібрацій вразливим місцем ГС є котушки індуктивності та їх вихідні параметри. Використання плоских котушок індуктивності є досить актуальним у сучасній електроніці, але водночас 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 [87-88].

4.2 Експериментальні дослідження впливу вібрацій на вихідні параметри ЕТ на основі ГС

4.2.1 Постановка завдань дослідження

На основі проведеного аналізу сформульовано завдання подальших досліджень. У результаті проведення експерименту необхідно:

- визначити частоту власних коливань для тестового зразка ГС;

- визначити час, необхідний для виходу з ладу тестового зразка під впливом механічних коливань із частотою, близькою до резонансної. Виходом з ладу вважається припинення нормального функціонування виробу ЕТ на основі ГС у результаті руйнування електричних з'єднань у ГС або порушення цілісності друкованих провідників;

- визначити вплив механічних коливань на вихідні параметри ЕТ.

За умовами експерименту ГС жорстко кріпиться з двох протилежних сторін. За допомогою спеціалізованого механізму проводиться її натягіння для виключення її прогинання під дією навісних ЕК.

4.2.2 Принцип дії та опис конструкції випробувального устаткування

Відповідними стандартами передбачені різні види випробувань ЕТ на механічні впливи. Визначено і ступені жорсткості випробувань, кількість яких є різною для різних видів впливів. Так, наприклад, для вібрацій встановлено 14 ступенів жорсткості, для ударів – 4 і т. д.

Для відтворення вібрацій використовуються механічні, електродинамічні, гідравлічні, п'єзоелектричні та інші різновиди вібростендів. Найбільшого поширення під час випробувань виробів ЕТ отримали електродинамічні та механічні вібростенди.

Лінійні навантаження відтворюють на центрифугах (обертових дисках), що створюють у горизонтальній площині радіально-спрямовані прискорення.

У процесі виробництва виробів ЕТ на основі ГС можливі наступні види випробувань:

- виявлення резонансних частот;
- випробування на вібростійкість;
- випробування на віброміцність;
- випробування на ударну міцність;
- вплив одиночних ударів;
- вплив лінійних (відцентрових) навантажень;
- вплив акустичних шумів.

Випробуванням на виявлення резонансних частот піддаються нові конструкції модулів ЕТ. Подальші їх випробування визначаються умовами експлуатації, і на вплив найбільш типових видів навантажень виробу мають бути випробувані. Визначальною умовою, що дозволяє вибрати найбільш раціональний метод випробувань, є інформація про значення резонансних частот виробів, отримані розрахунковим або експериментальним шляхом. Наприклад, якщо власна частота ГС перевищує верхню частоту діапазону діючих вібрацій більш ніж у 1,5 рази, то застосовується метод випробувань на одній фіксованій частоті. Якщо резонансні частоти не встановлені, то застосовується метод коливних частот. Якщо об'єкт має не менше чотирьох власних частот у заданому діапазоні, використовується метод випадкової вібрації.

Таким чином, головною метою створення випробувального стенду є симуляція періодичних вібрацій із різними параметрами амплітуди та частоти. Для дослідження параметрів вібрації доцільно використовувати інтелектуальні датчики прискорення.

З урахуванням типових розмірів ГС для проведення необхідних експериментальних досліджень впливу вібрацій та інших механічних дій на виробу ЕТ, виконані на основі ГС, були запропоновані нові конструкції експериментальних стендів.

4.2.3 Низькочастотний вібростенд для контролю параметрів ЕТ на основі ГС

У ході дисертаційних досліджень було подано заявку й отримано патент України на корисну модель «Низькочастотний вібростенд» (№ U201504766 від 18.05.2015 р). Запропонований стенд може бути використаний як вібростенд для вимірювання параметрів виробів ЕТ на основі ГС і компонентів МЕМС у низькочастотному діапазоні [24].

На рис. 4.1, а схематично зображено низькочастотний вібростенд. Він містить досліджуваний зразок 1, встановлений на предметному столику 2,

з'єднаний зі станиною 12 за допомогою телескопічних направляючих 3, 4, 5 та 6. Пружний елемент 7 встановлено на електронному блоці 8, який містить підсилювач, аналогово-цифровий перетворювач, систему цифрового зв'язку, пристрій широтно-імпульсного управління та блок живлення. Двигун 9, вал якого нерухомо з'єднаний з диском з ексцентриковим кріпленням у вигляді спіралеподібних прорізів 10, жорстко закріплений на станині 12. Диск 10 («програмний диск») виконано з можливістю рухомого з'єднання зі сполучною планкою 11. Цей диск для зміни амплітуди має проріз 13, виконану у вигляді спіралі, а також отвір 14 для кріплення диска на валу двигуна 9 (рис. 4.1, б).

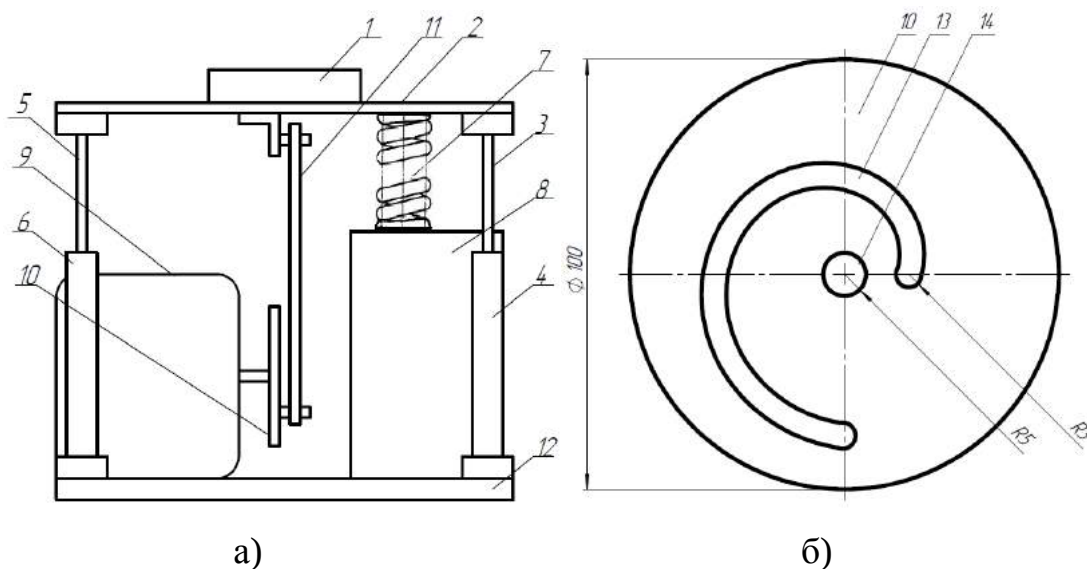


Рисунок 4.1 – Конструкція низькочастотного вібростенда

Виконання з'єднання вала двигуна зі сполучною планкою 11 через диск з ексцентриковим кріпленням у вигляді спіралеподібної прорізі 13 дозволяє лінійно змінювати амплітуду коливань предметного столика.

Електронний блок із пристроєм широтно-імпульсного управління дозволяє плавно змінювати частоту обертання вала двигуна.

Пружний елемент у вигляді пружини зменшує паразитні коливання, які виникають під час роботи конструкції, сприяє підвищенню надійності пристрою та точності результатів вимірювань.

4.2.4 Проведення експериментальних досліджень

Для проведення випробувань як тестовий зразок обрано автоколивальний контур на основі котушки індуктивності, виконаної безпосередньо на поверхні ГС.

Завданнями експерименту є:

- дослідження зміни індуктивності котушки за різних параметрів вібрації;
- виявлення резонансної частоти власних коливань досліджуваного зразка ГС.

Для проведення експерименту використовується одностороння ГС з нанесеною на неї котушкою індуктивності (рис. 4.2). Така котушка індуктивності може формуватися, наприклад, для виготовлення LC-генератора на гнучкій друкованій основі.

Досліджувана котушка індуктивності має наступні параметри:

- внутрішній діаметр становить 15 мм;
- зовнішній діаметр – 40 мм.

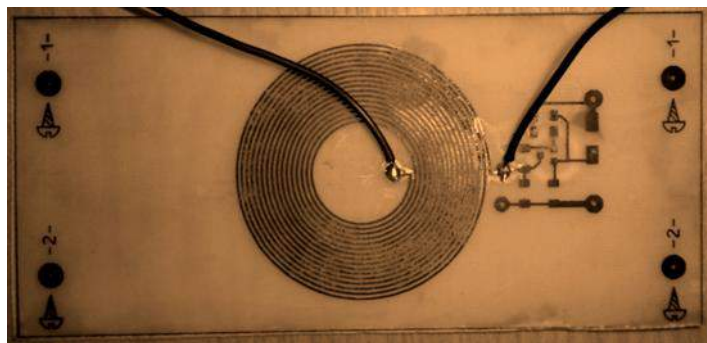


Рисунок 4.2 – Досліджуваний зразок ГС

Відомо, що найбільшу небезпеку становлять резонанси окремих компонентів і вузлів, що виникають у випадках, коли їхня власна частота f_0 збігається із частотою вібрацій f , що діють на модулі. Поведінка конструкції за умови впливу механічних коливань залежить від співвідношення діючої та власної частот конструкції, що має назву коефіцієнту розладу

$$y = \frac{f}{f_0}. \quad (4.1)$$

Для віброізолюючих систем цей коефіцієнт обирають більшим за 1,41, а для жорстко закріплених компонентів – з діапазону 0,3 ... 0,8.

За $y = 1$ режим відповідає резонансному. Однією з основних причин вібрацій і резонансів є наявність зазорів між деталями та люфтів у з'єднаннях. Чим вищою є частота коливань, тим за меншого зазору може виникнути резонанс. Зони контакту деталей за умови їх зіткнення є центрами збудження механічних коливань.

Резонансну частоту ГС можна визначити з виразу

$$f_0 = \frac{K\alpha}{2\pi\alpha^2} \sqrt{\frac{D}{m}} K_{EK} K_{GC}, \quad (4.2)$$

де $K\alpha$ – коефіцієнт, що залежить від способу закріплення ГС;

α – довжина плати;

D – циліндрична жорсткість пластини;

m – маса ГС;

K_{EK} – коефіцієнт, що враховує масу електронних компонентів, розміщених на ГС;

K_{GC} – коефіцієнт, що враховує матеріал ГС.

Визначимо теоретичне значення резонансної частоти досліджуваної ГС, яка має у своєму складі котушку індуктивності. Плата має наступні характеристики:

- розміри 110×50 мм;
- щільність матеріалу $\rho = 2,47 \cdot 10^3$ кг/м³;
- коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,279$;
- модуль пружності для плати $E = 3,3 \cdot 10^{10}$ Н/м²;

- модуль пружності сталевій пластини, відносно якої виконується розрахунок за допомогою відомих розрахункових співвідношень, $E_{cm} = 22 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$;

- щільність сталевій пластини $\rho_{cm} = 7,82 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;

- товщина ГС $h = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

- площа ГС $S_{GC} = 120 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Коефіцієнт, що залежить від способу кріплення ГС, $K\alpha = 22,37$.

Циліндрична жорсткість матеріалу ГС дорівнюватиме

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = 0,316 \text{ (Н/м)}. \quad (4.3)$$

Маса друкованої ГС

$$Q_{GC} = \rho_{GC} S_{GC} h_{GC} = 0,033 \text{ (кг)}.$$

Зведена до площі пластини маса ЕК і ГС

$$\frac{Q_{EK} + Q_{GC}}{S_{GC}} = 2,72 \text{ (кг/м}^2\text{)}. \quad (4.4)$$

Коефіцієнт, що враховує матеріал ГС, дорівнює

$$K_M = \sqrt{\frac{E\rho_{cm}}{E_{cm}\rho}} = 0,689. \quad (4.5)$$

Оскільки котушка індуктивності виконана друкованим способом і додаткових елементів плата не містить, приймаємо коефіцієнт, що враховує масу ЕК, розміщених на ГС, $K_{EK} = 1$.

Визначаємо частоту власних коливань друкованої плати:

$$f_0 = \frac{K\alpha}{2\pi\alpha^2} \sqrt{\frac{D}{m}} K_{EK} K_{ДП} = 172 \text{ (Гц)}. \quad (4.6)$$

Спочатку було досліджено зміну параметрів котушки індуктивності за механічної деформації ГС. Індуктивність котушки у статичному положенні без впливу деформації $L_{СТАТ} = 8,10 - 8,11$ мкГн. Результати досліджень наведено у додатку Ж.

Наступним етапом експериментальних досліджень є дослідження зміни вихідних параметрів ГС під дією механічних вібрацій. Дослідження розділене на кілька етапів. Оскільки програмний диск має три положення для зміни амплітуди, відповідно дослідження виконувалися для трьох значень амплітуди і трьох значень частоти.

Для проведення експерименту досліджуваний зразок був закріплений на робочій поверхні з двох сторін. Датчики відстежували параметри вібрації робочої поверхні та самої ГС. На рис. 4.3 зображений підготовлений і налаштований для випробувань стенд.

Для наочності на рис. 4.3 використані такі позначення: 1 – прилад для вимірювання індуктивності; 2 – досліджуваний зразок – ГС із котушкою індуктивності; 3 – датчик параметрів ГС; 4 – датчик параметрів робочої поверхні; 5 – електродвигун.

Дані з датчиків виводяться на осцилограф.

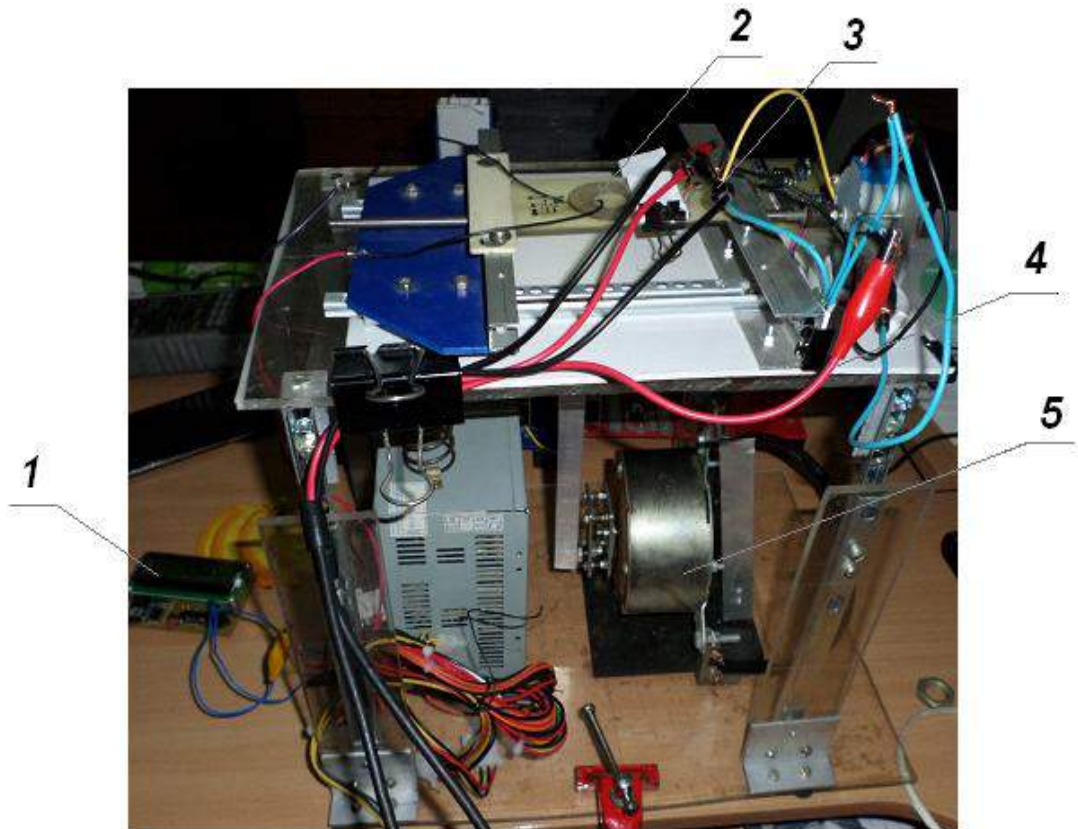


Рисунок 4.3 – Стенд для випробувань ГС

Експеримент №1. Випробування відбувались за максимальної амплітуди та трьох різних частот. Амплітуда становить 18 мм. Параметри та результати експерименту наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри першого експерименту

Напруга двигуна, В	Частота, Гц	Відхилення індуктивності, мкГн
14,5	5,882	$\pm 0,04$
12	7,194	$\pm 0,07$
9	9,569	$\pm 0,05$

На рис. 4.4 зображені показники датчиків відповідно до характеру механічних вібрацій за напруги двигуна 14,5 В.

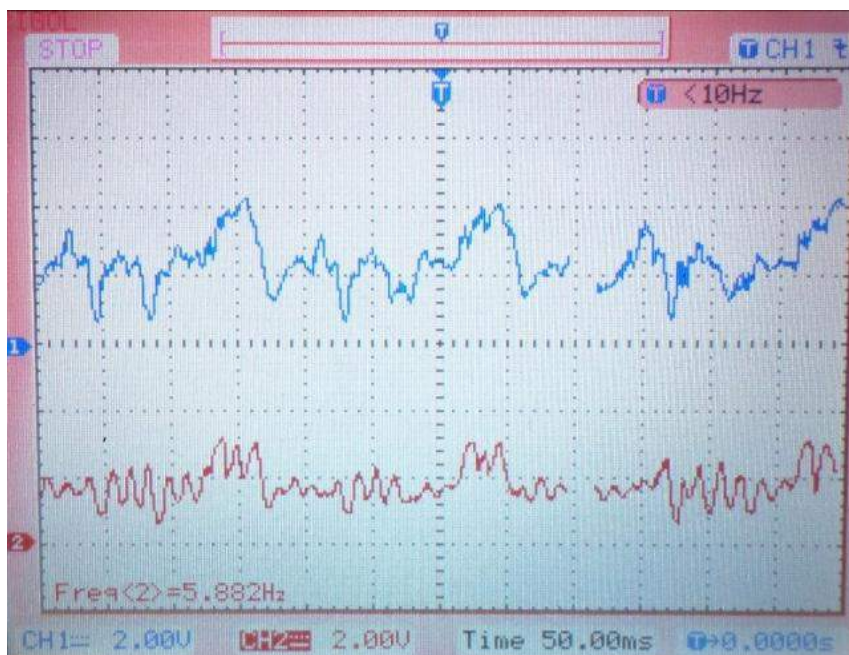


Рисунок 4.4 – Порівняльна характеристика показань двох датчиків за напруги 14,5 В

Верхній графік відображає показання датчика, встановленого на робочій платформі, а нижній – відповідно показання датчика, встановленого на дослідному зразку.

Експеримент №2. Дослідження проходили за середньої амплітуди та для чотирьох різних частот. Параметри та результати експерименту зведені до табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри другого експерименту

Напруга двигуна, В	Частота датчика робочої зони, Гц	Частота датчика ГС, Гц	Відхилення індуктивності, мкГн
14	18,02	36,36	$\pm 0,10$
12	6,55	22,22	$\pm 0,06$
9	6,80	39,22	$\pm 0,07$
5	6,58	8,43	$\pm 0,04$

Експеримент №3. Дослідження проводяться з використанням найменшої амплітуди для чотирьох різних частот. Результати та параметри дослідження наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри третього експерименту

Напруга двигуна, В	Частота датчика робочої зони, Гц	Частота датчика ГС, Гц	Відхилення індуктивності, мкГн
14	18,32	60,61	$\pm 0,07$
12	6,92	40	$\pm 0,06$
9	9,80	35,9	$\pm 0,07$
5	6,993	40,82	$\pm 0,04$

4.2.5 Аналіз результатів експериментальних досліджень

У результаті проведених експериментальних досліджень були отримані дані, відповідно до яких можна провести побудову й аналіз залежностей вихідних параметрів котушки індуктивності за впливів на неї вібрацій різної частоти.

У табл. 4.4 наведені результати експериментальних досліджень залежності зміни індуктивності від частоти зовнішніх гармонійних коливань для першого експерименту.

Таблиця 4.4 – Результати експериментальних досліджень

Номер вимірювання	Частота, Гц								
	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
	Зміна індуктивності, мкГн								
1	0,040	0,045	0,053	0,060	0,070	0,065	0,060	0,053	0,050
2	0,042	0,047	0,060	0,064	0,070	0,060	0,058	0,052	0,050
3	0,040	0,045	0,055	0,060	0,070	0,066	0,060	0,055	0,050
4	0,041	0,045	0,055	0,062	0,070	0,067	0,060	0,056	0,050
5	0,039	0,045	0,055	0,060	0,071	0,065	0,061	0,058	0,054
6	0,041	0,045	0,054	0,060	0,070	0,065	0,060	0,054	0,051
7	0,041	0,046	0,055	0,060	0,070	0,066	0,060	0,057	0,050
8	0,041	0,045	0,056	0,060	0,071	0,065	0,062	0,053	0,051
9	0,040	0,045	0,054	0,062	0,070	0,066	0,059	0,054	0,052
10	0,042	0,045	0,053	0,060	0,069	0,065	0,061	0,058	0,050
11	0,042	0,046	0,053	0,060	0,072	0,065	0,060	0,054	0,050
12	0,040	0,045	0,053	0,060	0,070	0,068	0,060	0,055	0,052
13	0,040	0,045	0,050	0,060	0,070	0,066	0,059	0,053	0,052
14	0,040	0,045	0,053	0,060	0,070	0,065	0,060	0,053	0,050
15	0,042	0,050	0,054	0,060	0,069	0,065	0,061	0,053	0,050

На рис. 4.5 зображено графік залежності індуктивності L друкованої котушки, виконаної на основі ГС, від частоти прикладених коливань f для 15 експериментів P .

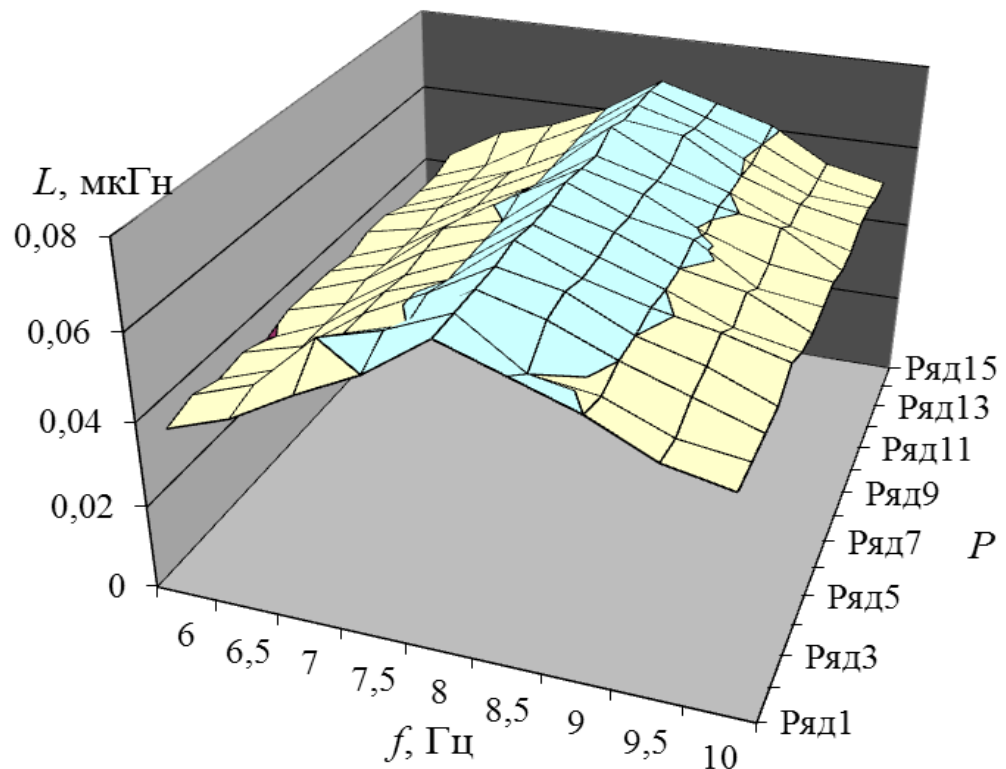


Рисунок 4.5 – Залежність індуктивності від частоти

У табл. 4.5 наведені результати експериментальних досліджень залежності зміни індуктивності від частоти зовнішніх гармонійних коливань для другого експерименту.

Таблиця 4.5 – Результати зміни індуктивності для другого експерименту

Номер вимірювання	Частота, Гц									
	8	11	15	18	21	25	28	31	35	38
	Зміна індуктивності, мкГн									
1	0,04	0,045	0,049	0,056	0,06	0,075	0,085	0,1	0,08	0,07
2	0,04	0,048	0,052	0,057	0,068	0,07	0,089	0,103	0,082	0,068
3	0,041	0,046	0,049	0,058	0,062	0,072	0,084	0,1	0,082	0,07
4	0,041	0,045	0,048	0,056	0,067	0,075	0,086	0,1	0,082	0,07
5	0,039	0,048	0,056	0,059	0,062	0,076	0,085	0,101	0,079	0,074

Продовження табл. 4.5

Номер вимірювання	Частота, Гц									
	8	11	15	18	21	25	28	31	35	38
	Зміна індуктивності, мкГн									
6	0,04	0,046	0,05	0,056	0,059	0,074	0,082	0,102	0,09	0,07
7	0,04	0,046	0,053	0,058	0,065	0,075	0,085	0,104	0,082	0,062
8	0,042	0,049	0,055	0,059	0,062	0,075	0,08	0,105	0,085	0,06
9	0,04	0,046	0,049	0,056	0,062	0,075	0,085	0,102	0,085	0,071
10	0,04	0,045	0,053	0,056	0,065	0,075	0,088	0,103	0,09	0,071
11	0,042	0,049	0,052	0,054	0,07	0,08	0,085	0,1	0,09	0,07
12	0,04	0,046	0,049	0,057	0,062	0,076	0,085	0,102	0,085	0,07
13	0,04	0,046	0,048	0,057	0,062	0,076	0,085	0,1	0,085	0,07
14	0,04	0,045	0,047	0,056	0,06	0,075	0,085	0,1	0,08	0,07
15	0,04	0,045	0,049	0,056	0,06	0,075	0,085	0,1	0,08	0,07

На рисунку 4.6 зображено графік залежності зміни вихідних параметрів друкованої котушки індуктивності L , виконаної на гнучкій платі, від частоти прикладених коливань f для 15 експериментів P .

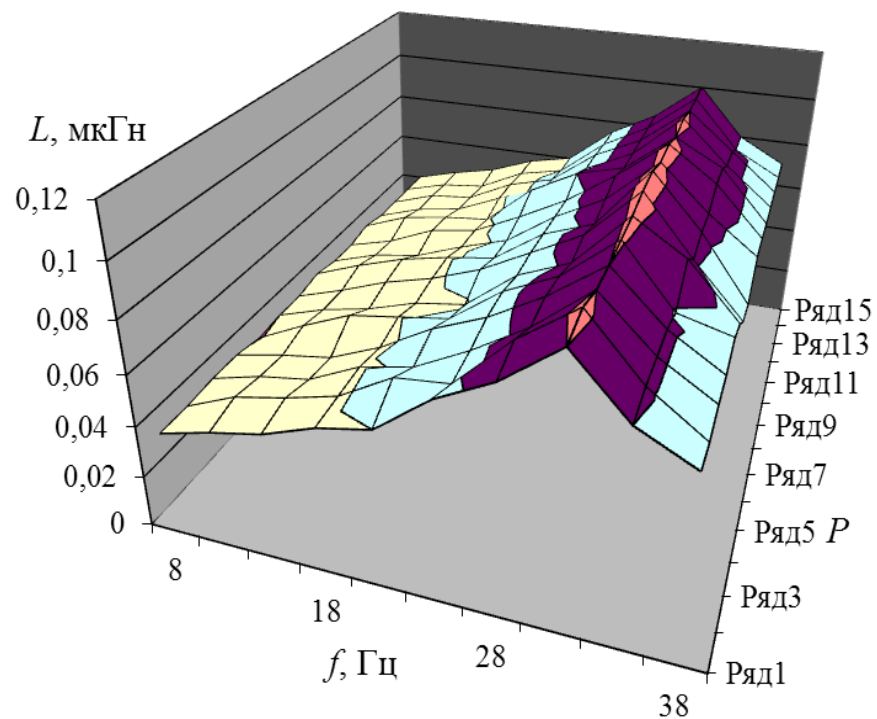


Рисунок 4.6 – Залежність індуктивності від частоти для 15 експериментів

У таблиці 4.6 наведені результати експериментальних досліджень залежності зміни індуктивності від частоти зовнішніх гармонійних коливань для третього експерименту.

Таблиця 4.6 – Зміна індуктивності у залежності від частоти зовнішніх гармонійних коливань для третього експерименту

№ з/п	Частота, Гц									
	30	33	36	40	43	46	50	53	56	60
	Зміна індуктивності, мкГн									
1	0,071	0,062	0,04	0,049	0,05	0,052	0,057	0,06	0,062	0,07
2	0,07	0,063	0,041	0,048	0,051	0,053	0,057	0,061	0,062	0,07
3	0,072	0,06	0,039	0,049	0,051	0,053	0,057	0,061	0,062	0,071
4	0,07	0,065	0,042	0,047	0,051	0,053	0,057	0,059	0,062	0,071
5	0,07	0,061	0,038	0,048	0,051	0,053	0,057	0,06	0,063	0,069
6	0,07	0,059	0,038	0,047	0,05	0,052	0,057	0,059	0,062	0,071
7	0,069	0,06	0,04	0,049	0,05	0,052	0,056	0,06	0,063	0,07
8	0,07	0,06	0,038	0,049	0,051	0,052	0,057	0,061	0,062	0,07
9	0,07	0,059	0,037	0,049	0,05	0,052	0,057	0,06	0,062	0,07
10	0,07	0,06	0,04	0,049	0,05	0,052	0,057	0,06	0,063	0,07
11	0,07	0,06	0,04	0,049	0,05	0,052	0,059	0,06	0,062	0,07
12	0,07	0,06	0,038	0,05	0,05	0,052	0,057	0,06	0,062	0,07
13	0,07	0,06	0,04	0,049	0,051	0,053	0,056	0,06	0,065	0,07
14	0,07	0,06	0,039	0,049	0,050	0,053	0,059	0,06	0,062	0,07
15	0,07	0,06	0,037	0,048	0,05	0,052	0,059	0,06	0,065	0,07

На рисунку 4.7 зображено графік залежності зміни вихідних параметрів друкованої котушки індуктивності L , виконаної на гнучкій основі, від частоти прикладених коливань f для 15 експериментів P .

Відповідно до проведених досліджень і отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

- встановлено, що у результаті деформації котушки змінюється спрямованість магнітного поля, що викликає відхилення індуктивності до $\pm 0,11$ мкГн за умови перегину через центр котушки;

- за зміни амплітуди коливань вихідні параметри котушки індуктивності та показники датчиків змінюються не суттєво;

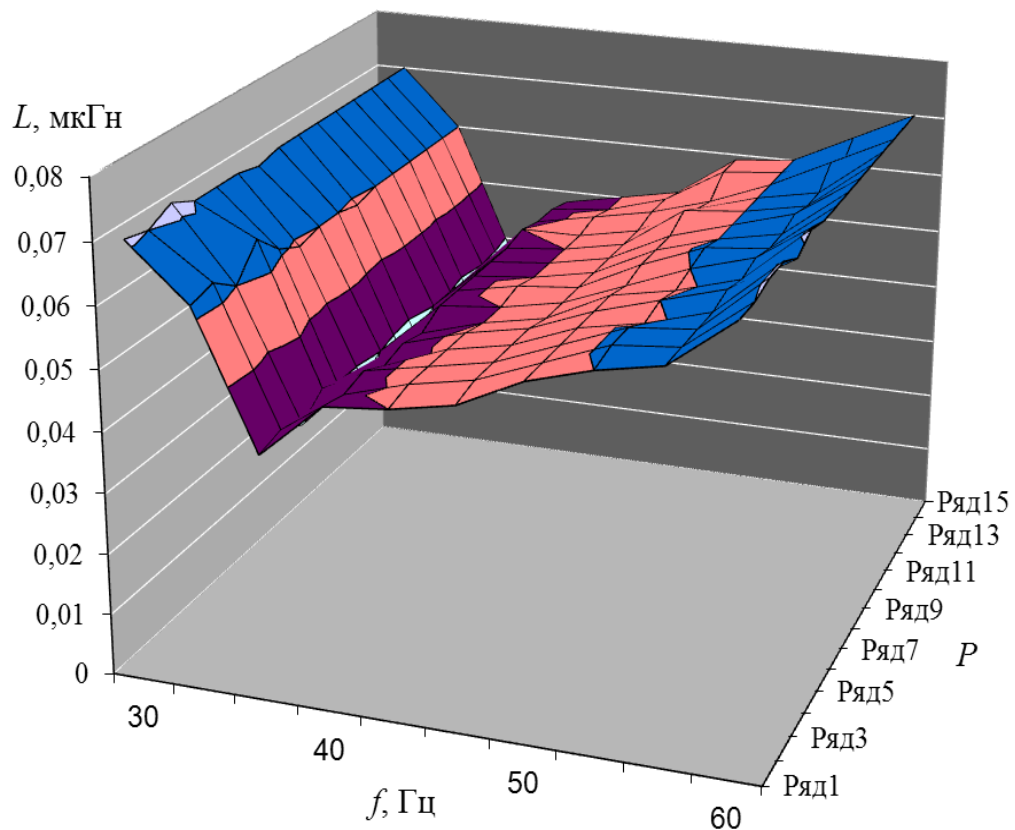


Рисунок 4.7 – Залежність індуктивності від частоти
для 15 експериментів

- найбільше відхилення параметрів відбувається зі збільшенням частоти, тобто чим більшою є частота коливань, тим більше відхилення індуктивності маємо на виході. Спостерігаються відхилення як у сторону збільшення індуктивності, так і її зменшення. Максимальне відхилення під час дослідження становило близько 1%;

- дослідження проводилися з використанням двох датчиків, показники датчиків різні, обумовлено це різними матеріалами поверхонь, на які їх було встановлено. В цілому показання датчика, встановленого на дослідному зразку, повторюють траєкторію робочої поверхні, відповідно графіки мають схожу форму коливань. На рисунку 4.8 зображені поєднані показання двох датчиків за мінімальної амплітуди та напруги електродвигуна 14 В;

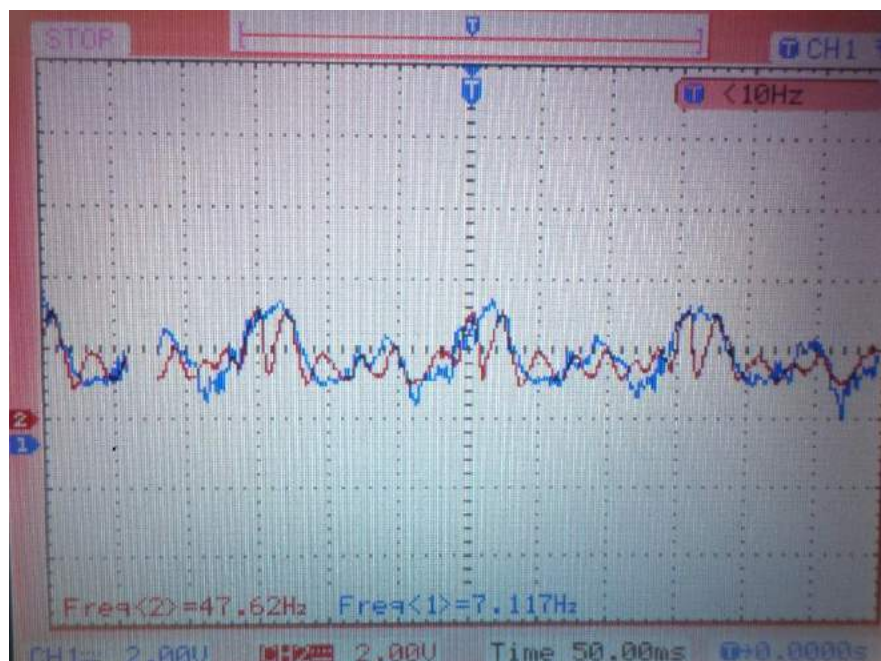


Рисунок 4.8 – Порівняльна характеристика форми коливань
двох датчиків

- теоретично розрахована частота власних коливань ГС становить 172 Гц. Досягти резонансної частоти не вдалося. Обумовлено це може бути тим, що у випробувальному стенді було використано слабкий двигун. Максимальна частота коливань, якої вдалося досягти, становить 60,61 Гц, при цьому відхилення вихідного параметра котушки сягало 0,07 мкГн. Теоретично за умови досягнення резонансу відхилення параметрів має стати ще більшим;

- не відбулося і руйнування виводів ГС і металевих елементів. Обумовлено це може бути тим, що дослідження проводилося протягом обмеженого часу. У разі більш тривалого дослідження, зокрема, з досягненням частоти власних коливань ГС, подібне руйнування може відбутися;

- навіть без досягнення резонансної частоти спостерігалось істотне відхилення вихідних параметрів котушки індуктивності, що в умовах критичності даних параметрів (наприклад, за умови зміни добротності) може бути істотним і викличе відмови у роботі ЕТ.

Як відомо, частота автоколивань LC-генератора впершому наближенні визначається резонансною частотою LC-контура:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (4.7)$$

де L – індуктивність котушки;

C – ємність конденсатора;

ω_0 – резонансна частота.

Численні схеми автогенераторів LC-типу розрізняються в основному схемами введення сигналу зворотного зв'язку та способами підключення до підсилювача коливального контуру.

На рисунку 4.9 наведена схема LC-генератора, використовуваного як тестовий зразок для проведення експериментальних досліджень.

Як видно з рисунка 4.9, джерело живлення E підключене до частини витків котушки індуктивності L , що зменшує його шунтуючу дію та підвищує добротність коливального контуру LC_1 . Опір розділового конденсатора C_2 на частоті коливань близький до нуля.

Номінали ЕК, які використовуються у схемі: C_1 – 1000 пФ; L – 8,1 мкГн. Тоді, за формулою (4.7), частота автоколивань LC-генератора складає 1769285,209 Гц.

Для кількісної оцінки стійкості автоколивань часто вводять коефіцієнт регенерації. Це безрозмірний коефіцієнт, що характеризує режим роботи автогенератора та показує, у скільки разів можна зменшити добротність Q коливальної системи у порівнянні з її вихідним значенням, щоб автогенератор виявився на межі зриву коливань:

$$Q = \frac{X_L}{R}, \quad (4.8)$$

де X_L – реактивний опір індуктивності контуру;

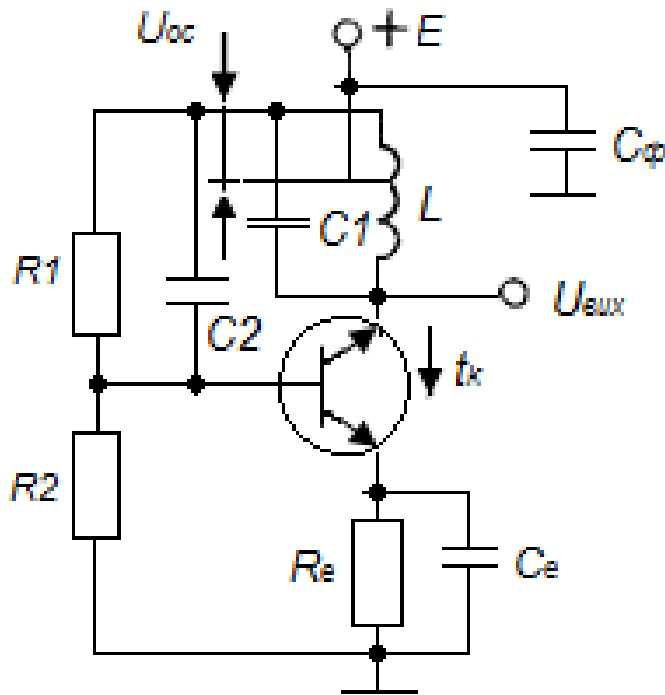


Рисунок 4.9 – Схема LC-генератора

R – еквівалентний активний опір контуру, що включає і опір активного елемента, що шунтує його. У низькочастотних автогенераторах коефіцієнт регенерації зазвичай є не меншим за 1,5 – 3,0.

Слід зазначити, що у транзисторних генераторах джерело збуджуючих коливань має, як правило, малий внутрішній опір. Отже, у ланцюзі бази протікає струм несинусоїдної форми, а напруга база-емітер залишається синусоїдальною.

Після проведення експериментальних досліджень були отримані відхилення значення індуктивності L від заданої у результаті впливу на тестовий зразок механічних коливань.

Виходячи з результатів експериментів, значення індуктивності лежать у межах 7,99 ... 8,1 мкГн.

Добротність коливального контуру визначається за формулою:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}, \quad (4.9)$$

де ω_0 – резонансна частота, Гц;

R – активний опір, Ом.

Зменшення добротності може призвести до спотворень форми автоколивань і появи додаткової нестабільності частоти. Для запобігання цього добротність коливального контуру обирають не меншою за 30-70.

За формулою (4.9) для індуктивності 7,99 мкГн добротність контуру становитиме 142,33, а для індуктивності 8,10 мкГн – 143,31. Різниця становить 0,98, тобто приблизно 0,7 %. Максимальне ж відхилення індуктивності за умови впливу низькочастотних вібрацій становить 1,25 %.

Таким чином, результати експерименту показали, що коливальний контур, виконаний на гнучкій основі, має досить високу добротність для даного класу генераторів.

Однак водночас слід зауважити, що для високодобротних резонансних систем навіть такі незначні коливання індуктивності можуть призвести до суттєвих змін резонансної частоти цих систем та, у деяких випадках, наприклад, до зриву генерації.

4.3 Дослідження механічних деформацій ГС

4.3.1 Опис експериментальної установки для дослідження впливу механічних навантажень на ГС

Для дослідження результатів впливу знакозмінних навантажень, а також величини тиску, який може привести до руйнування рознімного з'єднання (наприклад, ГС із ZIF-з'єднувачем), було розроблено стенд для динамічних досліджень, який дозволяє створювати тиск на будь-яку область ГС із зусиллям від 0 до 70 Н, а також поперемінно впливати на різні сторони ГС у поперечній площині з частотою від 0 до 100 Гц [26]. Ескіз та фотографія експериментального стенду представлені на рис. 4.10, а і рис. 4.10, б відповідно.

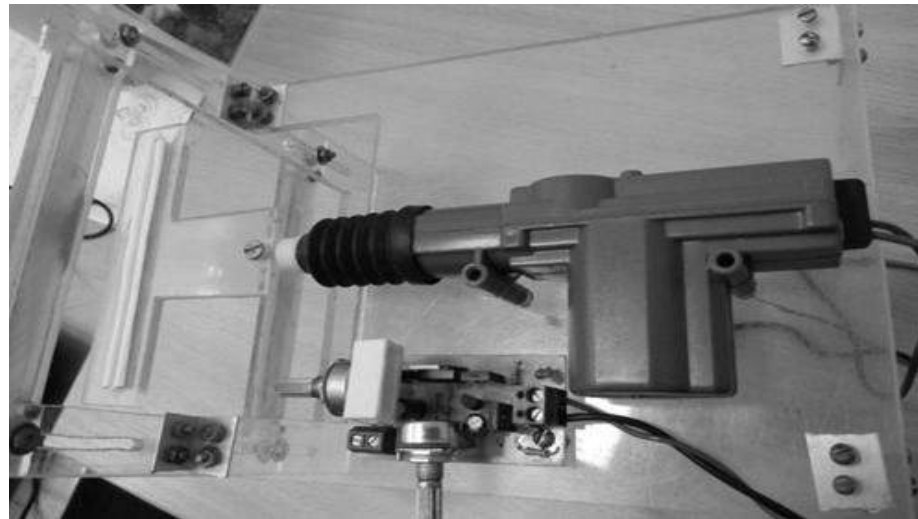
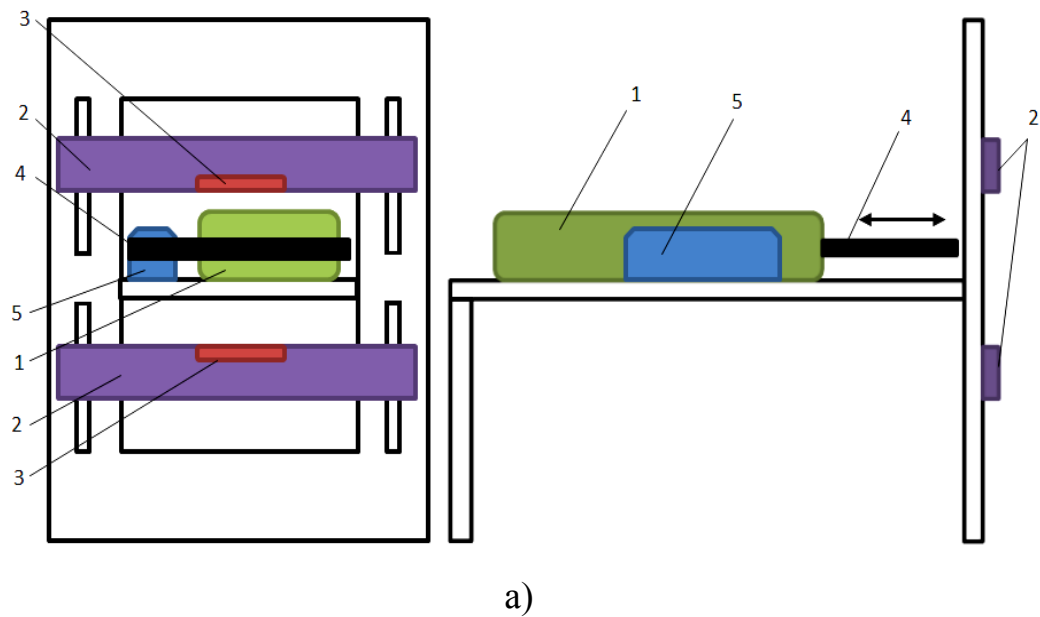


Рисунок 4.10 – Експериментальний стенд
для динамічних випробувань ГС

На рис. 4.13: позиція 1 – штовхач, виконаний на основі соленоїда, з можливістю спрацьовування в обидва напрямки у залежності від полярності прикладеної напруги; 2 – вертикально рухомих деталей рамки кріплення ГС, які виконані на основі друкованих плат і дозволяють встановлювати різні натяг і положення ГС; 3 – 40-вивідні ZIF-з'єднувачі для електричного та механічного з'єднання гнучкого шлейфа з жорсткою частиною модуля ЕТ; 4 – деталь із прорізом, у якому розміщується гнучкий шлейф для подальшого

впливу поступального руху штовхача; 5 – плата управління режимом роботи штовхача.

Робоче поле даної установки має розміри 150×70 мм, що дозволяє закріпити тестові зразки ГС відповідних розмірів, що мають різну конфігурацію друкованих провідників і широкий діапазон товщини діелектричної основи.

4.3.2 Проведення експерименту із визначення тиску, необхідного для руйнування рознімного з'єднання ГС

Для проведення експерименту тестовий зразок (рис. 4.11, а), що має групу контактних площинок (рис. 4.11, б), був закріплений ZIF FPC-з'єднувачем таким чином, щоб максимальний вплив штовхача мав місце в області з'єднувача [89].

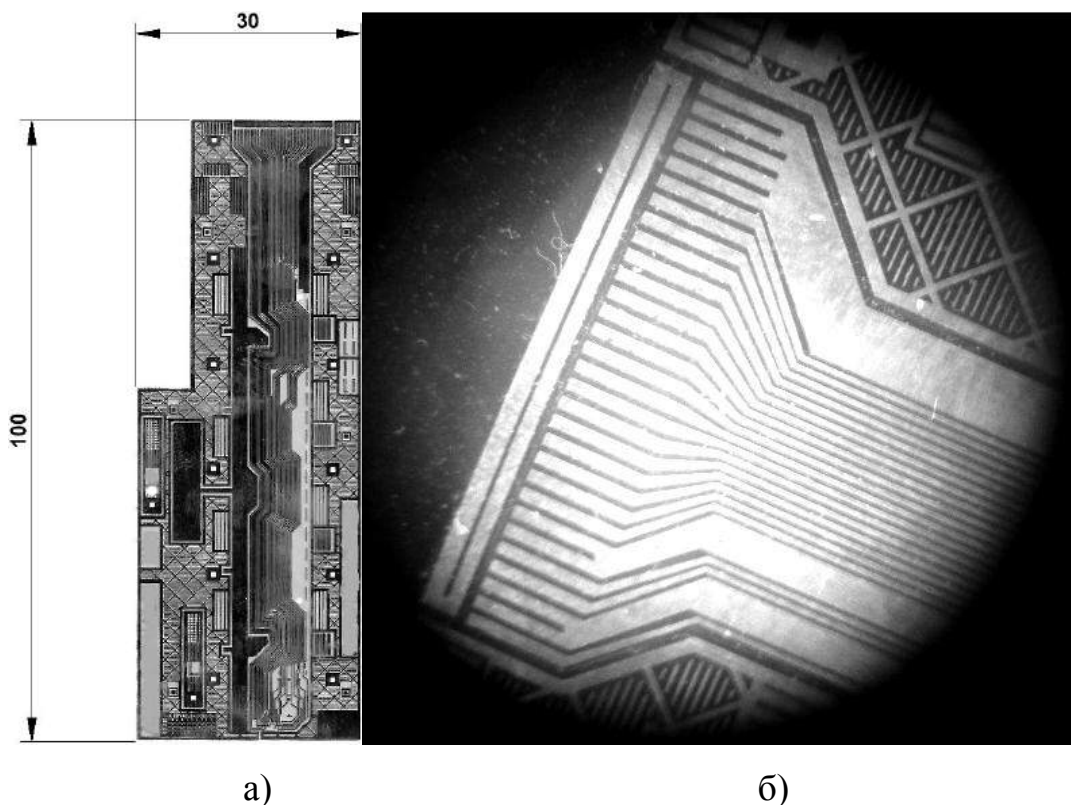


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд тестового зразка (а)
та його контактних площинок (б)

Тестовий зразок ГС виконаний із фольгованого діелектрика – полііміду марки ФДИ-А-50 (з товщиною поліімідного шару 20 мкм і алюмінію – 30 мкм) за субтрактивною технологією.

На даний зразок здійснювався вплив штовхача із наростаючою силою (від 0 до 5 Н) до тих пір, поки останній не було вирвано зі з'єднувача.

У результаті експерименту було визначено, що з силою $F_{\text{крит}} \approx 5 \text{ Н}$ досліджувані ГС вириваються зі з'єднувача, зразки після цього мають вигляд, представлений на рис. 4.12.

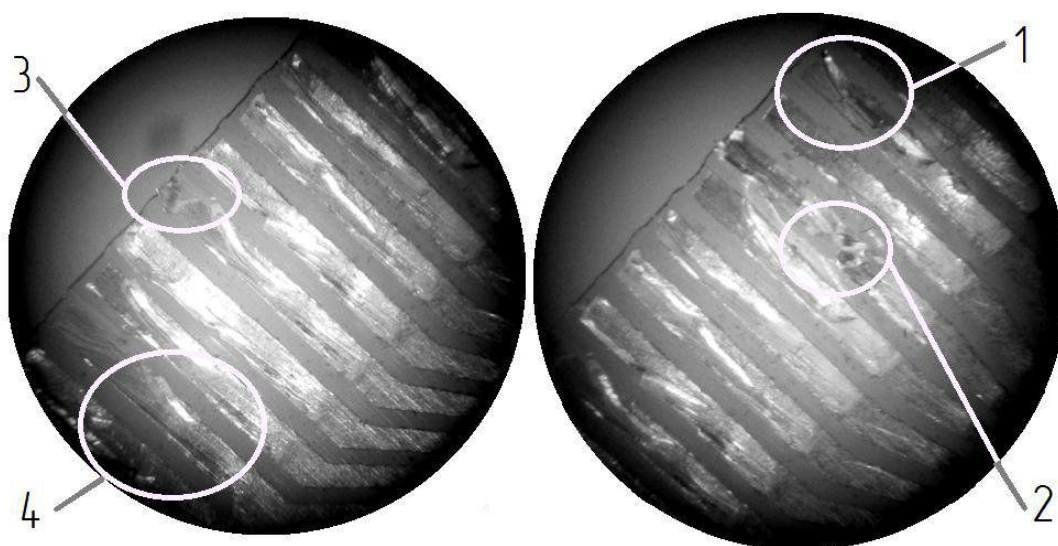


Рисунок 4.12 – Вигляд зразків ГС після проведення експерименту

Як видно з рис. 4.12, у зазначених областях на зразку спостерігаються значні деформації провідників, а саме:

- їх відшаровування (1);
- викривлення кромek (2);
- розрив (3);
- утворення тріщин на поверхні провідників (4).

Виходячи з отриманих результатів експерименту, можна зробити висновок, що за наростаючої сили, яка спрямована на руйнування рознімного з'єднання, виконаного на основі ZIF FPC-з'єднувача, відбувається деформація струмопровідних доріжок ГС.

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 [90].

4.4 Дослідження деградації діелектричної основи ГС

4.4.1 Експериментальна установка для дослідження електричного пробою діелектриків

В основі пробою твердих діелектриків лежать електронні процеси ударної іонізації. Пробій настає миттєво, не залежить від часу дії напруги і пов'язаний з руйнуванням молекулярної та кристалічної структури матеріалу. Вирішальним фактором при цьому є напруженість електричного поля.

Для дослідження механізму електричного пробою діелектричної основи ГС застосована універсальна пробивна установка УПУ-1М. Установка призначена для випробування ізоляційних матеріалів змінною синусоїдальною напругою частотою 50 Гц і випрямленою напругою негативної полярності, регульованою у межах від 0 до 250 кВ із вихідним струмом до 100 мА. Дана установка застосовується в електротехніці та енергетиці. Вона розрахована на експлуатацію у приміщеннях або під навісом за робочих значень температури повітря від 5 °С до 40 °С, відносної вологості до 80 % (за 20 °С) і атмосферного тиску від 84 до 106,7 кПа. Живлення – однофазна мережа синусоїдального змінного струму напругою (220 ± 20) В, частотою (50 ± 1) Гц.

Зовнішній вигляд УПУ-1М, а також конструкція електродів представлені на рис. 4.13, а і рис. 4.13, б відповідно.

4.4.2 Експеримент із визначення напруги, необхідної для пробою основи ГС під час її експлуатації у нормальних умовах

Для проведення експерименту тестовий зразок ГС (рис. 4.13, а) закріплювався між контактами установки УПУ-1М, після чого відбувалося поступове наростання напруженості електричного поля в області тестового зразка.



а)



б)

Рисунок 4.13 – Зовнішній вигляд установки УПУ-1М (а)
і конструкція електродів (б)

У результаті експерименту було зафіксовано значення напруги пробою основи ГС, яка експлуатується у нормальних умовах; воно становило близько 25 кВ.

У результаті пробою зразок має вигляд, представлений на рис. 4.14.

Як видно з рис. 4.14, діелектрична основа ГС зазнала механічного пошкодження в області максимальної концентрації напруженості електричного поля.

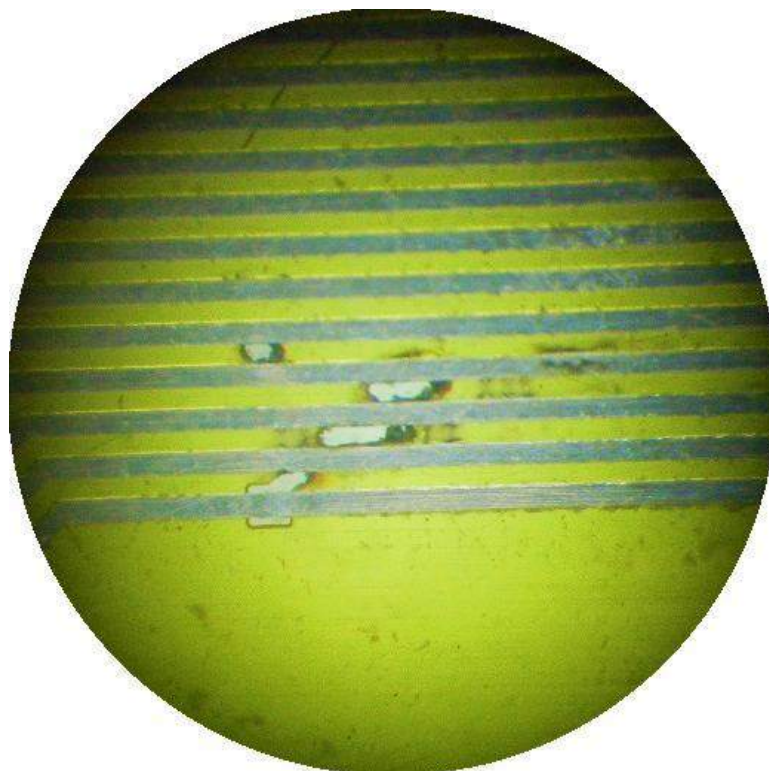


Рисунок 4.14 – Вигляд тестового зразка після електричного пробою

4.4.3 Експеримент із дослідження електричного пробою основи ГС за її експлуатації в умовах із підвищеною вологістю

Для проведення експерименту із визначення граничної напруженості електричного поля, що викликає пробій основи ГС, за її експлуатації в умовах із підвищеною вологістю, тестовий зразок було поміщено в воду на кілька діб. Після вилучення та просушування, ГС було розміщено між контактами установки УПУ-1М і досліджено на пробій.

У ході експерименту було виявлено, що пробій діелектричної основи настає за значення напруги близько 35–40 кВ. При цьому тестовий зразок має вигляд, представлений на рис. 4.15.

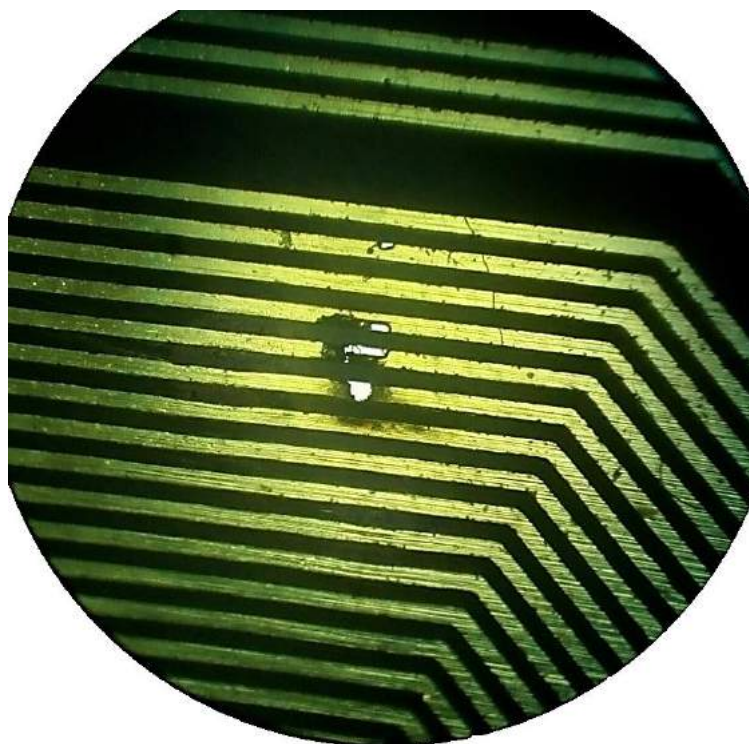


Рисунок 4.15 – Вигляд тестового зразка ГС, яка експлуатується в умовах із підвищеною вологістю, після електричного пробою

Як видно з рис. 4.15, область механічного руйнування більш локалізована, ніж область руйнування зразка, який експлуатується у нормальних умовах. Результати такого роду пов'язані з тим, що другий зразок був більш знежиреним і очищеним.

4.4.4 Експеримент із дослідження електричного пробою основи ГС за імітації експлуатації в умовах морського середовища

Для проведення експерименту із визначення граничної напруги необхідної для пробою основи ГС за імітації її експлуатації в умовах морського середовища, тестовий зразок знаходився у солоній воді протягом декількох діб. Після сушіння ГС також піддавалася дослідженню на електричний пробій.

У результаті експерименту було зафіксовано, що пробій діелектричної основи настає за значення напруги близько 35 кВ. При цьому тестовий зразок має вигляд, представлений на рис. 4.16.

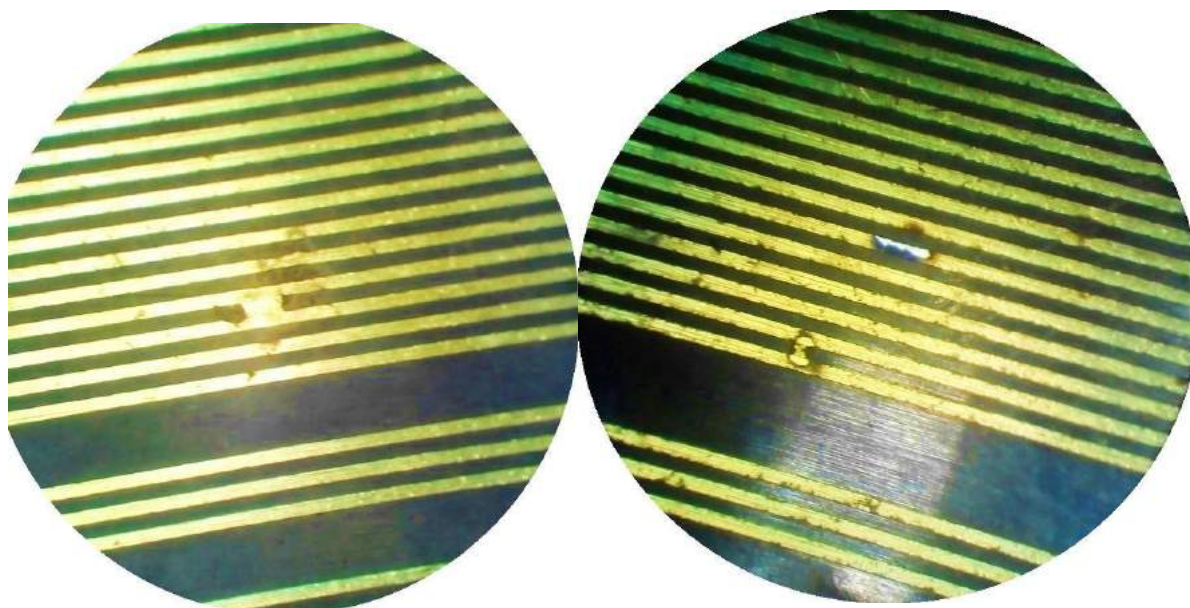


Рисунок 4.16 – Вигляд тестового зразка ГС, яка експлуатується в умовах із підвищеними вологістю та концентрацією солі, після електричного пробою

4.5 Дослідження зразка ГС на механічний розрив

4.5.1 Експериментальна установка для дослідження механічного розриву

Машина розривна ИР 5047-50 для випробування полімерних виробів із найбільшим граничним навантаженням 5000 кгс призначена для випробування полімерів на розрив і деформацію за нормальної температури.

Машина може бути також використана для випробувань зразків із гуми, текстильних матеріалів, чорних і кольорових металів та інших матеріалів у межах її технічних можливостей.

Машина призначена для роботи у приміщеннях лабораторного типу.

Зовнішній вигляд установки ИР 5047-50 представлений на рис. 4.17.



Рисунок 4.17 – Зовнішній вигляд розривної машини IP 5047-50

4.5.2 Експеримент із дослідження механічного розриву ГС

Для проведення експерименту тестові зразки було закріплено у розривній машині IP 5047-50, після чого вони підлягали розтягуванню. У результаті експерименту було виявлено, що розрив одношарової ГС на основі полііміда ФДИ-А-50, показаної на рис. 4.11, настає за подачі навантаження у 10–12 Н [91].

У результаті тестові зразки мають вигляд, представлений на рис. 4.18.

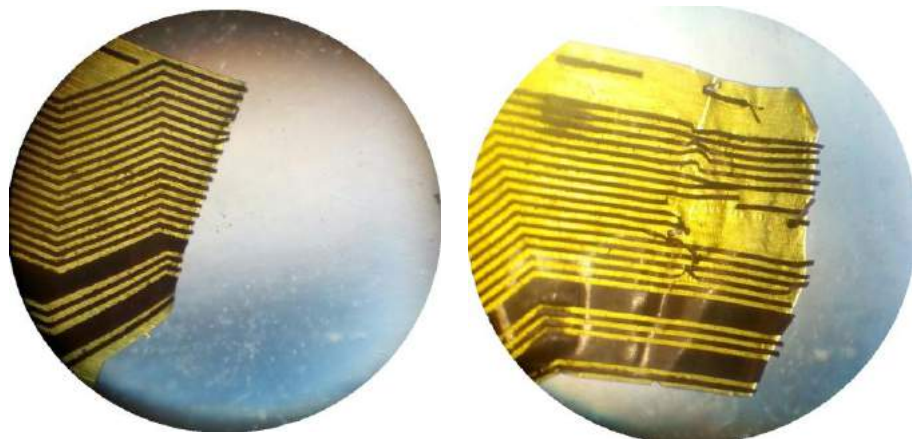


Рисунок 4.18 – Вигляд тестових зразків після випробування на розрив

4.6 Моделювання напружено-деформованого стану ГС

Вплив зовнішніх факторів викликає високу ймовірність відмов виробів ЕТ, як під час проведення випробувань, так і під час експлуатації. Експериментальні дослідження виробів ЕТ під час їх проектування є трудомісткими та у більшості випадків не дозволяють оцінити тривалу працездатність модулів за механічних впливів на них, оскільки час випробувань апаратури за номінальних навантажень сягає десятків тисяч годин, що практично не можливо реалізувати.

Віртуальні випробування покликані, насамперед, зменшити загальну кількість натурних випробувань на виробництві, знизивши таким чином витрати фінансових і часових ресурсів на відпрацювання як нових, так і типових виробів [92]. Таким чином, досить актуальною є задача комп'ютерного моделювання ГС у складі виробів ЕТ для аналізу їх втомної міцності за механічних впливів.

Практичне застосування аналітичних методів для вирішення завдань динаміки конструкцій виробів ЕТ пов'язане із багатьма труднощами. Конструкції сучасних виробів ЕТ на основі ГС є складними механічними системами із великою кількістю пружних і жорстких зв'язків, із неklasичними з точки зору механіки способами закріплення окремих конструктивних елементів. Крім того, електронні компоненти являють собою механічні конструкції, у яких можуть виникати резонансні коливання, які посилюють механічні навантаження у десятки разів [93-94].

Для такої механічної системи складно побудувати розрахункову модель, що була б досить простою та водночас такою, що добре відображала б фізичні та динамічні властивості. Під час складання та вирішення рівнянь руху конструкції виникає низка математичних труднощів [95].

Ці причини зумовлюють необхідність застосування чисельних методів для розрахунку динамічних параметрів конструкцій виробів ЕТ, що дозволить підвищити якість розроблюваних ЕТ на основі ГС, які будуть

відповідати вимогам нормативно-технічної документації з механічних характеристик; скоротити терміни та вартість їх створення за рахунок застосування засобів автоматизації моделювання механічних процесів у ГС і оцінки часу до втомного руйнування [96-98].

Завдання моделювання механічних полів у конструкціях виробів ЕТ, що працюють в умовах складних зовнішніх механічних впливів, виникають у зв'язку із необхідністю виконання динамічних розрахунків, із метою визначення запасів міцності конструкцій, обчислення власних резонансних частот і коефіцієнтів посилення на них, обчислення навантажень, що впливають на елементи виробів ЕТ. Подібні завдання відносяться до нестационарних крайових задач теорії пружності. Одним із методів вирішення подібних завдань є метод скінченних елементів (МСЕ).

МСЕ є на цей час найбільш простим числовим методом для вирішення подібного роду завдань механіки деформованого твердого тіла; він успішно застосовується для розрахунку конструкцій практично будь-якої складності, систем, що мають складну геометричну конфігурацію та нерегулярну фізичну структуру завдяки властивій йому універсальності й алгоритмічності [95, 99-100].

У МСЕ знаходження функції, яка описує стан системи, зводиться до побудови деякого сімейства функцій, визначених за допомогою кінцевого числа параметрів, тобто до відшукування кінцевого числа її наближених значень у окремих точках – вузлах (додаток К).

Важливим завданням є моделювання напружено-деформованого стану (НДС) ГС на етапі експлуатації виробів ЕТ.

У цей час у процесі аналізу конструкцій і їх елементів крім традиційної задачі визначення НДС усе частіше розглядаються задачі визначення ресурсу конструкцій. Одним із питань, які необхідно вивчити у даному випадку, є питання умов руйнування конструкцій.

Під час вирішення завдання оцінки втомної довговічності традиційно виділяють такі основні етапи [99-100]:

- визначення небезпечної точки (перетину) у конструкції, у якій локалізований процес руйнування за багатоциклової втоми;
- визначення історії навантаження в обраній небезпечній точці;
- завдання властивостей матеріалу;
- завдання характеристик конструкції або її елемента, що впливають на досліджуваний процес;
- розрахунок втомної довговічності.

Продовжимо розглядати ГС з полііміду зі сторонами 100×50 мм. З урахуванням геометрії досліджуваного об'єкта, способу застосування зовнішнього впливу й умов закріплення у конструкції можна виділити площину симетрії А-А, що перпендикулярна до площини креслення (проходить вздовж лінії дії сили) і ділить деталь навпіл (рис. 4.19). Тому під час розрахунків будемо розглядати тільки одну половину конструкції, виділену зазначеною вище площиною, до якої прикладена сила $F_A = 0,5F$.

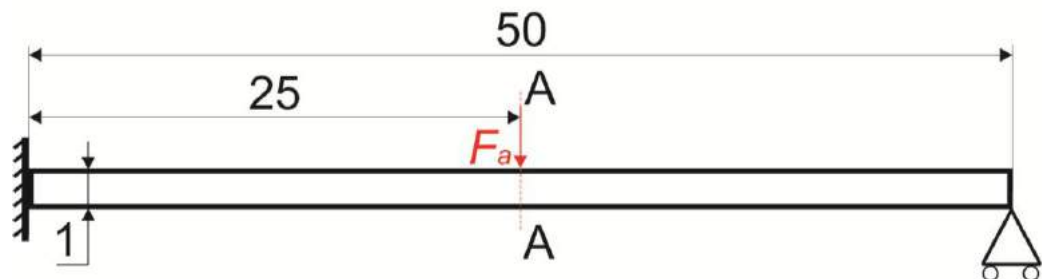


Рисунок 4.19 – Розрахункова схема конструкції ГС

Діаграма втоми для матеріалу ГС за умови вигину представлена у табличному вигляді (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Діаграма втоми для полііміду

N	100	1000	10000	100000	1000000	10000000
σ_a , кПа	0,65	0,5	0,45	0,3	0,2	0,1

Оцінимо максимальне пошкодження, що виникає у ГС після 100 циклів навантаження. На рис. 4.20 представлена кінцево-елементна сітка для даної конструкції.

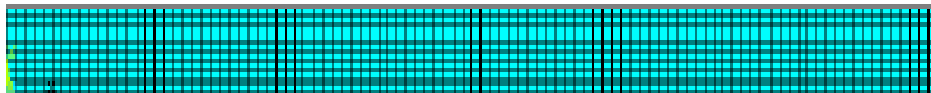


Рисунок 4.20 – Кінцево-елементна сітка конструкції ГС

Результати статичного розрахунку даної конструкції за результуючого навантаження $F_a = 20 \text{ Н}$ у вигляді розподілу нормальних напружень σ_{xx} (Па) наведені на рис. 4.21.

Знайдемо число циклів до руйнування дослідного елемента конструкції. З урахуванням знайденого значення пошкодження, накопиченого за 100 циклів навантаження, що дорівнює 0,00001, число циклів до руйнування N дорівнюватиме 10000000.

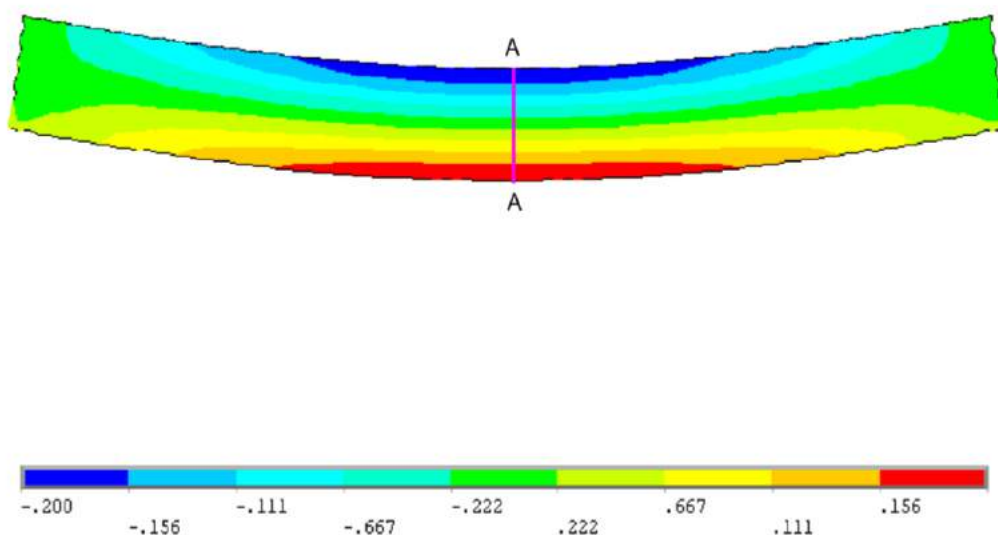


Рисунок 4.21 – Розподіл нормальних напружень у ГС

Як видно з рис. 4.21, під час деформації ГС знаходиться у стані чистого вигину: шари з внутрішньої сторони стискаються, шари із зовнішнього боку розтягуються. Чим сильніше згинається ГС, тим більшою є концентрація

механічних напружень. Оскільки конструкція ГС є однорідною, то близький до середини шар є нейтральною лінією поперечного перерізу, площиною, у якій матеріал не піддається значному розтягуванню або стисненню (нормальні напруження практично дорівнюють нулю ($\sigma_{xx} \approx 0$), показано синім кольором). Чим далі шари знаходяться від нейтральної лінії, тим більшою у них є концентрація механічних напружень, максимальна концентрація механічних напружень досягається у приповерхневих шарах.

За результатами обчислень побудовані розподіли обраних параметрів для тестової ГС, які наведені на рис. 4.22 – 4.23.

У нашому випадку навантаження є циклічним, і для даної конструкції є два рівнонебезпечні шари – крайні верхні та крайні нижні (максимально віддалені від нейтральної лінії) у нормальному перетині, розташованому посередині балки у точці прикладання сили F (перетин А-А). У даних точках, як видно з рис. 4.21, спостерігаються максимальні концентрації механічних напружень (внутрішній шар на стискання, зовнішній шар на розтягнення).

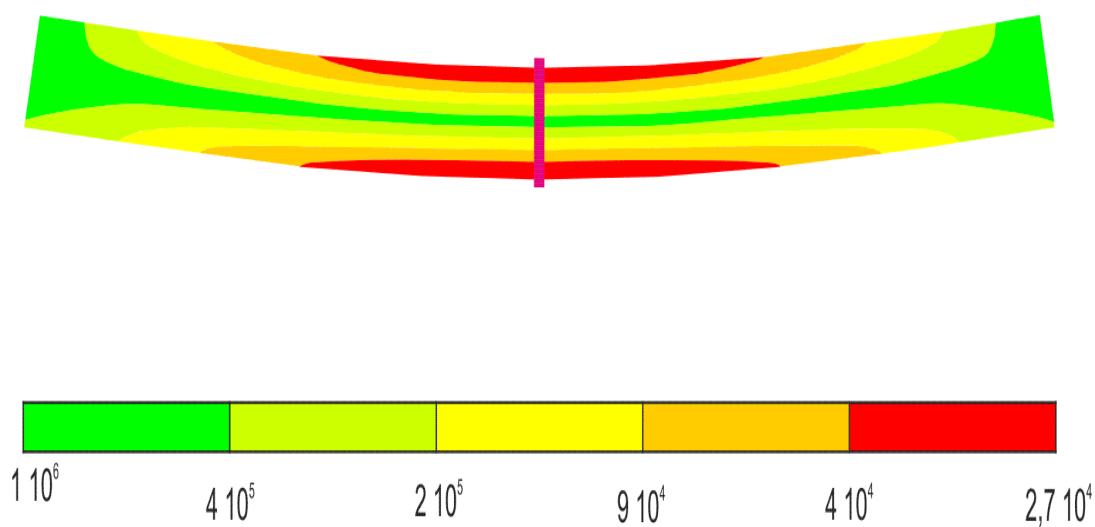
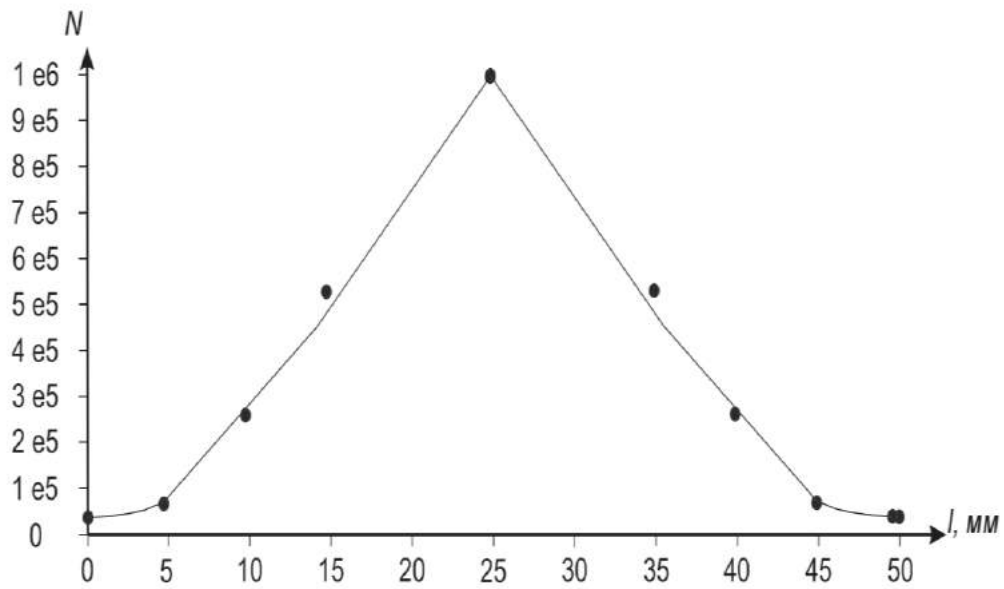
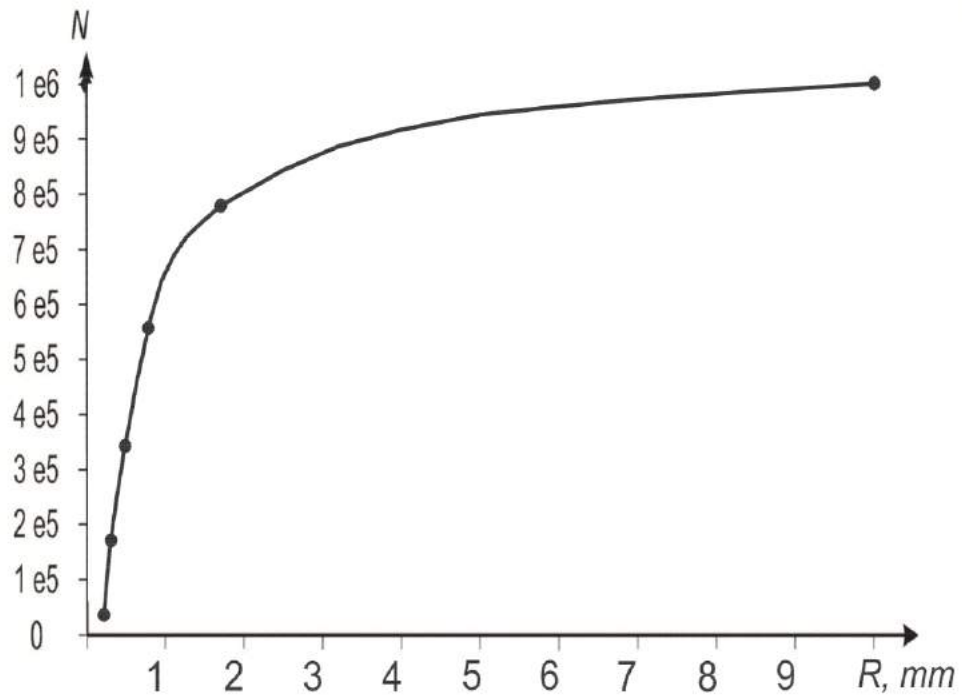


Рисунок 4.22 – Розподіл довговічності у поздовжньому перетині ГС



а)



б)

а – розподіл довговічності у перетині А-А;

б – кількість циклів до деформації в залежності від радіуса вигину ГС

Рисунок 4.23 – Результати моделювання

Висновки по розділу 4

Даному максимально напруженому стану відповідає мінімальна довговічність, яка дорівнює 27000 циклам. Навпаки, напруження у поліїміді (поблизу від нейтральної лінії) є меншими на декілька порядків (рис. 4.21) та їм відповідає максимальна довговічність, що дорівнює 10^6 циклам.

Таким чином, теоретичні положення, висунуті у розділі 3, повністю підтверджуються.

Дані показують, що чим менш пластичним є матеріал, тим він є більш чутливим до концентрації напружень і тим меншою є його втомна довговічність і, відповідно, ресурс конструкції.

У четвертому розділі використано інформацію з джерел [24, 26, 80-100].

5 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ РОЗНІМНИХ ТА НЕРОЗНІМНИХ З'ЄДНАНЬ ГС У ВИРОБАХ ЕТ

5.1 Аналіз особливостей гнучких рознімних з'єднань

Працездатність ЕТ часто залежить саме від якості з'єднувачів, особливо коли до кінцевого продукту висувають серйозні вимоги щодо експлуатації: вібростійкість, стійкість до механічних пошкоджень, пило- та вологостійкість, здатність перебувати у хімічно агресивному середовищі, широкий робочий температурний діапазон та ін. [48].

Більше 50 % несправностей модулів ЕТ пов'язані зі з'єднувачами. Можливими їх причинами можуть бути: корозія, нещільне з'єднання, випадіння або деформація кабелю внаслідок вібрації [101].

Широке застосування плоских кабелів практично в усій стаціонарній і мобільній апаратурі (морській, наземній, повітряній) обумовлено низкою переваг таких з'єднань:

- компактність, навіть за великого числа контактів;
- проста та швидка заміна пошкодженого кабелю;
- організація несних провідників, що виключає заплутування;
- з'єднання модулів і виконавчих пристроїв, віддалених один від одного, у рамках одного блоку або виробу;
- «рухливість» з'єднання. За рахунок гнучкості та довговічності самого кабелю можливе підведення живлення та сигнальних ліній до рухомих вузлів пристрою. Важливо, однак, пам'ятати, що рухи повинні відбуватися у площині, що паралельна до полотна кабелю.

5.2 Плaskий з'єднувач для електронних пристроїв з нульовою силою вставки на основі ГС

У ході дисертаційних досліджень було подано заявку й отримано патент України на корисну модель «Плaskий з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки». Заропонована корисна модель відноситься до електромеханічних пристроїв, зокрема до струмоведучих з'єднувачів плaskих або стрічкових шлейфів [25].

До складу пристрою входять корпус із двома контактними групами, розташованими паралельно один до одного, і рухома планка, що являє собою поворотний механізм. Контакти виконані з пружного матеріалу. У відкритому положенні кулачок пружно деформує притискну частину виводу і відстань між притискною та контактною частинами виводу збільшується.

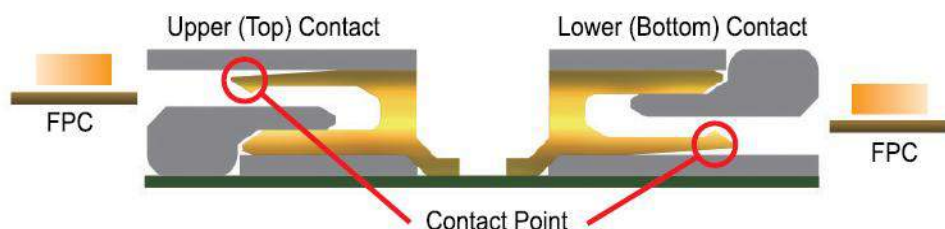
Аналогами цього плaskого з'єднувача можуть бути численні шлейфи FFC (Flexible flat cable) і FPC (Flexible printed circuit), які в свою чергу поділяються на ZIF (Zero Insertion Force – нульова сила вставки) і non-ZIF структури. Зокрема, аналогом є з'єднувач для шлейфів FFC / FPC [102].

Найближчим до запропонованої корисної моделі є пристрій для з'єднання електронних компонентів із гнучкими шлейфами, який складається з нерухомого корпусу та контактора, що являє собою матрицю контактів, виготовлених у вигляді електрично розділених U-образних контактів із бронзи або іншого пружного матеріалу, і рухомої планки, яка розміщена паралельно до корпусу на напрямних (рис. 5.1).

Зовнішній гнучкий контактуючий шлейф проходить через отвір у корпусі. У замкнутому положенні рухома планка зміщується на невелику відстань (порядку сотень мікрометрів) і пружно притискає контакти до шлейфу в корпусі з'єднувача.



а) принцип роботи заціпки з'єднувача FPC



б) з'єднувачі із верхнім і нижнім розташуванням контактів

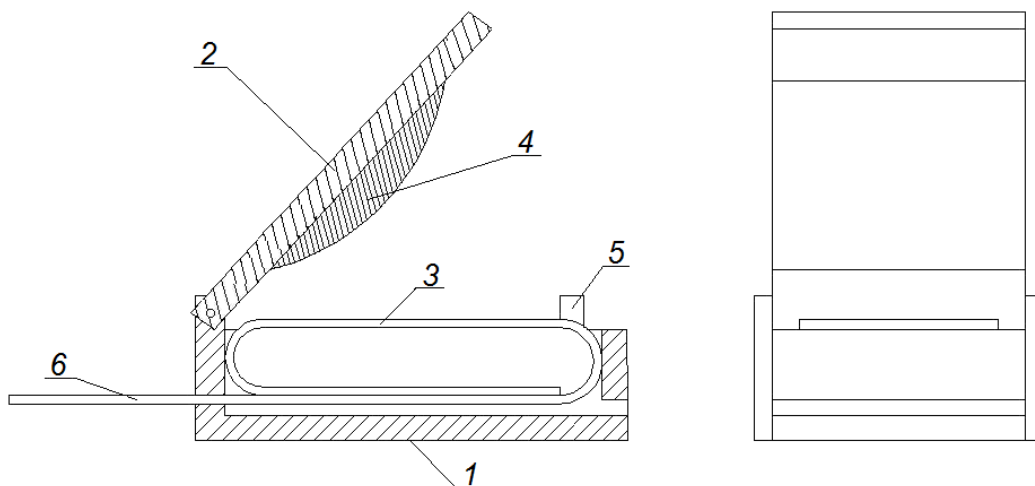
Рисунок 5.1 – З'єднувачі FPC

Для фіксації рухома планка зачіпляється за спеціальний виступ на стінці корпусу. У відкритому стані рухома планка повертається у вихідне положення і вже не притискає зовнішній гнучкий шлейф, який можна легко вилучити [103].

Конструкції розглянутих аналога та прототипу мають низки суттєвих недоліків. По-перше, це низька ремонтпридатність у разі пошкодження пружних контактів; по-друге, обмежена щільність розташування контактів; по-третє, швидке стирання зовнішнього гнучкого шлейфу у процесі багаторазової установки; по-четверте, значна крихкість конструкції важеля.

Запропонований плоский з'єднувач складається з корпусу, у якому є отвір для зовнішнього гнучкого контактуючого шлейфу, і рухливої планки, що є частиною контактора та виконана у вигляді кришки корпусу з ущільнювачем на нижньому боці. На корпусі розташований фіксатор кришки. Лінійка контактів виконана у вигляді порожнистої герметичної ємності, сформованої з гнучкої друкованої плати, на якій розміщені контакти для зовнішнього гнучкого шлейфа, виконані шляхом травлення полімерного фольгованого матеріалу контактора, причому зовнішній вивід лінійки контактів жорстко з'єднаний із зовнішньою платою.

На рис. 5.2 наведена структура запропонованого з'єднувача.



1 – корпус; 2 – рухлива планка у вигляді кришки; 3 – матриця контактів; 4 – ущільнювач; 5 – фіксатор; 6 – зовнішній вивід матриці.

Рисунок 5.2 – Структура плоского з'єднувача

Пристрій працює наступним чином. Зовнішній гнучкий шлейф вставляється в отвір корпусу 1 і електрично контактує з матрицею контактів 3. Це, у свою чергу, за допомогою зовнішнього виводу 6 забезпечує електричний контакт плоского роз'єму з платою, на яку його встановлено. Матриця контактів сформована з гнучкої фольгованої полімерної (наприклад, поліімідної) плати, згорнутої у вигляді циліндра і склеєної по торцях, при цьому утворюючи герметичну ємність, заповнену повітрям. На ній знаходиться безліч кулькових контактних елементів, виготовлених за допомогою травлення шару фольги.

Під час повороту рухомої планки 2 (закриття кришки) матриця контактів деформується завдяки ущільнювачам 4, які знаходяться на кришці. При цьому підвищується тиск у внутрішній герметичній порожнині матриць і контактів і зовнішній гнучкий шлейф механічно притискається між матрицею контактів і кришкою пристрою. Ступінь притиснення можна регулювати, змінюючи форму й об'єм ущільнювача. Для надійності з'єднання передбачено фіксатор кришки 5.

Виготовлення контактних елементів за допомогою травлення дозволяє

одержати високу щільність їх розміщення та малі розміри (ширина до 50 мкм). Крім того, існує можливість отримання контактних елементів різної форми та ширини у рамках одного виробу (наприклад, різна ширина каналів живлення та інформаційних).

З'єднувач дозволяє підвищити щільність розташування контактів у рознімному з'єднанні ГС, а також можливу кількість виводів і надійність механізму фіксації. 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.

5.3 Розробка технологічного процесу виготовлення плаского з'єднувача для ГС

Розроблено типовий технологічний процес для виготовлення гнучких багатошарових структур, що дозволяє отримувати міжшарові переходи провідників і забезпечувати монтаж навісних компонентів за допомогою УЗ-зварювання, здійснювати паяння кулькових виводів до контактних площинок (КП) з'єднувача з нульовою силою вставки (рис. 5.3).

Матеріалом для ГС служить фольгований поліімід ФДИ-А-50, що виготовляється за технічними умовами 11ЫУО.037.108 ТУ і забезпечує:

- міцність за умови розриву у поздовжньому та поперечному напрямках не меншу за 130 МПа;
- відносне подовження під час розриву у поздовжньому та поперечному напрямках – не менше за 40 %;
- радіаційну стійкість – 150 Мрад;
- електричну міцність – 140 кВ / мм.

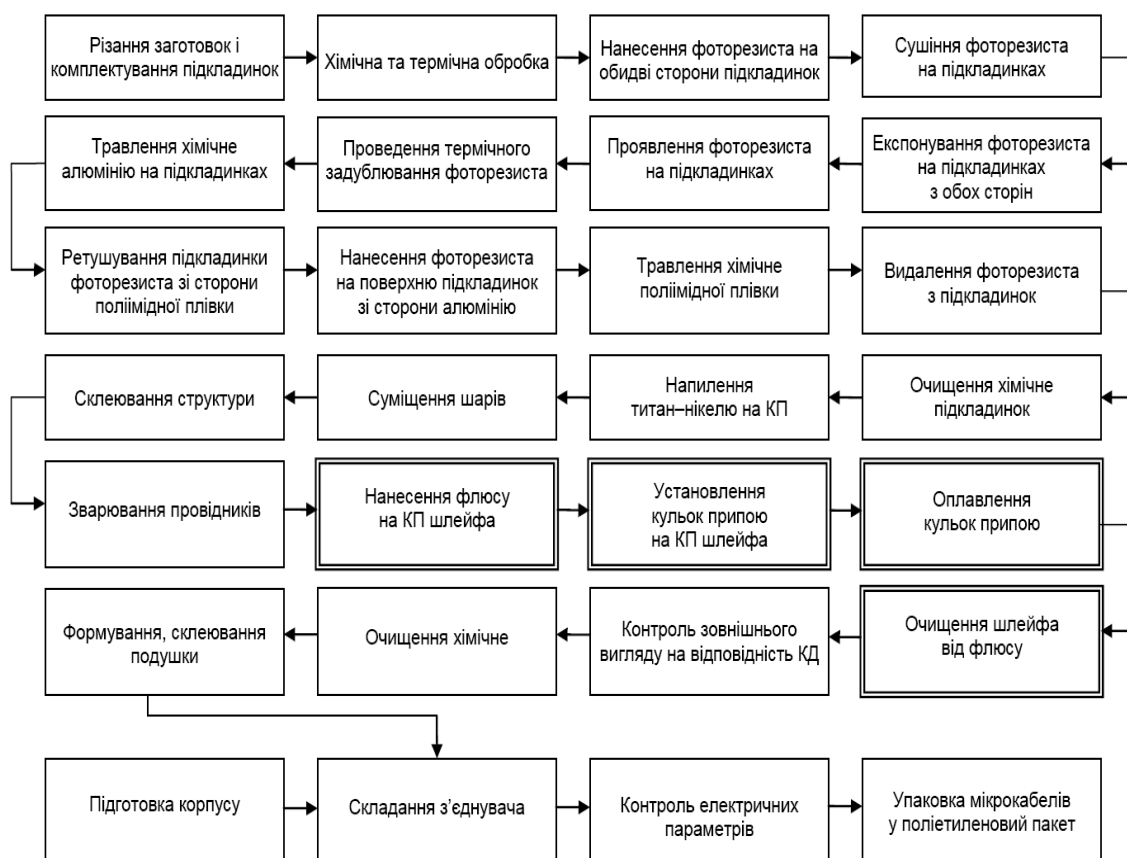


Рисунок 5.3 – Послідовність операцій ТП виготовлення з'єднувача для ГС

Алюміній має досить високу корозійну стійкість і може використовуватися як з захисним шаром нікелю (титан-нікель) для забезпечення можливості паяння, так і без нього, якщо приєднання навісних компонентів здійснюється із використанням УЗ-зварювання.

Селективне травлення рисунку провідників і вікон у полііміді відповідно у кислотних і лужних травителях дозволяє отримувати провідники із шириною та зазорами 40 ... 70 мкм і вікон міжшарових переходів 50 ... 60 мкм.

Якість зварних міжшарових з'єднань провідників і навісних компонентів забезпечується більш технологічними розмірами вікон у полііміді ($100 \times 100 \dots 100 \times 150$ мкм) і вибором оптимальних режимів процесу: потужності УЗ-генератора, тиску та форми електрода, часу паяння, а можливість паяння кулькових виводів з'єднувачів досягається нанесенням підшару титан-нікель на контактні площинки майбутніх зондів ZIF.

Зварні процеси реалізовувалися на установці УЗ-зварювання ЭМ-4092 (рис. 5.4).

Зонди з'єднувача отримані установкою кульок припою ПОС-61 у вічка шаблону з необхідними розмірами вікон і кроку між ними.



Рисунок 5.4 – Установка для УЗ-зварювання

Оплавлення виконувалося на установці інфрачервоного оплавлення з мікропроцесорним управлінням типу Ersa JR 550 A (рис. 5.5).

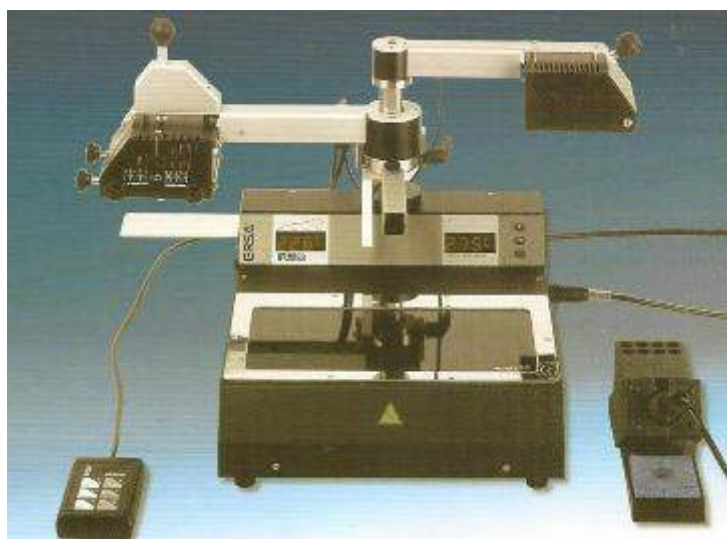


Рисунок 5.5 – Установка Ersa JR 550 A

Контроль суміщення зондів ZIF-з'єднувача із відповідними провідниками шлейфів здійснювався на установці ERSASCOPE Inspection System 3000 (рис. 5.6).



Рисунок 5.6 – Установка ERSASCOPE Inspection System 3000

Формування та склеювання повітряної подушки на шлейфі виконувалося на каркасі з використанням поліімідного клею АД9103 і сушіння.

5.4 Експеримент із визначення перехідного опору ZIF FPC-з'єднувача

Було проведено експеримент для дослідження впливу сили притиснення ZIF FPC-з'єднувача на перехідний опір у зоні контакту кульки припою з кінцевим друкованим провідником коמוтованого шлейфу (зона «кулька припою – кінцевий провідник»).

На рис. 5.7, а представлено зовнішній вигляд шлейфу з наплавленими кульками, які зашліфовані для забезпечення однакової висоти контакту. На рис. 5.7, б показано стан кінцевих друкованих провідників притискного шлейфу до проведення експерименту.

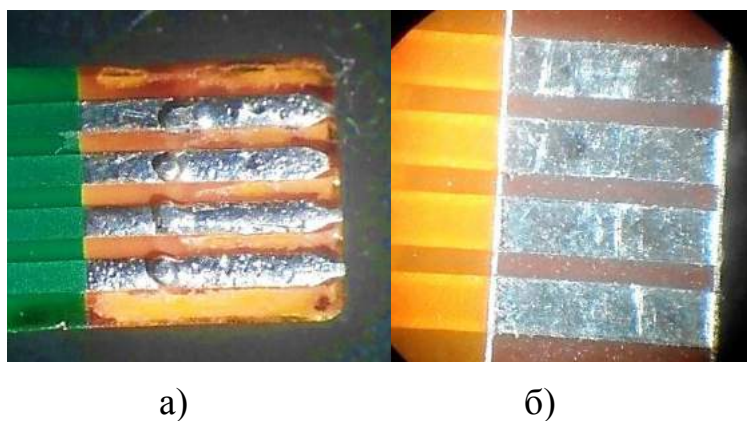


Рисунок 5.7 – Стан шлейфів до експерименту

Допустиме значення струму, що протікає через перехід «кулька припою – кінцевий провідник» обирається у відповідності з конструктивними параметрами досліджуваного гнучкого шлейфа, але не є більшим за 2 А (максимальний струм для запропонованої конструкції ZIF FPC з'єднувача).

За обраного значення струму вимірювалося падіння напруги на друкованих провідниках з'єднувача та контактуючого шлейфу. Сума отриманих втрат не враховувалася у підсумкових значеннях перехідного опору зони «кулька припою – кінцевий провідник».

У даному дослідженні проведення експерименту відбувалося наступним чином:

- на рис. 5.8: 1 – шлейф із кроком кінцевих провідників 1 мм і наплавленими кульками припою з діаметром 0,5 мм; 2 – притискний шлейф; 3 – важки для створення різного тиску на перехід «кулька припою – кінцевий провідник»; 4 – джерело струму; 5 – мілівольтметр;

- струм через контактуючі поверхні було обрано не більшим за 0,3 А, падіння напруги на провідниках шлейфу під час протікання через них такого струму склало:

- 1) для шлейфа з оплавленими кульками – 19,27 мВ;
- 2) для притискного шлейфу – 7,8 мВ;

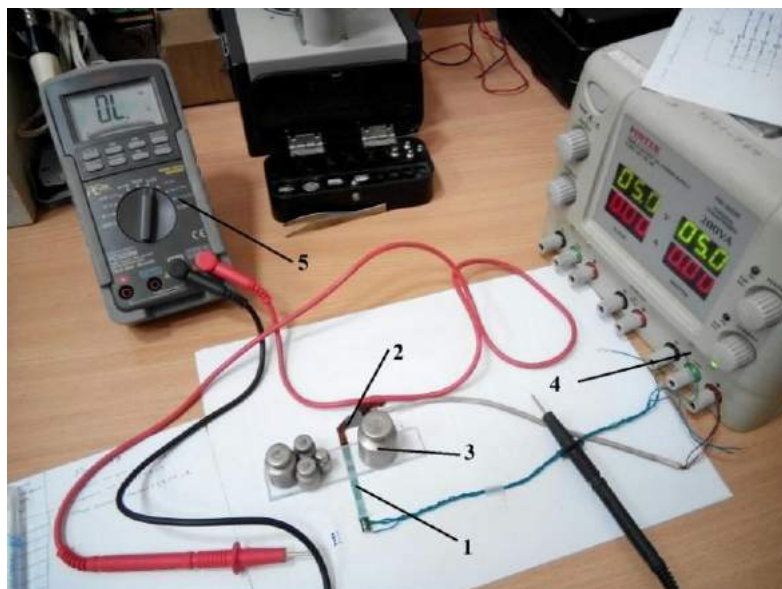


Рисунок 5.8 – Умови проведення експерименту

Таким чином, загальне невраховуване падіння напруги склало 27,07 мВ;

- після виключення впливу похибки вимірювань, було виміряне падіння напруги на протилежних кінцях комутованих гнучких шлейфів для кожного переходу «кулька припою – кінцевий провідник» (додаток Л). Значення струму при цьому залишалося незмінним, змінювалась лише сила притиснення. Результати вимірювання падіння напруги занесені до табл. 5.1;

- також заносимо різницю вимірюваних значень і невраховуваних падінь напруги на контактуючих шлейфах до табл. 5.1;

- відповідно до закону Ома, перехідний опір R_{Π} визначається відношенням падіння напруги U_{Π} до значення сили струму $I_{заг}$, що протікає через перехід «кулька припою – кінцевий провідник»:

$$R_{\Pi} = U_{\Pi} / I_{заг} .$$

Результуючі значення перехідного опору, а також його середні значення та розраховану величину дисперсії заносимо до табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати експерименту

Вага притиснення на 1 вивід, г	Мінімальне значення опору, мОм	Максимальне значення опору, мОм	Середнє значення, опору, мОм	Дисперсія
51,77	3,77	10,43	6,52	3,71
39,27	3,67	10,33	7,16	4,42
26,77	3,80	13,10	7,75	6,16
14,27	4,50	14,77	9,08	7,28
11,77	7,57	15,43	10,32	5,21
6,77	5,57	17,10	10,30	7,88
5,52	6,50	18,33	11,05	8,09
4,27	7,43	18,90	11,64	8,61
3,52	7,67	18,77	12,10	7,87
3,02	6,50	19,10	12,28	10,06
2,77	8,67	19,30	12,91	8,06
2,52	9,80	19,13	14,16	8,74
2,27	10,13	19,47	14,41	9,79
2,02	10,70	20,43	14,89	9,94
1,795	11,40	22,77	15,85	10,34
1,25	12,10	23,80	16,52	11,91
0,625	12,10	24,43	17,09	12,08
0,25	11,10	24,80	17,48	13,38
0,125	13,13	26,10	18,65	13,05
0,05	13,73	27,77	20,10	13,45

На рис. 5.9 показано стан кінцевих провідників шлейфу з оплавленими кульками (рис. 5.9, а) і притискного шлейфу (рис. 5.9, б) після проведення експерименту.

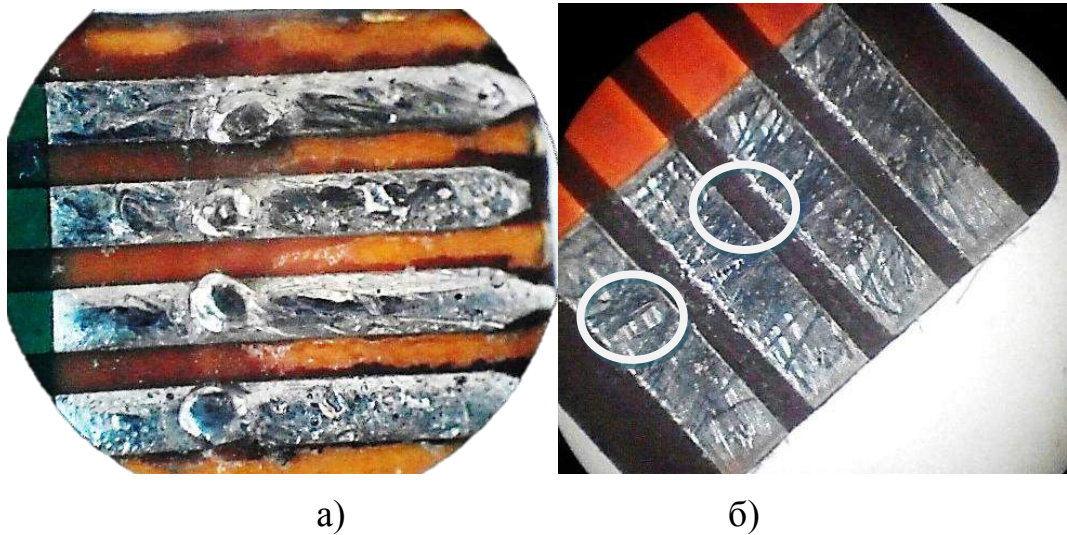


Рисунок 5.9 – Стан поверхонь у контактних зонах
після проведення експерименту

На рис. 5.9,а видно, що у результаті численних циклів замикання контакту (за протікання струму 0,3 А) на кульках з'явився нагар, який у ході подальшої експлуатації може призвести до підвищення перехідного опору. Також на притискному шлейфі (рис. 5.9, б) спостерігається деформація контактної групи шляхом продавлювання.

Графічне представлення залежності перехідного опору у з'єднувачі від сили притиснення шлейфа наведено на рис. 5.10.

Перехідний опір для стандартних ZIF-роз'ємів становить 20 ... 50 мОм, для деяких допускається підвищення даного значення до 100 мОм. Таким чином, запропонований з'єднувач перевершує відомі аналоги за перехідним опором, забезпечуючи більш високу якість контактування з ГС.

Сила притиснення кожного контакту ZIF-з'єднувача у замкненому стані відповідно до вимог нормативних документів на контактуючі пристрої складає

$$F_i = 0,07 \dots 0,3H .$$

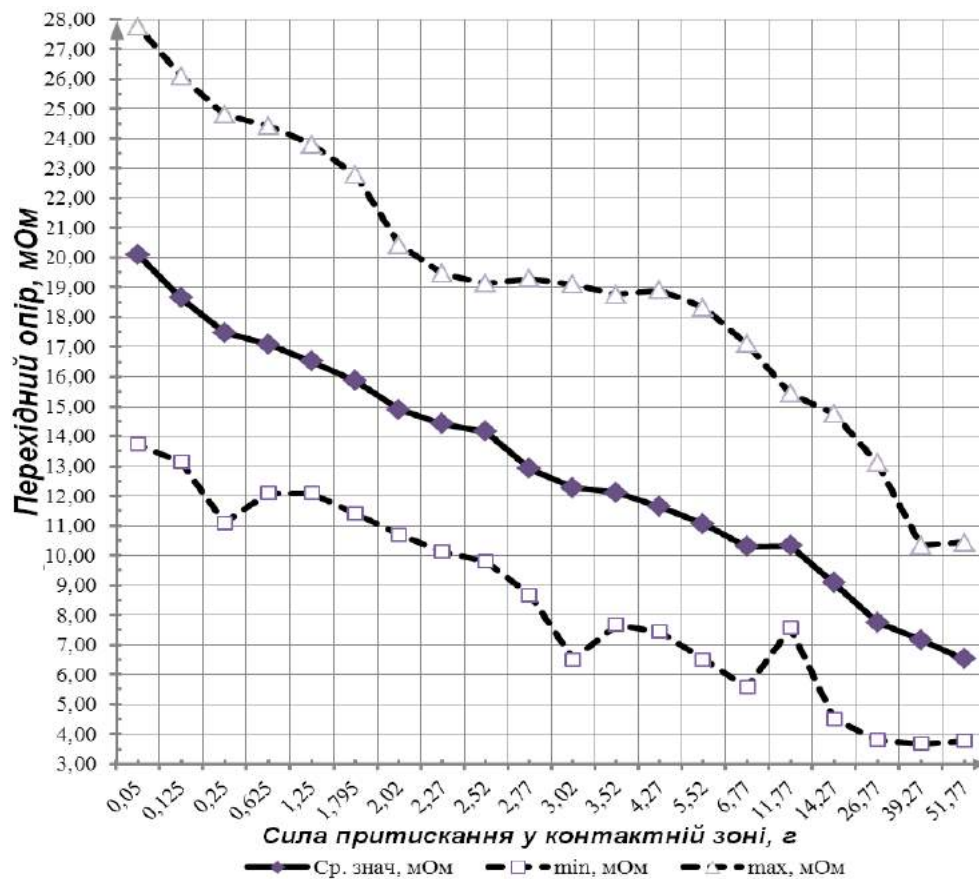


Рисунок 5.10 – Залежність перехідного опору у контактній зоні від сили притиснення шлейфа

Тиск, з яким кулька притискається до контактної площинки ГС, можна визначити як відношення сили притиснення до площі контактної плями:

$$P_B = \frac{F_i}{S_i},$$

де S_i – площа одного контакту.

З іншого боку на кульку впливає тиск атмосфери та прикладений тиск сформованої порожнини з'єднувача, тобто:

$$P_B = P_a + P_{app} \Rightarrow P_{app} = P_B - P_a = \frac{F_i}{S_i} - P_a.$$

Виходячи з основного закону термодинаміки:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 .$$

У нашому випадку P_1 – початковий тиск всередині порожнини (P_a), а P_2 – прикладений тиск (P_{app}), тобто:

$$P_a V_1 = P_{app} V_2 \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{P_{app}}{P_a} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{\frac{F_i}{S_i} - P_a}{P_a},$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\frac{F_i - S_i \cdot P_a}{S_i}}{P_a},$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{F_i - S_i \cdot P_a}{S_i \cdot P_a}.$$

Залежність зміни об'єму порожнини запропонованого з'єднувача від сили притиснення ГС до його контактів показана на рис. 5.11.

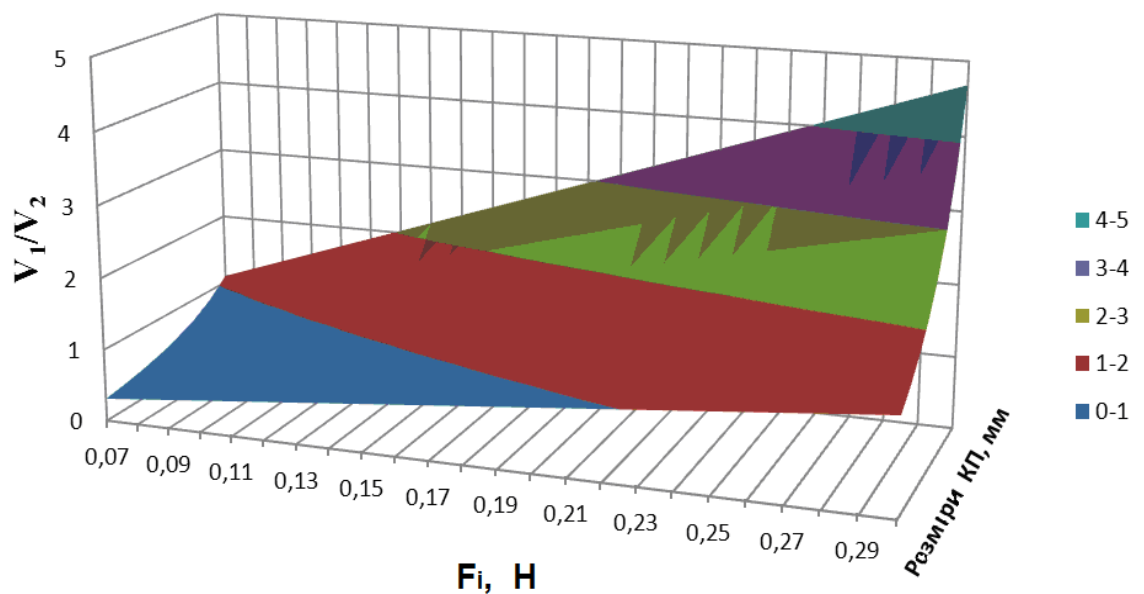


Рисунок 5.11 – Залежність зміни об'єму (V_1/V_2) порожнини з'єднувача від сили (F) притиснення ГС до його контактів

5.5 Дослідження впливу технологічних режимів операції УЗ-мікрозварювання на надійність монтажних з'єднань у ГС

5.5.1 Постановка завдання

Оскільки технологія виготовлення виробів ЕТ на основі ГС є відносно новою у порівнянні з традиційними технологіями складання та монтажу електронних модулів на жорстких друкованих основах, то існує необхідність розробки низки питань, пов'язаних із підвищенням надійності даного ТП та вибору його оптимальних показників з метою підвищення якості ГС [104].

Оцінка сучасного стану технології складання виробів ЕТ на основі алюміній-поліімідних ГС і існуючих методів моделювання та оцінки надійності ТП їх складання дозволяє зробити наступні висновки:

- сучасні технології складання виробів ЕТ на основі алюміній-поліімідних ГС являють собою складний комплекс технологічних проблем, пов'язаних із розробкою нових конструкторсько-технологічних принципів проектування ТП і забезпечення надійності цих ТП [105];

- проблема забезпечення необхідних рівнів якості та технічної досконалості виробів ЕТ, що виготовляються на основі ГС, вимагає використання високоефективних методів монтажу елементів функціональної електроніки на гнучкі плати-основи.

У зв'язку із цим, у даному підрозділі ставилися такі основні завдання дослідження:

- пошук оптимальних режимів монтажу виробів ЕТ на основі ГС;
- дослідження й аналіз технологічних умов, необхідних для формування надійних мікроз'єднань на алюміній-поліімідних гнучких комутаційних структурах за допомогою УЗ-зварювання.

5.5.2 Планування та проведення факторного експерименту, обробка результатів експерименту

Основними перевагами методу моделювання процесів за допомогою

факторного експерименту є простота та можливість відшукування екстремальної точки (із певною похибкою), якщо невідома поверхня є досить гладкою та немає локальних екстремумів [106].

Мета проведених у рамках даного підрозділу досліджень: розробити регресійну модель процесу монтажу ЕТ за допомогою УЗ-мікрозварювання й оцінити її параметри за результатами проведення повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^3 , визначити оптимальні режими, за яких забезпечується максимальна надійність монтажних з'єднань. Як критерій оцінки надійності мікроз'єднань обрано їхню міцність на відрив.

Експериментальні дослідження, результати яких наведені у цьому підрозділі дисертаційної роботи, проводилися на базі технологічних потужностей підприємств ДП НДТІП і НВП «Хартрон-Енерго» (м. Харків) спільно з провідними фахівцями даних організацій, у рамках розроблених там програм досліджень.

Для експериментальних досліджень було взято двошаровий алюміній-поліімідний тестовий зразок ГС (ТЗ ГС), основні конструктивні параметри якого наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Конструктивні параметри тестового зразка ГС

Конструктивні параметри	Значення
Габаритні розміри ГС:	
- довжина, мм	75
- ширина, мм	150
- товщина, мкм	50
Ширина провідників:	
- нижнього шару, мкм	200
- верхнього шару, мкм	100
Крок між провідниками:	
- нижнього шару, мкм	350
- верхнього шару, мкм	250

Якість і надійність одержуваних монтажних з'єднань (позначена як y (г)) в основному залежить від наступних технологічних режимів (факторів) [107]: вихідної потужності УЗ-генератора x_1 (Вт), часу зварювання x_2 (мс), зусилля робочого інструменту x_3 (г). Необхідно за допомогою ПФЕ знайти математичний опис процесу монтажу навколо базової точки з координатами $x_{01} = 2$ Вт, $x_{02} = 350$ мс, $x_{03} = 40$ м (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Основні показники плану експерименту

Характеристика	x_1 , Вт	x_2 , мс	x_3 , г
Основний рівень	2	350	40
Інтервал варіювання	1	100	20
Верхній рівень	3	450	60
Нижній рівень	1	250	20
Область допустимих значень факторів	(0,025-16)	(0,15-0,55)	(15-80)

Рішення загальної задачі було розбите на декілька етапів:

- обчислення порядкового середнього значення функції відгуку та дисперсій відгуку у кожній точці плану експерименту;
- перевірка однорідності порядкової дисперсії;
- визначення коефіцієнтів математичної моделі;
- визначення дисперсії відтворюваності;
- оцінка статистичної значущості коефіцієнтів моделі;
- оцінка адекватності моделі і даних експериментів, формування висновків про можливість застосування розробленої моделі;
- оптимізація моделі процесу монтажу.

На основі вихідних даних (табл. 5.2-5.3) і результатів натурних випробувань побудовано матрицю планування ПФЕ 2^3 (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Матриця планування ПФЕ 2³

№ точки плану	Фактори експерименту (режими УЗ-зварювання)								Відгуки (міцність монтажних з'єднань у, г)			
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_{1i}	y_{2i}	y_{3i}	$\bar{y}_i$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	16	16,5	16,8	16,43
2	+	-	-	+	+	-	-	+	18,5	18,3	18,9	18,57
3	+	-	+	-	-	+	-	+	15,9	16,3	16,7	16,3
4	+	-	+	+	-	-	+	-	18,9	18,4	19	18,77
5	+	+	-	-	-	-	+	+	15,9	16	16,2	16,04
6	+	+	-	+	-	+	-	-	19,3	19,5	19,8	19,54
7	+	+	+	-	+	-	-	-	17	17,2	17,5	17,24
8	+	+	+	+	+	+	+	+	19,9	20	20,4	20,1

Обчислимо порядкове середнє значення функції відгуку та дисперсій відгуку у кожній точці плану експерименту.

Для будь-якої i -ї точки середнє значення вихідної величини обчислюється за формулою

$$\bar{y}_i = \sum_{u=1}^m \tilde{y}_{iu} / m. \quad (5.1)$$

Оцінка порядкової дисперсії вихідної величини визначається виразом

$$S^2\{y_i\} = \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2 / (m-1). \quad (5.2)$$

Результати розрахунку середнього значення вихідної величини $\bar{y}_i$ у кожній точці (для кожного рядка $m = 3$) наведені у табл. 5.4.

Визначимо порядкову дисперсію вихідної величини $\bar{y}_i$ у кожній точці (для кожного рядка $m = 3$), використовуючи вираз (5.2):

$$S^2\{y_1\} = 0,1634; S^2\{y_2\} = 0,0934; S^2\{y_3\} = 0,16; S^2\{y_4\} = 0,1034;$$

$$S^2\{y_5\} = 0,0234; S^2\{y_6\} = 0,0634; S^2\{y_7\} = 0,0634; S^2\{y_8\} = 0,07.$$

Визначимо розрахункове значення коефіцієнта Кохрена за формулою [108]

$$G_p = S^2\{y_i\}_{\max} / \sum_{i=1}^N S^2\{y_i\}.$$

Розрахункове значення коефіцієнта Кохрена порівняємо з критичним значенням G -критерію G_T [108].

Оскільки умова $G_p < G_T$ виконується, з обраним рівнем статистичної значущості $\alpha = 0,05$ всі построккові дисперсії визнані однорідними.

Перевіривши построккові дисперсії на однорідність, визначили оцінки коефіцієнтів моделі за формулою

$$b_k = \sum_{i=1}^N \bar{y}_{ik} x_{ik} / N, \quad (5.3)$$

де k – номер вектор-стовпця (табл. 5.3).

Отримані коефіцієнти: $b_0 = 17,87$; $b_1 = 0,3563$; $b_2 = 0,2288$; $b_3 = 1,3713$; $b_{12} = 0,2113$; $b_{13} = 0,2188$; $b_{23} = -0,0388$; $b_{123} = -0,1213$.

Оцінка дисперсії відтворюваності (оцінка усереднених порядкових дисперсій) відповідно до результатів обчислень визначається відповідно до виразу

$$S_B^2 = \sum_{i=1}^N S^2\{y_i\} / N, \quad (5.4)$$

$$S_B^2 = 0,0926 .$$

Визначимо дисперсію коефіцієнта b_k .

З огляду на властивості нормування оцінки коефіцієнтів знайдені з однаковою дисперсією

$$S^2\{b_k\} = S_B^2 / Nm,$$

$$S^2\{b_k\} = 0,0926 / 8 \cdot 3 = 0,0039; S^2\{b_k\} = 6 \cdot 10^{-3} = 0,006.$$

Вплив k -го фактора, тобто відхилення оцінки k -го коефіцієнта від нуля враховується наступним коефіцієнтом

$$t_k = |b_k| / S\{b_k\}. \quad (5.5)$$

За обраного рівня статистичної значущості ($\alpha = 0,05$) за таблицями розподілу Стюдента [108] знаходимо табличне значення коефіцієнта t_T . Знайдене табличне значення коефіцієнта порівнюємо із розрахунковим значенням. Якщо виконується нерівність

$$t_T > t_k, \quad (5.6)$$

то приймається нуль-гіпотеза.

Нерівність (5.6) виконується для наступних коефіцієнтів: t_k, t_{23}, t_{123} . Отже, можна припустити, що зазначені вище коефіцієнти є статистично незначущими і що їх слід виключити з рівняння регресії.

Таким чином, рівняння регресії технологічної операції УЗ-мікрозварювання, що містить статистично значущі коефіцієнти, буде (у кодованій системі) мати вигляд

$$\hat{y} = 17,87 + 0,3563 x_1 + 0,2288 x_2 + 1,3713 x_3 + 0,2113 x_1 x_2 + 0,2188 x_1 x_3. \quad (5.7)$$

Проведемо оцінку адекватності моделі та даних експериментів, а також сформулюємо висновки про можливість застосування розробленої моделі. Отримане рівняння регресії перевірене на адекватність досліджуваного

об'єкта за допомогою критерію Фішера, перевірка показала, що отримана модель (5.7) є адекватною та досить добре апроксимує отримані експериментальні дані.

5.5.3 Оптимізація експериментально-статистичної моделі процесу УЗ-зварювання

У попередньому підрозділі отримано експериментально-статистичну модель процесу монтажу ЕТ на основі ГС методом УЗ-зварювання у вигляді рівняння регресії. Далі отримана модель буде використана для оптимізації процесу УЗ-зварювання за критерієм забезпечення максимальної міцності монтажних з'єднань на відрив.

Оптимізація процесу мікрозварювання являє собою цілеспрямований пошук значень впливаючих факторів, за яких досягається екстремум критерію оптимальності (з урахуванням обмежень, накладених на всі впливаючі фактори та функції відгуку).

Існує кілька методів оптимізації результатів факторного експерименту [108-111]. Найбільш простим, наочним і точним є так званий метод крутого сходження.

Аналіз результатів ПФЕ показує, що для подальшої оптимізації процесу мікромонтажу застосування методу крутого сходження буде ефективним, оскільки отримана лінійна модель (5.7) є адекватною та не є різко асиметричною відносно коефіцієнтів.

На наступному етапі досліджень розрахунок методом крутого сходження проведено у такій послідовності.

Величина кроку руху за градієнтом міцності монтажних зварних з'єднань розрахована за стандартною методикою, виходячи зі значень коефіцієнтів регресії [112-113].

З цієї метою перехід до нового натурального масштабу інтервалів варіювання здійснено за допомогою формули

$$L_i = b_i \delta_i, \quad (5.8)$$

де b_i – коефіцієнти регресії;

δ_i – одиниці варіювання.

Розраховано, що $L_1 = 0,36$, $L_2 = 23$, $L_3 = 27,4$. Абсолютна величина $|L_{\max}|$ має найбільше значення для фактора навантаження робочого інструмента, отже, цей фактор приймемо як базовий. Для інших факторів нові коефіцієнти розраховуються за формулою

$$\gamma_i = \frac{L_i}{|L_{\max}|}, \quad (5.9)$$

де γ_i – нові коефіцієнти при значущих факторах. Розраховані коефіцієнти склали для факторів: потужність УЗ-генератора, час зварювання, навантаження робочого інструмента відповідно $\gamma_1 = 0,01$, $\gamma_2 = 0,84$ і $\gamma_3 = 1$.

Для базового фактора (x_3) обрано модуль кроку руху за градієнтом ($h_{\text{баз.}}$). З огляду на те, що $\delta_{\text{баз.3}} = 20$, приймаємо $h_{\text{баз.}} = 18$. Далі розраховуються кроки руху інших факторів (h_i) за формулою

$$h_i = h_{\text{баз.}} \gamma_i. \quad (5.10)$$

Округляючи значення h_1 і h_2 , маємо наступні кроки руху за градієнтом: $h_1 = 0,18$; $h_2 = 15,12$.

Розраховано умови та результати дослідів крутого сходження (уявних дослідів) за моделлю (5.7). Значення факторів, що визначають умови дослідів, визначаються за формулою

$$X_{ji} = X_{j-1,i} + h_i, \quad (5.11)$$

де j – номер експерименту;

i – номер фактора.

Результати розрахунку умов уявних дослідів наведені у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Розрахунок параметрів крутого сходження для визначення кількісного співвідношення режимів процесу мікромонтажу методом УЗ-зварювання

Характеристика фактора i експерименту	x_1	x_2	x_3
Інтервал варіювання (σ_i)	1	100	20
Базовий (основний) рівень	2	350	40
Коефіцієнт регресії (b_i)	0,3563	0,2288	1,3713
Добуток $Li = b_i \sigma_i$	0,36	23	27,4
Коефіцієнт (γ_i)	0,01	0,84	1
Крок руху (h_i)	0,18	15,12	18
Область допустимих значень факторів	(0,025-16) Вт	(0,15-10,55) мс	(15-80) г

Рух за градієнтом вважаємо ефективним, якщо реалізація уявних дослідів, розрахованих на стадії крутого сходження, призводить до збільшення значення параметра оптимізації (міцності монтажних з'єднань) у порівнянні із найкращим результатом у матриці ПФЕ.

Як видно, міцність зварних мікроз'єднань, що виявлена у реалізованому досліді № 2, склала 27,7 г. Крім того, реалізований дослід № 3, у якому під час руху за градієнтом фактор x_1 досягав меж допустимих значень, при цьому значення параметра оптимізації почало зменшуватися, що дало сигнал про припинення руху за градієнтом, оскільки оптимум було знайдено (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Режими технологічної операції УЗ-зварювання та міцність зварних монтажних з'єднань, виявлена у результаті уявних і реалізованих дослідів методом крутого сходження

Номер експерименту	x_1 , Вт	x_2 , мс	x_3 , Г	$U_{уявн}^*$, Г	$U_{реал}^{**}$, Г
1	2,18	365,12	58	26,5	25,7
2	2,36	380,24	76	28,7	27,7
3	2,54	395,36	94	30,9	27,1

Примітки: * – міцність зварних монтажних з'єднань, теоретично розрахована за методом «крутого сходження», ** – міцність зварних монтажних з'єднань, отримана експериментальним шляхом за методом «крутого сходження».

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що застосування методу крутого сходження у даному випадку виявилось ефективним, оскільки, порівнюючи найкращий результат ПФЕ 2³ (20,4 г) з отриманим у реалізованому досліді № 2 (27,7 г), бачимо, що міцність монтажного з'єднання збільшується у 1,34 рази.

Таким чином, у результаті експерименту за планом крутого сходження визначено оптимальні режими для УЗ-зварювання, за яких забезпечується максимальна міцність ($27 \cdot 10^{-2}$ Н) мікроз'єднань: потужність УЗ-генератора становить 2,5 Вт; час зварювання – 380 мс, навантаження робочого інструменту – $76 \cdot 10^{-2}$ Н.

5.6 Експериментальне визначення оптимальних технологічних режимів процесу монтажу виробів ЕТ на основі ГС

5.6.1 Методика проведення експерименту

Випробування проведені з метою дослідження надійності монтажних з'єднань на поліімідному носії; дослідження правильності вибору конструктивних рішень і технологічних режимів процесу складання та монтажу експериментальних зразків ГС з конструктивними елементами, з можливістю подальшого доопрацювання за необхідності, конструкції та

технології за результатами випробувань [114-121].

Методика випробувань розроблена відповідно до вимог нормативних документів [122-125].

Об'єктом випробувань був тестовий зразок двошарової ГС (ТЗ ДГС). Його конструкція (з технологічними зонами) представлена на рис. 5.12, а параметри – наведено у табл. 5.7.

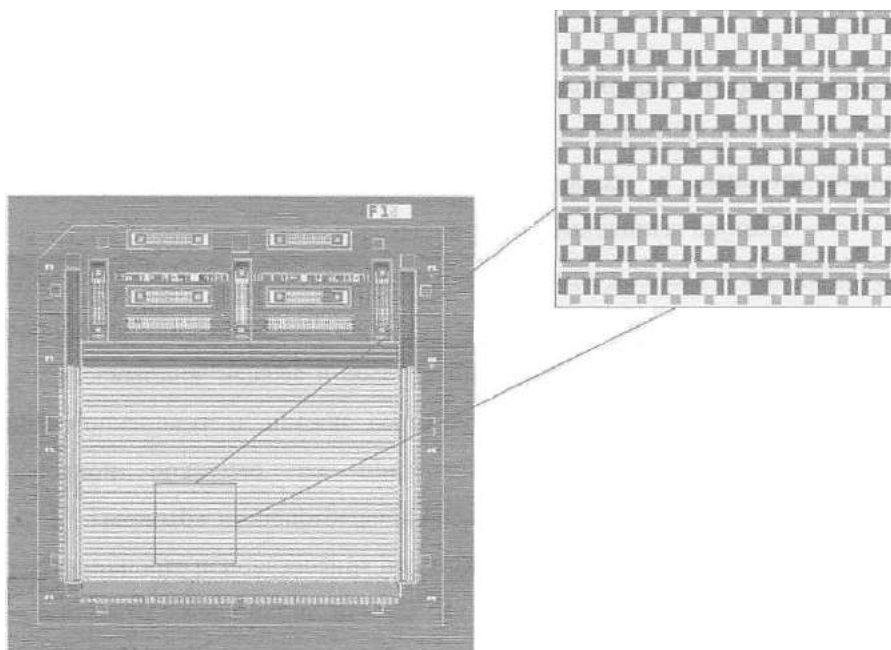


Рисунок 5.12 – Конструкція тестового зразка ГС

Таблиця 5.7 – Конструктивні параметри тестового зразка ГС

Конструктивні параметри	Значення
Габаритні розміри ГС:	
- довжина, мм	70
- ширина, мм	70
- товщина, мкм	100
Ширина провідників:	
- нижнього шару, мкм	210
- верхнього шару, мкм	100
Крок між провідниками:	
- нижнього шару, мкм	500
- верхнього шару, мкм	500
Кількість міжшарових перехідних зварних з'єднань, шт.	8200

Склад ТЗ ДГС:

- плата гнучка нижня – поліімідний носій із шаром алюмінієвих провідників на основі лакофольгового діелектрика ФДИ-А-50 (ИУО.037.042 ТУ) – 1 шт.;

- плата гнучка верхня – поліімідний носій із шаром алюмінієвих провідників і вікнами у полііміді під зварювання з нижньою гнучкою платою на основі лакофольгового діелектрика ФДИ-А-50 (ИУО.037.042 ТУ) – 1 шт.

Двошарова ГС виготовлена за допомогою УЗ-зварювання із застосуванням автоматичного зварювального устаткування і склеювання верхньої і нижньої гнучких плат.

Формування монтажних з'єднань і переходів здійснювалося на установці ЭМ-4092 (рис. 5.4) зварювальним інструментом ИУ1-130-21, монтаж здійснювався за технологічних режимів, визначених у попередніх підрозділах.

Електричні параметри ТЗ ДГС:

- кількість зварних з'єднань – 8200 шт. ;
- цілісність електричних ланцюгів: опір < 50 Ом.

Конструкція верхнього шару плати тестового зразка (з технологічними зонами) представлена на рис. 5.13, а технологічні обмеження подано у табл. 5.8.

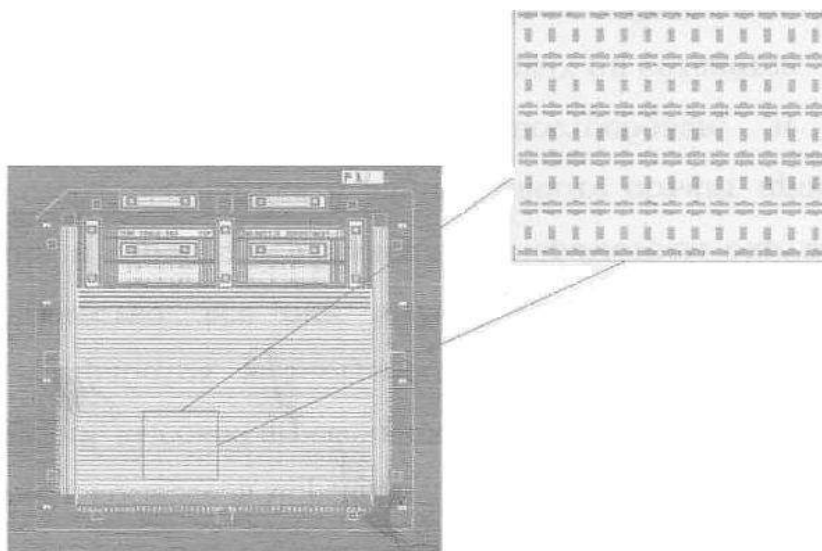


Рисунок 5.13 – Конструкція верхнього шару тестового зразка ГС

Таблиця 5.8 – Конструктивні параметри верхнього шару ТЗ ДГС

Конструктивні параметри	Значення
Ширина провідника, мкм	100
Розміри перехідних отворів для зварювання з провідниками нижнього шару, мкм	250 × 250
Крок провідників, мкм	500
Кількість провідників, шт.	109

Конструкція нижнього шару (з технологічними зонами) представлена на рис. 5.14, а його конструктивні параметри – у табл. 5.9.

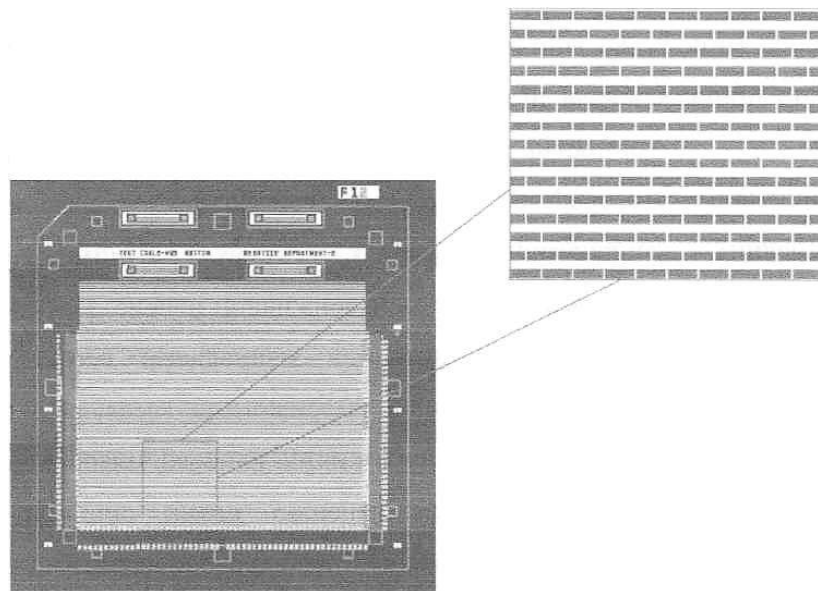


Рисунок 5.14 – Конструкція нижнього шару тестового зразка ГС

Таблиця 5.9 – Конструктивні параметри нижнього шару ТЗ ДГС

Конструктивні параметри	Значення
Ширина провідників, мкм	210
Крок провідників, мкм	500
Кількість сигнальних провідників, шт.	75

У технологічних зонах шарів ГС розміщуються тестові елементи з конфігурацією ділянок зварювання та реперні знаки для поєднання шарів, а також отвори для установки на жорстку основу.

У технологічній зоні нижнього шару двошарової ГС розташовуються провідники для здійснення контролю зварних з'єднань. У процесі складання технологічні зони видаляються. ТЗ ДГС містить кілька зон зварювання: з контактними площинками мікросхеми; з контактними площинками верхнього шару пасивної плати. Технологічна зона включає провідники для проведення контролю плати на цілісність провідників і відсутність коротких замикань. Комутація шарів ГС між собою здійснена УЗ-зварюванням через вікна у верхньому шарі полііміду у місці перетину провідників нижнього та верхнього шару. УЗ-зварювання може бути також використане для з'єднання ГС і мікросхемами та навісними компонентами на гнучких носіях з контактними площинками пасивної плати.

Вимірювання параметрів ТЗ ДГС проводилися за нормальних кліматичних умов.

Для відпрацювання ТП монтажу ЕТ на основі ГС і експериментального підтвердження результатів теоретичних розрахунків і вибору оптимальних режимів процесу монтажу проведені експериментальні дослідження впливу технологічних режимів на міцність зварних монтажних з'єднань, які підтвердили ефективність проведеної оптимізації технології монтажу.

У випробуваннях був задіяний ТЗ ДГС, будова й основні технічні характеристики якого детально розглянуті вище.

В експериментах використовувалися мікроелектроди з двома варіантами розташування канавок і виступів відносно провідника у момент зварювання (рис. 5.15), тобто для різних положень зварювальної головки у момент зварювання:

- з поворотом відносно провідника на кут 45° (рис. 5.15, а);
- перпендикулярно до провідника (рис. 5.15, б).

Найбільш високу міцність мало зварне з'єднання із ребрами жорсткості, що було отримане за використання електродів із перехресними канавками (рис. 5.16).

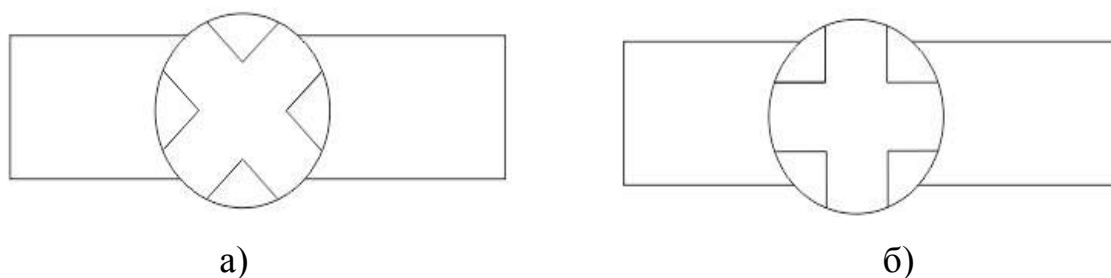


Рисунок 5.15 – Варіанти розташування канавок і виступів на електроді у момент зварювання відносно мікропроводника ГС

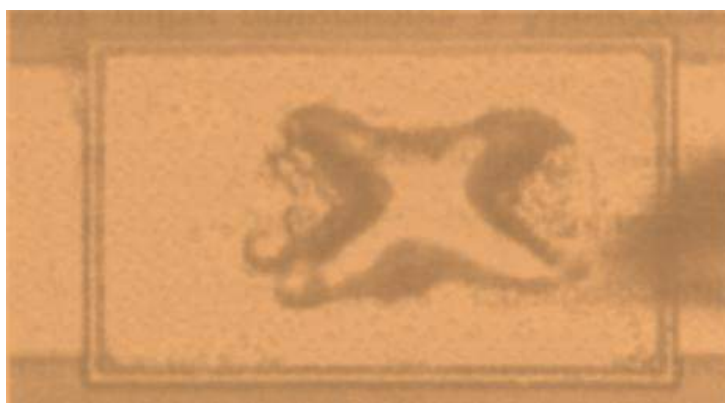


Рисунок 5.16 – Зварне з'єднання з ребрами жорсткості плоского алюмінієвого виводу

Як робочий інструмент під час виконання монтажу плоских виводів тест-плати між собою використовувалася голка для УЗ-зварювання типу ИУ1-130-21 (рис. 5.17). Робочий торець зварювального інструменту виконано у вигляді хрестоподібних канавок. Цим забезпечується отримання надійного механічного контакту плоского виводу зі зварювальним інструментом.

Для аналізу надійності монтажу досліджено вплив на цю характеристику основних параметрів (факторів) процесу: зусилля навантаження (стискання) P [Н] та потужності N [Вт] і часу зварювання t_{ze} [с].

Оцінка надійності зварного монтажного з'єднання проводилася за міцністю з'єднання на відрив.

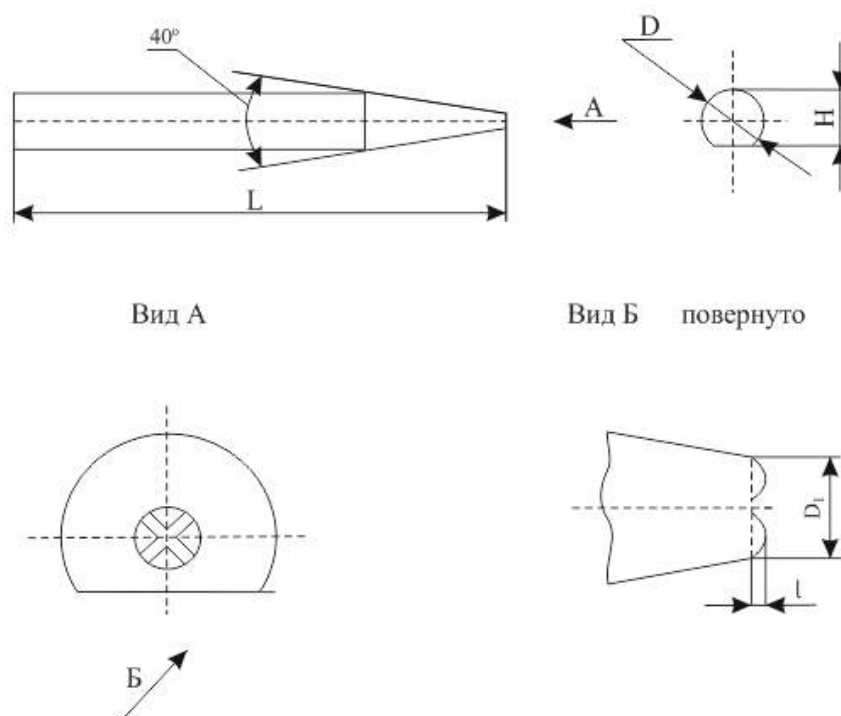


Рисунок 5.17 – Конструкція голки, призначеної для виконання
УЗ-зварювання

Враховувалися також такі фактори: зусилля руйнування під час випробувань на відрив F [Н], відносна деформація ТЗ ДГС ε [%], коефіцієнт варіації міцності γ [%]. Залежності відносної деформації ε від режиму процесу монтажу дають можливість більш повного трактування міцності з'єднання, а також дають деякі уявлення про механізм процесу утворення з'єднання під час УЗ-зварювання. Коефіцієнт варіації міцності γ дозволяє судити про надійність монтажного з'єднання у залежності від встановлених режимів монтажу.

Відносна деформація виводу оцінювалася за формулою

$$\varepsilon = \frac{h}{H} \cdot 100\%, \quad (5.12)$$

де h – висота осідання, мкм;

H – товщина алюмінієвого вивода, мкм.

Коефіцієнт варіації міцності розраховувався таким чином:

$$\gamma = \pm \frac{\sigma}{F_{\text{сер}}} \cdot 100\%, \quad (5.13)$$

де $F_{\text{сер}}$ – середньоарифметичне значення зусилля руйнування;

σ – середньоквадратичне відхилення;

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(F_i - F_{\text{сер}})^2}{n-1}}, \quad (5.14)$$

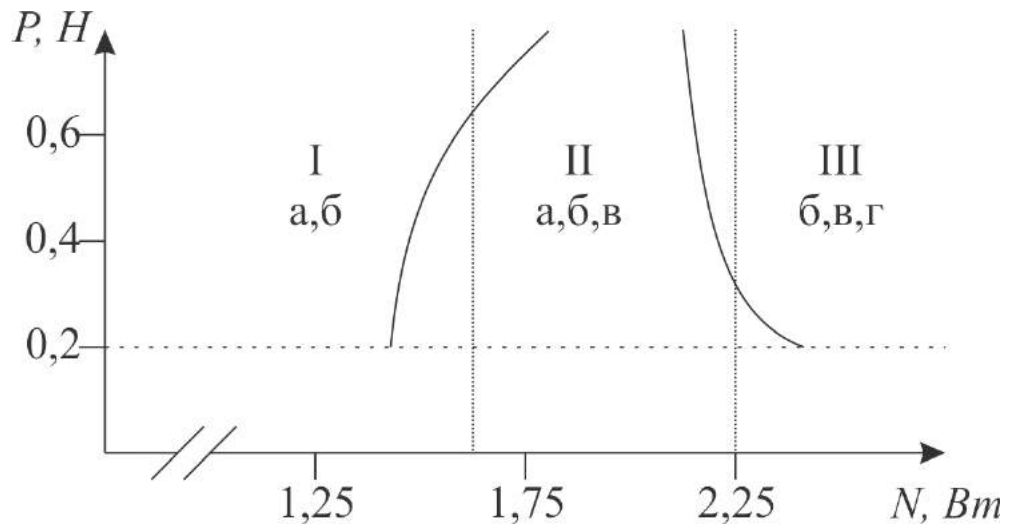
де F_i – зусилля руйнування для i -го зварного з'єднання;

n – кількість випробуваних з'єднань.

5.6.2 Експериментальні дослідження

У першу чергу визначалася область допустимих режимів монтажу. Для інтегральної оцінки в експериментах використано метод побудови порогових кривих. Для цього за поступового збільшення зусилля навантаження P і потужності N УЗ-генератора виконувалася зварювання з наступним випробуванням на відрив і зіставленням із рівнями допустимої міцності з'єднання.

На рис. 5.18 представлені характерні залежності, що формують такі області режимів монтажу: I – область режимів, які забезпечують міцність зварних з'єднань менше ніж $15 \cdot 10^{-2}$ Н; II – область допустимих режимів; III – область режимів, які забезпечують отримання зварних з'єднань із надлишковою деформацією (більше за 50 %).



а, б, в, г – вид руйнування зварного з'єднання по провіднику,
за навколошовною зоною, по зварному з'єднанню і відрив із розривом
провідника відповідно

Рисунок 5.18 – Області допустимих режимів зварювання за методом
побудови порогових кривих у залежності від потужності N і зусилля
навантаження P

У межах області допустимих режимів зняті залежності зусилля руйнування зварного мікроз'єднання F та коефіцієнта варіації $\mathcal{V}$ від основних режимів зварювання (зусилля навантаження, потужності та часу зварювання).

Залежності F і $\mathcal{V}$ від зусилля навантаження зварного інструменту P представлені на рис. 5.19.

Залежність $F = f(P)$ має свій максимум, який визначає оптимальні умови передачі енергії без втрат від зварювального інструменту до місця зварювання.

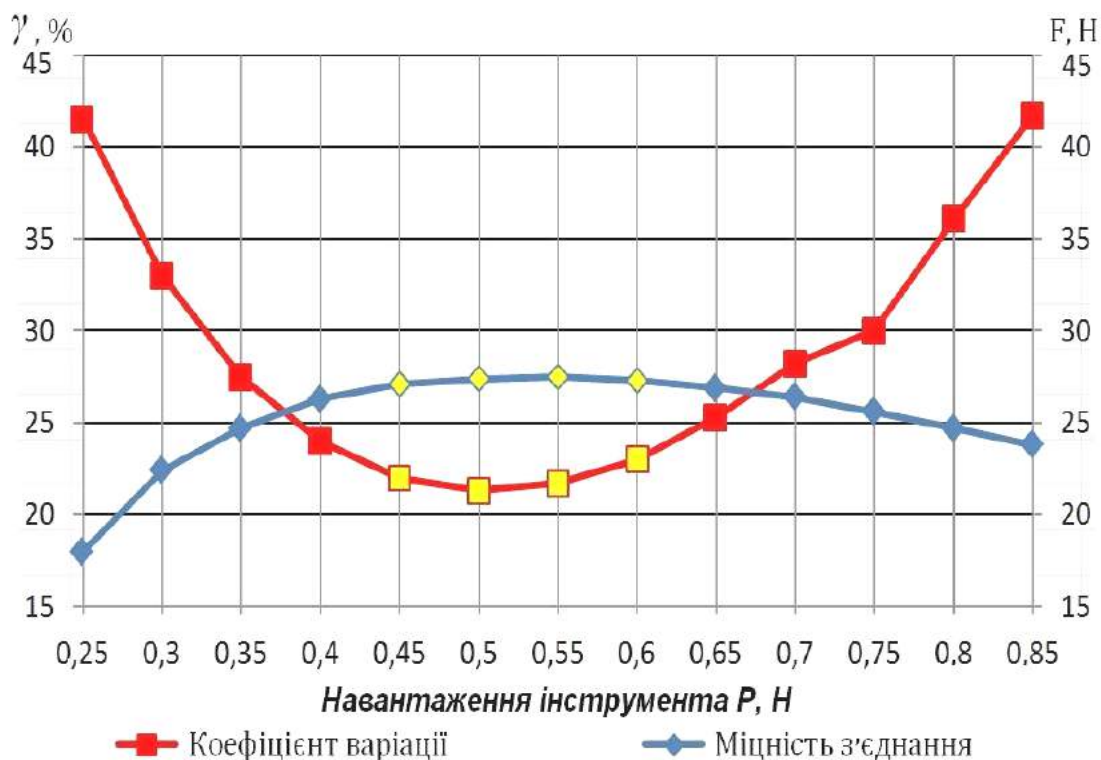


Рисунок 5.19 – Залежності міцності монтажного з'єднання F і коефіцієнта варіації γ міцності від зусилля навантаження зварного інструменту P

У результаті проведення експериментальних досліджень виявлено, що надмірне зростання зусилля стиснення P перешкоджає протіканню в зоні контакту процесів ковзання, що призводить до зниження міцності зварного з'єднання. При цьому оцінити стабільність міцності можна за коефіцієнтом варіації міцності. Збільшення коефіцієнта пов'язане зі зниженням стабільності і, навпаки, підвищення стабільності призводить до зменшення коефіцієнта.

Залежність $F = f(P)$ має діапазон стабільної міцності зварних з'єднань за тривалості імпульсу від 100 до 300 мс (рис. 5.20) у залежності від діаметру інструмента. Зниження міцності за подальшого збільшення часу зварювання свідчить про початок нового процесу розриву зв'язків, що вже утворилися, у зоні контакту алюмінієвих виводів.

Проведені дослідження показали, що збільшення амплітуди коливань

або потужності N призводять до утворення надрізів на металевих виводах, надмірного збільшення деформації, і отже, до зниження міцності зварного мікроз'єднання.

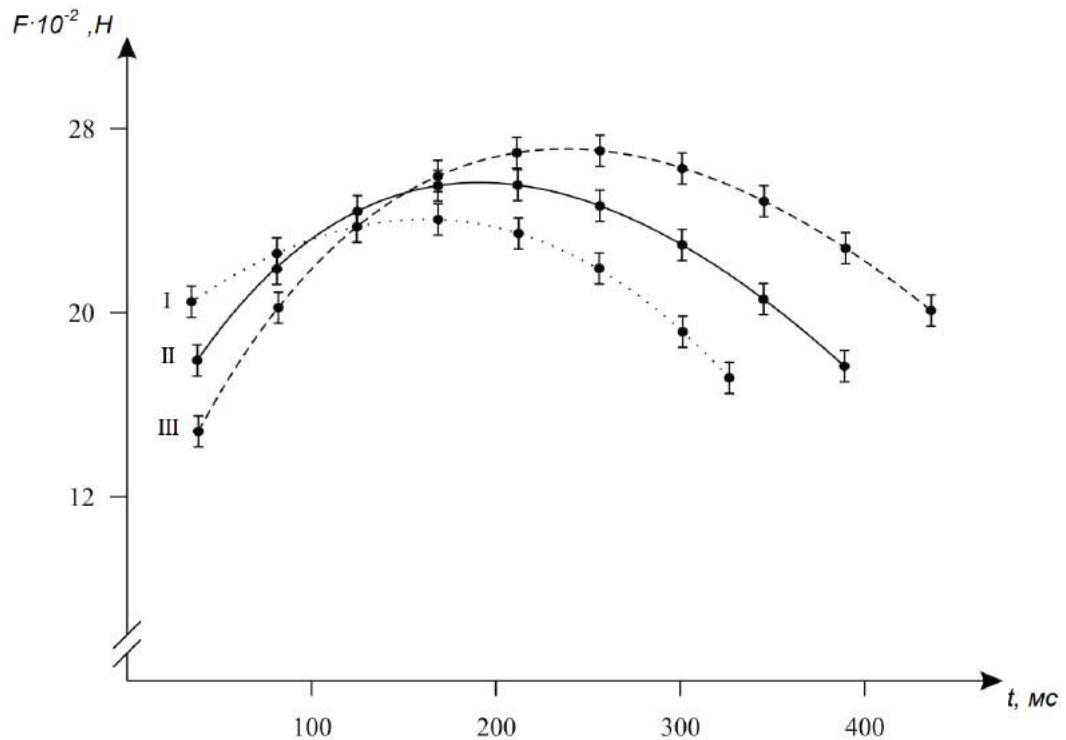


Рисунок 5.20 – Залежність зусилля руйнування під час випробувань на обрив зварного з'єднання F від часу зварювання $t_{зв}$ за діаметра зварювального інструменту 85 мкм (I), 100 мкм (II) і 130 мкм (III)

Конструктивно-технологічні параметри топології ГС під час автоматизованого складання істотно впливають на міцність зварного мікроз'єднання, визначаючи у кінцевому підсумку та надійність ЕТ вцілому. Металургійні та електричні характеристики зварного мікроз'єднання, як правило, ідентичні як за автоматизованого, так і за механізованого процесу складання та монтажу за рахунок підтримки параметрів зварювального процесу: потужності, тиску та часу УЗ-зварювання.

Дослідження параметрів і відсотка виходу придатних виробів відповідно до прийнятих критеріїв придатності у проведених експериментах виконано із залученням статистичного аналізу та побудови гістограм [57].

Площа зони приєднання обирається за умови забезпечення максимальної площі (надійності) зварного мікроз'єднання з урахуванням похибки позиціонування обладнання відносно нормального положення виводів, і деформації виводів у зварному мікроз'єднанні. Ці параметри прямо впливають на якість виробу, визначаючи міцність зварного з'єднання та ймовірність утворення перемичок із сусідніми выводами, а також технологічну обґрунтованість мінімізації топології монтажних зон.

Похибка позиціонування обладнання для автоматизованого процесу УЗ-зварювання визначається вбудованим процесором, кроковими та імпульсними двигунами, прецизійної механікою, і за паспортними даними становить не більше за ± 3 мкм. За ручного складання похибка, яка вноситься оператором, становить ± 20 мкм.

Встановлено, що для збереження міцності зварного мікроз'єднання на заданому в технологічній документації рівні допустиме зміщення зварної точки за межі контактної зони мікрозварювання має становити не більше $1/3$ відбитка зварювання. Таким чином, технічно обґрунтованим за мети досягнення суміщення та візуального контролю за суміщенням можна вважати наступне співвідношення між розмірами металевих виводів ГС A [мкм] і B [мкм]:

$$A = B - (15 \div 20 \text{ мкм}). \quad (5.15)$$

Експериментальні дослідження процесу монтажу з оцінкою за вищевказаним критерієм придатності (зміщення менше $1/3$) підтверджує співвідношення (5.15) у діапазоні досліджуваних параметрів: ширини мікрививоду верхнього шару ГС від 60 до 100 мкм і ширини виводів нижнього шару від 120 до 210 мкм.

В усіх випадках за досягнення співвідношення $A > (B - 20)$ [мкм] вихід придатних становить 100 %, тобто зсувів зварного з'єднання більше ніж на $1/3$ від ширини виводу не спостерігається. Вхідними даними під час моделювання для визначення виходу придатних були параметри: C , B_n , B_m і

D , де: C – розсміщення зварної плями відносно виводу; B_n – величина підтравлювання балки; B_m – топологічна ширина балки; D – діаметр інструмента.

Критерій придатності визначався за формулою:

$$C < (B_m - B_n) / 2 - D_n / 6. \quad (5.16)$$

Таким чином, на підставі проведених досліджень топологічні вимоги до елементів мікроконтактного вузла можна сформулювати наступним чином:

- розташування плоских провідників верхнього шару ГС має відповідати розташуванню провідників нижнього шару;
- оптимальна ширина алюмінієвого виводу верхнього шару має бути на 15-20 мкм меншою від лінійного розміру виводу нижнього шару;
- відстань між контактною зоною мікрозварювання та поліімідною рамкою має бути не меншою за 30 мкм.

Результати оцінки показників надійності конструктивних елементів ГС (зварних монтажних з'єднань) наведені нижче.

Таким чином, експериментально встановлений оптимальний режим процесу мікрозварювання характеризується досягненням максимальної міцності з'єднання за мінімального електричного опору контакту. При цьому помітний вплив на параметри процесу монтажу має стан поверхні використовуваних матеріалів.

Для оцінки інтенсивності відмов конструктивних елементів ДГС λ_0 за результатами випробувань невеликих вибірок з одиничними відмовами уточнена гіпотеза про вид функції розподілу часу до відмови за критерієм χ^2 (хі-квадрат) [126-127]:

$$\lambda_0 = \frac{\chi^2}{N \cdot k \cdot t}, \text{ (год}^{-1}\text{)}, \quad (5.17)$$

де χ^2 – критерій відмов (за нульового числа відмов і довірчої ймовірності 60 % значення $\chi^2 = 1,833$);

$N = 2625$ – кількість зварних з'єднань досліджуваної ГС (обсяг вибірки);

$k = 1$ – кількість досліджуваних зразків ГС;

$t = 100$ годин – час напрацювання на відмову (час, протягом якого проводилися випробування ГС).

Таким чином, відповідно до виразу (5.17) інтенсивність відмов мікрроз'єднань досліджуваної ГС склала

$$\lambda_0 = \frac{1,833}{2625 \cdot 1 \cdot 100} = 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ (год}^{-1}\text{)}.$$

При цьому час напрацювання на відмову склав

$$t_n = \frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{6,8 \cdot 10^{-6}} \approx 142857 \text{ (год.)} = 16 \text{ (років)}.$$

Висновки по розділу 5

В даному розділі запропонована нова конструкція плаского з'єднувача і розроблено та вдосконалено технологічний процес його виготовлення.

Обрано та обґрунтовано оптимальний режим монтажу виробів ЕТ на основі ГС.

Проведено дослідження і аналіз технологічних умов отримання надійних мікрроз'єднань на алюміній-поліімідних гнучких комутаційних структурах за допомогою УЗ-зварювання.

У п'ятому розділі використано інформацію з джерел [25, 48, 101-127].

ВИСНОВКИ

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 програмний засіб 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 ИР 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-коливань і тривалості зварювання.

Експериментально визначені оптимальні технологічні режими УЗ-зварювання: тривалість імпульсу – від 300 до 400 мс; потужність УЗ-коливань – 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.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Fjelstad J. Flexible circuit technology. BR Publishing, Inc. 2007. 198 p.
2. Лучинин В. Гибкая электроника. Наноиндустрия. 2013. Вып. 8. С. 43-47.
3. Сридхар К. Конструкции переменной формы. В мире науки. № 7-8. 2014. С. 82-90.
4. Медведев А. М., Мылов Г. В., Набатов Ю. А., Люлина В. И. Гибкие платы. Преимущества и применение. Компоненты и технологии. 2007. № 9. С. 202-208.
5. Баширов А., Морозов В. Монтаж микросхем на гибком носителе – дань прошлому или приближение будущего? Печатный монтаж. 2007. № 5. С. 2-4.
6. Грушевский А. М., Семенин С. Н., Жуков П. А., Карвасарный В. В. Технология прецизионного монтажа на полиимидных платах. Известия вузов. Электроника. 2005. № 6. С. 36-40.
7. Акулин А. Варианты применения и конструкции гибко-жестких плат. Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6. С. 18-20.
8. Замирец Н. В., Борщев В. Н., Листратенко А. М., Антонова В. А., Семенов Л. П., Проценко М. А., Тымчук И. Т. Алюминиевая "Chip on flex" (COF) технология в радиационном приборостроении. Технология приборостроения. 2007. № 2. С. 3-9.
9. Плис Н. И., Жора В. Д., Грунянская В. П., Воробьев А. В., Сергеева Н. Н., Медведев В. В. Преимущества технологии изготовления гибких полиимидных носителей из лакофольговых диэлектриков с полной степенью имидизации. Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии». Одесса, 2015. С. 238-239.
10. Куве М., Босуи Ф., Баэтс Й, Вонфлитерен Я. Гибкие и эластичные электронные системы для комических приложений: пер. с англ. Технологии в

электронной промышленности. 2015. № 8. С. 34-38.

11. Мылов Г., Медведев А., Семенов П., Дрожжин И. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Горячая Линия – Телеком. 2016. 268 с.

12. Технологии в производстве электроники. Часть III. Гибкие печатные платы / под ред. А. М. Медведева и Г. В. Мылова. М.: Группа ИДТ, 2008. 488 с.

13. Акулин А. Проектирование гибко жестких печатных плат. Материалы, конструкции и особенности проектирования. Технологии в электронной промышленности. 2007. № 8. С. 18-20.

14. Люлина В., Медведев А., Мылов Г., Набатов Ю., Семенов П., Сержантов А., Шкундина С. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 1. Производство гибких печатных плат без металлизированных отверстий. Технологии в электронной промышленности. - 2008. - №3. - С.6-11.

15. Люлина В., Медведев А., Мылов Г., Набатов Ю., Семенов П., Сержантов А., Шкундина С. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 2. Производство гибких плат с металлизированными отверстиями. Технологии в электронной промышленности. 2008. № 4. С. 24-29.

16. Люлина В., Медведев А., Мылов Г., Набатов Ю., Семенов П., Сержантов А., Шкундина С. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 3. Нанесение покровного слоя. Технологии в электронной промышленности. 2008. № 5. С. 32-40.

17. Люлина В., Медведев А., Мылов Г., Набатов Ю., Семенов П., Сержантов А., Шкундина С. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 4.1. Изготовление гибких и гибко-жестких многослойных плат. Технологии в электронной промышленности. 2008. № 6. С. 22-26.

18. Люлина В., Медведев А., Мылов Г., Набатов Ю., Семенов П., Сержантов А., Шкундина С. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 4.2. Изготовление гибких и гибко-жестких многослойных плат. Технологии в электронной промышленности. 2008. № 7. С. 24-31.

19. Люлина В., Медведев А., Мылов Г., Набатов Ю., Семенов П.,

Сержантов А., Шкундина С. Производство гибких и гибко-жестких печатных плат. Часть 6. Специальные средства контроля и испытания печатных плат. 2009. № 1. С. 11-21.

20. Борщов В. Н., Невлюдов И. Ш., Проценко М. А., Тымчук И. Т., Хатнюк И. С. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких алюминий-полиимидных микрокабелей. Технология приборостроения. 2011. №1. С. 3-8.

21. Погалов А. И., Грушевский А. М., Семенин С. Н., Блинов Г. А. Моделирование и прочностной анализ гибких шлейфов. Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2006. №1. С. 49-50.

22. Погалов А. И., Грушевский А. М., Балабанов В. Т. Прочностная надежность микросоединений бескорпусных интегральных схем бесконтактных идентификаторов. 10-я международная научная конференция «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» ПЭМ-2006. Дивноморское, 2006. С. 172-173.

23. Погалов А. И., Грушевский А. М., Блинов Г. А., Балабанов В. Т. Термопрочность микросоединений бескорпусных ИС бесконтактных идентификаторов. Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2007. №1. С. 38-42.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Воробьев А. В., Жора В. Д. Гибкие фольгированные диэлектрики: классификация и анализ направлений применения и совершенствования. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 4. С. 56-61.

29. Гибкие печатные антенны для систем глобального позиционирования. URL: <http://rlocman.ru/news/new.html> (дата звернення: 13.11.2015).

30. Гибкие аккумуляторы для носимых устройств. URL: <http://mobiledevice.ru/81320-panasonic-akkumuliator-gibkii-nosimie-ustroistva-smart-Wat.aspx> (дата звернення: 27.01.2016).

31. Гибкие солнечные батареи. URL: <http://membrana.ru/particle/16792> (дата звернення: 28.11.2015).

32. Встраиваемые гибкие GSM/UMTS антенны. URL: <http://ultran.ru/vstraivaemye-gibkie-gsmumts-anteny> (дата звернення: 08.02.2015).

33. Гибкие OLED дисплеи WiseChip. URL: <http://ultran.ru/newslist/optoelektronika/gibkie-oled-displei-wisechip> (дата звернення: 13.05.2015).

34. Микродроны с фасеточными глазами. URL: <http://mforum.ru/news/article/113855.html> (дата звернення: 26.0.2015).

35. Органическая гибкая флеш-память. URL: <http://membrana.ru/particle/14499> (дата звернення: 01.02.2016).

36. Гибкая память на мемристорах. URL: <http://membrana.ru/particle/17978> (дата звернення: 18.08.2015).

37. MEMS and MOEMS Technology and Applications / by P. Rai-Choudhury edition. SPIE Press, 2000. 528 p.

38. Разумов-Фризюк Е. А. Технологическое обеспечение электрического контроля многослойных коммутационных плат в

электронной технике: дис. канд. техн. наук. Харьков, 2010. 160 с.

39. Keith Netting. Another dimension. URL: <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/another-dimension-2/15041> (дата звернення: 20.04.2014).

40. Peter Macleod. A Review of Flexible Circuit Technology and its Applications : PRIME Faraday Partnership. 2002. 54 p.

41. Пирогова Е. В. Проектирование и технологии печатных плат. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. 560 с.

42. Невлюдова В. В. Анализ особенностей проектирования модулей радиотехнических систем на основе гибких коммутационных структур. Технология приборостроения. 2015. №1. С. 69-72.

43. Акулин А. Гибкие и гибко-жесткие печатные платы. Комментарии к стандарту IPC-2223A. Часть 1. Электронные компоненты. 2005. № 10. С. 1.

44. Акулин А. Гибкие и гибко-жесткие печатные платы. Комментарии к стандарту IPC-2223A. Часть 2. Электронные компоненты. 2005. № 11. С. 27.

45. Невлюдова В. В. Моделирование технического ресурса радиоэлектронных средств. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. Вип. 4. С. 3-7.

46. Притчин С. Е., Гуріна Д. В., Демська Н. П. Методи контролю якості гнучких структур. Radioelectronics & Informatics journal. 2016. №3. С. 3-6.

47. Невлюдова В. В. Анализ процесса формирования микросоединений методом сварки ультразвуком при изготовлении гибких печатных плат. Технология приборостроения. 2016. № 2. С. 35-38.

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

49. Разумов-Фризюк Е. А., Невлюдова В. В., Демская Н. П. и др. Оценка влияния механических воздействий на гибкие печатные платы. Проблеми тертя та зношування. 2016. № 1 (70). С. 143-149.

50. Балан Н. Н. Определение упругих свойств подвижных элементов MEMS-структур. Микросистемная техника. 2004. №4. С. 14-19.

51. The Black Pad Failure Mechanism – From Beginning to End\Ronald A. Bultwith, Michael Trosky, Louis Picehione, Darlene Hug/Cookson Electronics Assembly Materials Group – Alpha Metals, Global SMT and Packaging Journal, Sept. 2002.

52. Якупов Н. М., Куприянов В. Н., Якупов С. Н. К исследованию механических характеристик пленок и пленочных структур. Известия КазГАСУ. 2008. №1 (9). С. 106-112.

53. Андрусевич А. А., Палагин В. А., Разумов-Фризюк Е. А., Жарикова И. В., Невлюдова В. В. Выбор топологии гибких коммутационных шлейфов для телекоммуникационных устройств на основе теоремы Байеса. Проблемы телекоммуникаций. 2014. № 3 (15). С. 95-105.

54. IPC-2223A. Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards. www.ipc.org.

55. IEC 62326-7(62249). Part 7: Quality and performance specification for flexible printed boards (IPC-6013).

56. IEC 62326-7-1 Part 7-1: Performance Guide for single & double-sided flexible printed boards (JPCA DG02).

57. IEC 61249-3 Part 3: Sectional specification set for unreinforced base materials, clad and unclad (intended for flexible printed boards).

58. IEC 61249-3-1 Part 3-1: Part 3-1 Copper-Clad Laminate for Flexible Printed Wiring Boards (Adhesive and Non-adhesive types) – (PAS JPCA BM03).

59. IEC 61249-3-2 Part 3-2: Flexible copper-clad polyimide film, single and double sided.

60. IEC 61249-3-3 Part 3-3: Adhesive coated flexible polyester film (Superseded by 61249-3-1).

61. IEC 61249-3-4 Part 3-4: Adhesive coated flexible polyimide film (Superseded by 61249-3-1).

62. IEC 61249-3-5 Part 3-5: Transfer adhesive film for flexible printed

boards (Superseded by 61249-3-1).

63. Глудкин О. П., Горбунов Н. М., Гуров А. И., Зорин Ю. В. Всеобщее управление качеством. М.: Горячая линия – Телеком. 2001. 600 с.

64. Ильенкова С. Д., Ильенкова Н. Д., Мхитарян В. С. и др. Управление качеством: учебник для вузов. / под. ред. С. Д. Ильенковой. 2-е издание, перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2006. 334 с.

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

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

67. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. М.: Радио и связь, 1990. 544 с.

68. Невлюдова В. В., Жарикова И. В., Боцман А. С. Системологический метод анализа изменения параметров РЭА. Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ-2016). Кременчук: КрНУ, 2016. С. 269-270.

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

70. Жарикова И. В., Невлюдова В. В. Системологический подход при исследовании параметров ЭТ. Технология приборостроения. 2014. №2. С. 40-43.

71. Андрусевич А. А., Жарикова И. В., Невлюдова В. В., Демская Н. П. Отображение процесса изменения параметров РЭС на основе системологической модели. Системи обробки інформації. 2014. Вип. 8 (124). С. 8-12.
72. Невлюдова В. В. Модернизация мониторинга жизненного цикла информационно-коммуникационных систем. Сборник трудов 9-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013». Севастополь, 2013. С. 47.
73. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов / под ред. А. В. Александрова. 3-е изд. испр. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
74. Горшков А. Г. и др. Сопротивление материалов. М.: Физматлит, 2005. 544 с.
75. Финстад М. Разработка гибких печатных плат. Печатный монтаж. 2006. №1. С. 6-9.
76. Медведев А. Финишные покрытия в производстве печатных плат. Технологии приборостроения. 2005. № 2. с. 9-18
77. Zharikova I., Novoselov S., Nevlyudova V., Botsman O. Electromagnetic Compatibility Analysis of the Infocommunication Systems Components on the Flexible Structures Basis. Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv. 2015. PP. 101-103.
78. Невлюдова, В. В. Жарикова И.В. Анализ электромагнитной совместимости компонентов радиотехнических систем на основе гибких коммутационных структур. Первая международная научно-техническая конференция «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи (ЭМС-2015)». Х.: ХНУРЭ, 2015. С. 116-118.
79. Картер Б. Техника разводки печатных плат. Ч. 1. Chip News. 2004. №7 (90). С. 63-70.
80. Федоров В. К., Сергеев Н. П. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005. 504 с.

81. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под ред. А. И. Коробова. М.: Радио и связь, 2002. 272 с.

82. Млицкий В. Д., Беглария В. Х., Дубицкий Л. Г. Испытание аппаратуры и средства измерений на воздействие внешних факторов. М.: Машиностроение, 2003. 567 с.

83. Федоров В., Сергеев Н., Кондрашин А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005. 504 с.

84. Новоселов С.П., Боцман А.С., Невлюдова В.В. Экспериментальная установка для исследования влияния механических вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств на основе гибких модулей. Приборы и методы измерений. 2015. Т. 6, № 2. С. 156-162.

85. Жарікова І. В., Новоселов С. П., Невлюдова В. В., Боцман О. С. Дослідження параметрів гнучких шлейфів під впливом вібрацій. Зб. доповідей Міжрегіон. наук.-практ. конф. молодих вчених «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2015. С. 37-39.

86. Вишницкий А.Ф., Резник А.Ю., Балабанов В.Т. Анализ конструкций пленочных индуктивных антенн для различных типов бесконтактных радиочастотных идентификаторов. VIII ВНТК «Современные промышленные технологии», Всероссийская научно-техническая конференция. Тезисы докладов. – Нижний Новгород: Нижегородский научный и информационно-методический центр «Диалог», 2007, С. 24.

87. Двокоординатний вібростенд: патент на корисну модель № 81635 України / О. Є. Божко, В. І. Бєлих, К. Б. Мягкохліб, С. Ю. Пучков: заявл. 20.12.2012, опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13. 4 с.

88. Патент № 2515353 РФ. Маятниковый низкочастотный вибростенд / С. Н. Ковалев: заявл. 05.09.2012, опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13. 8 с.

89. Боцман И. В., Боцман А. С., Невлюдова В. В. Динамические

испытания гибких коммутационных структур. Тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій». Запоріжжя: ЗНТУ. С. 211-212.

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

91. Невлюдова В. В., Жарикова И. В. Исследование гибких коммутационных структур при механических воздействиях. Збірник доповідей 20-го Ювілейного Міжнародного молодіжного форуму «Радіoeлектроніка і молодь в ХХІ столітті». Т. 2. Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіoeлектронного приладобудування. Х.: ХНУРЕ. 2016. С. 43-44.

92. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1980. 256 с.

93. Gullerud A.S., Dodds R.H. Jr., Hampton R.W., Dawicke D.S. 3-D finite element modeling of ductile crack growth in thin aluminum materials // Fatigue and Fracture Mechanics: 30 th Volume/ eds. K.L. Jerina, P.C. Paris, American Society for Testing and Materials. 1998. P.104-111

94. Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. 226 с.

95. Hanq D. A., Walters A. J., Beuth J. L. Development of an object-oriented fatigue tool. Engineering with computers. V. 16, 2000. P. 131-144.

96. Peters M, Hoppe U, Hackl K. Simulation of crack-propagation using embedded discontinuities. Proceedings of the second international conference Lifetime-oriented design concepts. Bochum, 2004. P. 141-147.

97. Павлов П. А. Основы инженерных расчетов элементов машин на

усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 321 с.

98. Розин Л. А. Метод конечных элементов. Соровский образовательный журнал, т. 6. 2000. № 4. С. 120-127.

99. Андрусевич А. А., Стародубцев Н. Г., Невлюдова В. В. Методика моделирования механических процессов в конструкциях РЭС на основе конечно-элементных моделей. Технология приборостроения. 2014. №1. С. 28-32.

100. Гришин А. Н. Анализ конструкций радиоэлектронных средств на основе конечно-элементных моделей. Орел: ФГБОУ ВПО. 2007. С. 56-59.

101. IPC-D-279. Design Guidelines for Reliable Surface Mount Technology Printed Board Assemblies.

102. Connector for FPC / FFC: patent of Korea № KR 20020083891 A / Hayasi Naoki, Sato Tomoyuki. 27.04.2001.

103. Держанский М. Соединители для плоских кабелей (FPC, Micro-Match, AMP-Latch). Новости электроники. 2014. № 3. С. 9-14.

104. Пономарева А. В., Невлюдова В. В. Влияние технологических режимов операции ультразвуковой сварки на надежность монтажных соединений. Радиотехника. 2012. Вып. 170. С. 143-148.

105. Filipenko O., Palagin V., Razumov-Friuzyk I., Nevliudova V. etc. Development of MEMS construction connect devices with a self-test connections. Information and Telecommunication Sciences. 2016. № 2. P. 10-19.

106. Невлюдов И. Ш., Проценко М.А., Хатнюк И.С., Федосеев Л.С. Использование метода планирования экспериментов при оптимизации процесса микромонтажа многослойных конструкций гибких коммутационных структур. Збірник наукових праць «Вісник Національного технічного університету “ХТО”». Харків: НТУ «ХПІ», 2012. Вип. № 9. С.30-35.

107. Невлюдов И. Ш., Хатнюк И. С. Анализ влияния конструктивно-технологических факторов на кинетику формирования сварного микросоединения. Вестник Национального технического университета «ХПИ». 2012. Вып. 1. С. 13-17.

108. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование

эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 277 с.

109. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде. Количественный подход. М.: Физматлит, 2002. 215 с.

110. Палагин В. А. Методика проектирования выхода годных толстопленочных микросборок. Депонир. рукопись ЦНТИ. Харьков, 1989. Вып. №5. 13 с.

111. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / В. Л. Волкович, А. Ф. Волошин, В. А. Заславский и др; под общ. ред. В. С. Михалевича. К.: Наукова думка, 1992. 312 с.

112. Невлюдова В. В. Анализ влияния надежности сварных монтажных соединений на безотказность РЭС на базе ГКС. Материалы 19-го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Харьков. 2015. Т.2. С. 137-138.

113. Стародубцев Н. Г., Невлюдова В. В. Моделирование процесса монтажа РЭС методом УЗ-микросварки. Труды 25 международной конференции «Новые технологии в машиностроении». Коблево-Харьков. 2015. С. 15-16.

114. Tricomi A. The CMS Inner Tracker Silicon Microstrip Modules: Production and test. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2007. Vol. 570 (2), N 1. P. 248-252.

115. Грачёв А. А., Кожевников А. П., Лебига В. А. Ультразвуковая микросварка. Москва: Энергия, 1977. 184 с.

116. Заводян А. В., Грушевский А. М. Анализ сборочно-монтажных процессов производства электронных средств. М.: МИЭТ, 2005. 200 с.

117. Бражник В., Хохлов М., Чернышов А. Развитие технологии многокристальных модулей ОЗУ. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008. № 3. С. 48-52.

118. Патент № 2312474 РФ. Прецизионный гибкий шлейф и способ высокоплотного монтажа электронных приборов с помощью таких шлейфов / Г. А. Блинов, А. М. Грушевский, С. Н. Семенин: заявл. 27.01.2007,

опубл. 10.12.2007, Бюл. № 34. 5 с.

119. Балабанов В. Т. Технология создания плоских микромодулей для приборов бесконтактной идентификации: автореф. дис. ... техн. наук: 05.27.06. Москва, 2008. 26 с.

120. Семенин С. Н. Исследование и разработка прогрессивной технологии прецизионных гибких полиимидных шлейфов для высокоплотного монтажа: автореф. дис. ... техн. наук: 05.27.06. Москва, 2006. 29 с.

121. Грушевский А. М., Семенин С. Н., Жуков П. А., Карвасарный В. В. Технология прецизионного монтажа на полиимидных платах. Известия вузов. Электроника. 2005. № 6. С. 36-40.

122. Невлюдов И.Ш., Проценко М. А., Хатнюк И. С. Разработка метода ускоренных испытаний элементов гибких коммутационных плат на надёжность и отказоустойчивость. Матеріали Х міжнародної науково-практичної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»: зб. матеріалів конференції. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2011. С. 22-23.

123. Переверзев Е.В., Алланов А. Г., Даниев Ю.Д., Новак П.Н. Надежность технических систем: монография. Д.: Пороги, 2002. 396 с.

124. Дубняков О.В. О проблемах измерения, моделирования, контроля и управления в микроэлектронике. Научно-технический журнал «Автоматизация и современные технологии». М., 1993. Вып. №6. С. 27-35.

125. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем: монография. К.: Логос, 2002. 486 с.

126. Ямпурин Н. П., Баранова А.В. Основы надежности электронных средств. М. : Издательский центр «Академия». 2010. 240 с.

127. Светлицкий В.А. Статистическая механика и теория надежности. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 504 с.

ДОДАТОК А
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор –

Головний конструктор ДП НДТІП,

д.т.н., професор



Замірець М.В.

2017р.

м. Харків

Технічний акт

**про впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Невлюдової Вікторії Валеріївни**

Комісія у складі: голови — заступника генерального директора, д.т.н. Овчаренко В.Є., членів: начальника відділення № 4 Лебідя В.О., старшого наукового співробітника, к.т.н. Зубкова В.М., склала цей Акт що засвідчує впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи Невлюдової Вікторії Валеріївни у ДП Науково-дослідному технологічному інституті приладобудування.

Комісія відзначила доцільність використання на етапі проектування технологічного оснащення електричного контролю гнучких шлейфів на поліімідному носії з'єднувачів з нульовою силою вставки згідно рішення дисертантки за патентом України на корисну модель № 103402 МПК H01R 12/32.

З'єднувач створює однакову величину притискання його контактів до виробу, що контролюється, за допомогою повітряної подушки, а також забезпечує простоту підключення шлейфів, узгодженість технологій виготовлення шлейфів та контактної частини з'єднувача, можливість виключення пайки виводів з'єднувача за рахунок подовження його власної контактної системи.

Практичне застосування наукових положень та результатів, отриманих при виконанні дисертації, підтверджено впровадженням при виконанні робіт

за темою «Технологічне забезпечення створення ракетно-космічної техніки. Створення перспективних технологій виготовлення приладів, шифр «Технологія-П» з забезпечення технологічності зварних міжшарових з'єднань у шлейфах за рахунок визначення розмірів та координат перехідних отворів відносно провідникової системи.

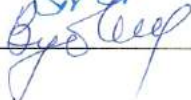
Очікуваний економічний ефект на одиницю продукції складає 11,0 тис. гривень.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої Вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:

 / В.Є. Овчаренко /

Члени комісії:

 / В.О. Лебідь /
 / В.М. Зубков /



ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ»
 _____ С.В. Демченко
 « 1 » березня 2017 р.
 м. Харків, пр. Гагаріна, 20, оф. 2319.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття ступеня кандидата технічних наук Невлюдової Вікторії Валеріївни

Комісія у складі:

голова:

Демченко С.В. – директор Товариства з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче підприємство «УКРІНТЕХ»;

члени комісії:

Вікторова О.В. – керівник випробувальної лабораторії ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ»;

Пилипенко К.В. – начальника служби сервісу та ремонту ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ»;

склала даний акт про те, що у випробувальній лабораторії (свідоцтво № 100-360/2015 від 29.12.2015 р. видане державним підприємством «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації») були використані стенди для досліджень гнучких комутаційних шлейфів, а саме низькочастотний вібростенд та стенд для динамічних випробувань, а також програмне забезпечення для відображення результатів контролю, які розроблені у дисертаційній роботі Невлюдової В.В.

Результати впровадження довели, що запропоновані Невлюдовою В.В. методи дослідження ґрунтуються на сучасних технологіях проведення випробувань, виконані на високому науково-технічному рівні та мають переваги над існуючими рішеннями, зокрема габаритні показники випробувальних стендів на 16% менше ніж відомі аналоги, при чому похибка вимірювань не перевищує 1% у всьому діапазоні випробувань.

Комісія підтверджує працездатність методів випробувань гнучких структур і запропонованого програмного продукту, а також той факт, що їх впровадження дозволило суттєво розширити функціональні можливості методів випробування гнучких комутаційних структур, дослідження яких пов'язане із низкою труднощів через їхні малі габаритно-масові показники.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії

Члени комісії

_____ С.В. Демченко
 _____ О.В. Вікторова
 _____ К.В. Пилипенко



ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Запорізького національного
технічного університету

проф. Беліков С.Б.

23.01 2017 р.

АКТ

з впровадження результатів дисертаційної роботи
Невлюдової Вікторії Валеріївни

Комісія у складі голови: декана факультету радіоелектроніки та телекомунікацій - к.т.н., доц. Кабака Владислава Семеновича та членів комісії: в.о. завідувача кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» - к.т.н., доц. Шило Галини Миколаївни, доцента кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» - к.т.н., доц. Фарафонов Олексія Юрійовича, доцента кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» - к.т.н. Фурманової Наталії Іванівни, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Невлюдової В.В. на тему «Технологічне забезпечення якості гнучких структур (ГС) у складі виробів електронної техніки (ЕТ)», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки у навчальний процес Запорізького національного технічного університету.

Склад впровадження:

- методи і моделі, що становлять основу для прогнозування і технологічного забезпечення якості ГС в складі виробів ЕТ;
- метод контактування ГС на основі плоского роз'єму з нульовою силою вставки, що відрізняється тим, що за рахунок забезпечення рівномірного тиску на всі виводи ГС дозволяє підвищити якість з'єднання ГС з компонентами ЕТ;
- технологія виготовлення ГС на поліамідному носії, що забезпечує формування якісних нероз'ємних і роз'ємних з'єднань мікромодулів.

Комісія встановила, що результати дисертаційної роботи Невлюдової В.В. були впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційні технології електронних засобів», Запорізького національного технічного університету при проведенні лабораторних та практичних занять робіт з курсів «Фізико-теоретичні основи конструювання електронних апаратів», «Матеріали та матеріалознавство електронних апаратів» та «Основи технології електронних апаратів» для спеціальності 172 – «Телекомунікації та радіотехніка».

Голова комісії:

Члени комісії:

В.С.Кабак

Г.М.Шило

О.Ю.Фарафонов

Н.І.Фурманова

ЗАТВЕРДЖУЮ
ректор КрНУ
проф. Загірняк М. В.
2017 р.



АКТ

з впровадження результатів дисертаційної роботи
Невлюдової Вікторії Валеріївни

Комісія у складі голови: декана факультету електроніки та комп'ютерної інженерії – к.т.н., доц. Мосьпана Владислава Олександровича, членів комісії: завідувача кафедри електронних апаратів – к.т.н., доц. Фомовської Олени Владиславівни, професора кафедри електронних апаратів – д.т.н., проф. Луценка Ігоря Анатолійовича, доцента кафедри електронних апаратів – к.т.н., доц. Кухаренка Дмитра Володимировича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Невлюдової В.В. на тему «Технологічне забезпечення якості гнучких структур (ГС) у складі виробів електронної техніки (ЕТ)», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки у навчальний процес Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

Склад впровадження:

- методи і моделі, що становлять основу для прогнозування і технологічного забезпечення якості ГС в складі виробів ЕТ;
- технологія виготовлення плоского з'єднувача для ГС;
- технологічні інструкції для забезпечення якості ГС на етапі їх виробництва.

Комісія встановила, що результати дисертаційної роботи Невлюдової В.В. були впроваджені у навчальний процес кафедри електронних апаратів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при проведенні лабораторних та практичних занять робіт з курсів «Матеріалознавство радіоапаратуробудування», «Технічна діагностика, контроль та випробування ЕЗ», «Матеріали та компоненти радіоелектронних засобів», «Методи та засоби аналізу експериментальних даних» для спеціальності 172 – «Телекомунікації та радіотехніка».

Голова комісії

В. О. Мосьпан

Члени комісії

О. В. Фомовська

І. А. Луценко

Д. В. Кухаренко



ЗАТВЕРДЖУЮВ.о. проректора з НМР
Харківського національного
університету радіоелектроніки

Рубан І.В.

**АКТ**з впровадження у навчальний процес
результатів дисертаційної роботи
Невлюдової Вікторії Валеріївни

Комісія у складі голови: декана факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій – д.т.н., проф. Филипенка Олександра Івановича, членів комісії: д.т.н., проф. кафедри Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) Цимбала Олександра Михайловича, д.т.н., проф. кафедри КІТАМ Палагіна Віктора Андрійовича, заступника завідувача кафедри КІТАМ з наукової роботи – к.т.н., проф. кафедри КІТАМ Євсєєва Владислава В'ячеславовича, к.т.н., доц. кафедри КІТАМ Пономарьової Ганни Вікторівни, к.т.н., доц. кафедри КІТАМ Разумова-Фризюка Євгенія Анатолійовича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Невлюдової В.В. на тему «Технологічне забезпечення якості гнучких структур у виробництві електронної техніки», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання і виробництво електронної техніки у навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки.

Комісія встановила, що наукові результати, запропоновані в дисертаційній роботі Невлюдової В.В. впроваджені у навчальний процес на кафедрі КІТАМ по дисциплінах: «Компоненти та технології мікросистемної радіоелектронної техніки», «Високі технології виробництва та інтелектуальні роботи», «Фізико-хімічні основи технології ЕА», «Мехатронні пристрої робото технічних систем» для студентів спеціальностей 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, спеціалізацій «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Системна інженерія»; 172 – Телекомунікації та радіотехніка спеціалізацій «Радіоелектронні апарати» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки».

Голова комісії

Члени комісії

О.І. Филипенко

О.М. Цимбал

В.А. Палагін

В.В. Євсєєв

Г.В. Пономарьова

Є.А. Разумов – Фризюк

Додаток Б

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 РІНЦ 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, PИНЦ, 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. Палагин, 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, PИНЦ 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, PИНЦ 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. – Р. 10–19. (*Включено до баз даних «Україніка наукова», УРЖ «Джерело», ВІНІТІ*).

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 «Радіoeлектроніка і молодь в ХХІ столітті», Т. 2. Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіoeлектронного 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 р. – 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 р. – Черкаси, 2015. – С. 135–137.

25. Жарікова І. В. Дослідження параметрів гнучких шлейфів під впливом вібрацій / І. В. Жарікова, С. П. Новоселов, В. В. Невлюдова, О. С. Боцман // 3б. 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.

ДОДАТОК В
ПАТЕНТИ ТА АВТОРСЬКІ СВІДОЦТВА









Додаток Г

Формування вимог до матеріалу ГС

Проаналізовані конструкторсько-технологічні напрямки розвитку техніки монтажу багатошарових ГС висувається багато специфічних вимог до якості матеріалу гнучких основ і до технологічних операцій під час виготовлення ГС та їх складання.

Ізоляційні матеріали ГС, перш за все, мають володіти високими питомими об'ємним і поверхневим опорами, низькою діелектричною проникністю для зменшення паразитних зв'язків між контактними елементами.

За фізико-механічними властивостями матеріал ГС має забезпечувати високу механічну міцність за її малої товщині, гарну теплопровідність, достатню теплову та хімічну стійкість під час виробництва та використання, негорючість, лінійну стабільність, температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР), близький до ТКЛР наносимих матеріалів (для зменшення внутрішніх механічних напружень у структурі). Крім того важливими технологічними характеристиками гнучких полімерних плат і кабелів слід вважати: можливість вибіркового травлення; високу міцність на розрив і вигин; стійкість до тертя; відсутність істотних газовиділень у вакуумі за високих температур.

Крім цього, матеріал для гнучкої друкованої основи повинен забезпечувати низьке водопоглинання для попередження розшарування та відшарування під час нагрівання та теплостійкість – для витримування паяння або зварювання без руйнувань і зниження гнучкості.

У багатьох ГС в якості ізоляційного матеріалу використовується дешева поліефірна плівка. Однак вона погано травиться, має низьку робочу температуру, велику усадку. Крім того, плівка є горючою.

У табл. Г.1 наведені характеристики використовуваних для виготовлення ГС матеріалів.

Таблиця Г.1 – Характеристики можливих матеріалів ГС

Параметри плівок	Матеріал плівок						
	Епокси- скло	Поліефір	Поліетилен	Фторо- пласт	Поліімід		
					Каптон Н	Каптон V	ФДИ-А
Жорсткість за розтягування	196	160	210	200	1750	1750	1200
Відносне подовження під час розриву, %:							
за 293 К	-	100	150	175	70	70	25
за 473 К	-	125	300	300	90	90	35
Модуль пружності	$31,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,98 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,248	0,2-0,4	0,2	0,24	0,148	0,148	0,148
Робоча температура, К	423	373	353	500	673	673,5	673
Температура плавлення, К	448	533	393	533	Деструкція за 723 К за декілька годин		
Водопоглинання за 24 год, %	1,5	0,7	0,8	0,5	2,9	2,9	3-3,5
Усадка за 423 К за 2 год, %	-	2,0	-	2-3	0,1-0,14	0,03-0,05	0,1-0,3
Відносна діелектрична проникність на частоті 1кГц	5,0	3,5	2,8	2,1	3,5	3,5	3,5
Тангенс кута діелектричних втрат на частоті 1кГц	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	-	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Напруженість пробою, В/м	-	295	20	150	276	276	150
Здатність до хімічного травлення	погана	задов.	задов.	погана	добра	добра	добра
Питомий опір за 20 °С, Ом·см	10^{18}	10^{18}	10^{11}	10^{17}	10^{11}	10^{18}	10^{17}

Полііміди є групою полімерів дуже міцних і стійких до впливу хімічних речовин і високої температури. Їхня міцність, а також хімічна та термічна стійкість є такими високими, що ці матеріали часто замінюють скло та метали, такі як сталь, у багатьох промислових застосуваннях, де до цих якостей висуваються високі вимоги. Поліімідна плівка відноситься до антифрикційних матеріалів, вона не розчиняється в органічних розчинниках, стійка в оліях, руйнується (гідролізується) під дією концентрованих кислот і лугів. Має високу радіаційну стійкість.

Завдяки перерахованим властивостям поліімідні плівки знайшли широке застосування в авіації, електротехніці, радіомеханіці та багатьох

інших галузях промисловості, в основному в якості високоміцного ізоляційного матеріалу. Великою перевагою такої ізоляції є її негорючість. Використання такої електроізоляційної плівки дозволяє збільшити питому потужність і надійність електромашин, механізмів і приладів, підвищує температуру їх експлуатації, зменшує об'єм і вагу. Поліімідна плівка добре металізується.

Для полііміду, поряд з високою міцністю на розтягування, хорошими ізоляційними властивостями, хімічною стійкістю, негорючістю та ін. характерні також властивості, які роблять його незамінним у технологічних процесах, пов'язаних із вакуумним осадженням плівок і фотолітографією. Це перш за все відсутність істотних газовиділень у вакуумі до температур 473-523 К і здатність до однорідного травлення у сильних лужних середовищах.

Поліімід є слабополярним середньочастотним матеріалом, із $\operatorname{tg} \delta = 0,003$. Діелектричні втрати полііміду зменшуються із підвищенням температури: так, за 493 К його $\operatorname{tg} \delta = 0,0006$.

Поліімідні плівки – домінуючий полімерний матеріал для виготовлення ГС. Вони мають такі переваги: висока гнучкість за всіх температур; хороші електричні властивості; висока хімічна стійкість (за винятком гарячого концентрованого луку), тугоплавкість; дуже хороша стійкість до розриву (але погане поширення розриву); поліімід легко піддається травленню у концентрованих лугах, що дозволяє виготовляти наскрізні перехідні отвори діаметром 70 ... 100 мкм, таким чином отримуючи електричні переходи під час формування багатошарових комутаційних плат на поліімідній плівці; робоча температура – від - 200 до + 300 °С.

До недоліків поліімідних плівок можна віднести: високе водопоглинання (до 3 % за вагою), через що поліімід потребує технологічного сушіння та захисту; відносно висока вартість, зважаючи на малу масу споживаного матеріалу.

Додаток Д
Вихідні параметри для дослідження ГС

Основні норми та вимоги за кліматичними та механічними впливами на ЕТ наведено у табл. Д.1.

Таблиця Д.1 – Основні норми та вимоги до ГС у складі ЕТ

Зовнішні впливи	Діапазон зміни параметрів, що впливають на вироби ЕТ		
	Наземна ЕТ	Корабельна ЕТ	Літакова ЕТ
І. Кліматичні впливи			
1. Температура максимальна, °С			
- робоча	50	30-60	60-110
- гранична	60	65	80-260
2. Температура мінімальна, °С			
- робоча	40	40	60
- гранична	40	40	90
3. Вологість відносна			
- насиченість, %	80-93	98-100	93-100
- температура, °С	25	25	25
4. Акустичні шуми			
- рівень, дБ	85-125	75-140	130-150
- частота, Гц	50-1000	50-1000	50-1000
5. Атмосферний тиск, Па			
- максимальний	$10,6 \cdot 10^4$	$10,6 \cdot 10^4$	$10,6 \cdot 10^4$
- мінімальний	$5,7 \cdot 10^4$	$8,8 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^4$
ІІ. Механічні впливи			
1. Вібрації			
- частота, Гц	10-70	0-120	5-2000
- прискорення, g	1-4	1,5-2	до 20
2. Ударні стрясання			
- прискорення, g	10-15	15	6-12
- тривалість, мс	5-10	5-10	до 15
3. Одиночні удари			
- прискорення, g	50-1000	до 1000	-
- тривалість, мс	0,5-10	0,5-2	-
4. Лінійне прискорення, g			
- уповільнене	2-4	-	4-6
- відцентрове	2-5	-	4-10

У табл. Д.2 подано перелік вхідних параметрів для проведення досліджень ГС.

Таблиця Д.2 – Перелік вхідних параметрів для проведення досліджень ГС

Назва параметру	Діапазон значень
Частота зовнішніх коливань	0 ... 5000 Гц
Амплітуда коливань	0 ... 50 мм
Напрямок впливу коливань	вертикально до друкованого модуля
Прискорення	0 ... 5g
Зусилля розтягування	0 ... 100 Н
Радіус вигину	1 ... 50 мм
Висота прогину ГС	0 ... 20 мм

Додаток Е

Аналіз електромагнітної сумісності компонентів ЕТ на основі ГС

Надійність електронної апаратури багато в чому забезпечується конструктивно-технологічними рішеннями. Підвищення щільності розміщення елементів з'єднань на одиницю площі ГС, збільшення їх абсолютного числа та зменшення розмірів ускладнюють завдання забезпечення надійності компонентів ЕТ на основі ГС.

Під час проектування виробів ЕТ передбачено обов'язкове врахування вимог щодо електромагнітної сумісності (ЕМС) компонентів, які входять до їх складу. Завдання аналізу ЕМС ДП на основі гнучких комутаційних структур є досить трудомісткими, оскільки його вирішення постійно ускладнюється у зв'язку зі зростанням щільності монтажу і верхньої частоти спектру корисних та перешкоджаючих сигналів у ЕТ, а також зі зменшенням рівнів корисних сигналів і зростанням рівнів завад.

Аналіз ЕМС друкованих вузлів у складі ЕТ призначений для проведення комплексної оцінки якості конструкторської розробки, що підтверджує правильність прийнятих конструкторсько-технологічних рішень, які забезпечують функціонування ЕТ у заданих умовах і з необхідною якістю.

Від ефективності такого аналізу багато в чому залежить надійність виробів ЕТ, яка закладається на етапі проектування.

Аналіз ЕМС виконується з урахуванням паразитних параметрів електронних компонентів. Під час комп'ютерного моделювання цілісності сигналу враховується частотна залежність матеріалів ГС: прокладок, препрегів, паяльної маски, вологозахисного покриття. За рахунок більш точного моделювання реального впливу компонентів і матеріалів ГС знижуються витрати виробництва модулів ЕТ за рахунок виключення

повторного проектування ГС через виявлення шляхів проникнення високочастотних електромагнітних завад під час випробувань.

Аналіз ЕМС друкованих вузлів ЕТ, на основі ГС, складається з:

- аналізу цілісності сигналів, зокрема аналізу хвильового опору ліній передач, завад шин живлення і перехресних завад, аналізу впливу навантаження лінії передачі, а також визначення раціональної структури багатошарових ГС;

- аналізу часових характеристик, а саме затримки поширення сигналу в лініях передачі, розфазування сигналів і джиттера їх фронтів;

- аналізу ЕМС компонентів друкованого вузла, особливо рівня завадоемісії від друкованого вузла, кондуктивних завад по шинам живлення та сприйнятливості до випромінюваних завад від зовнішніх джерел.

Вибір конструкції ГС є важливим фактором, що визначає механічні та електричні характеристики під час використання пристрою ЕТ у цілому.

Основні вимоги до конструкцій виробів ЕТ різного призначення виявляються у їх здатності протистояти кліматичним і механічним впливам у процесі експлуатації.

Для відповідальних схемотехнічних розробок застосовуються багатошарові друковані плати (БДП). Їх реалізація на основі гнучких матеріалів дозволяє забезпечити значне зниження габаритно-масових показників, а також збільшення щільності друкованого монтажу.

Серед суттєвих особливостей застосування БДП можна виділити наступні:

- сигнальні шари ДП звільняються від шин живлення, що полегшує розведення сигнальних провідників;

- між полігонами землі і живлення з'являється розподілена ємність, яка зменшує високочастотний шум;

- забезпечується краще пригнічення електромагнітних і радіочастотних завад завдяки ефекту відображення;

- зниження загальної вартості при дрібносерійному виробництві. Незважаючи на те, що виготовлення БДП обходиться дорожче, їх можливе випромінювання є меншим, ніж у одно- та двошарових плат. Отже, у деяких випадках застосування лише багатошарових ГС дозволить виконати вимоги по випромінюванню, сформульовані під час розробки та не проводити додаткових випробувань і тестувань. Застосування БДП може знизити рівень випромінюваних завад на 20 дБ у порівнянні із двошаровими платами.

Перераховані конструкторсько-технологічні напрямки в розвитку техніки монтажу багатошарових комутаційних плат пред'являють цілий ряд специфічних вимог до якості матеріалу гнучких основ і до технологічних операцій при виготовленні плат і кабелів і їх складання.

Незважаючи на прийняті у приладобудуванні заходи щодо зниження рівня паразитних зв'язків і наводок до допустимих значень для забезпечення необхідних характеристик радіоелектронного засобу, залишковий їх рівень створює складності під час їх експлуатації.

Рисунок провідників на ГС може бути як джерелом, так і приймачем завад. Якісна розводка провідників зменшує чутливість аналогової схеми до випромінювання джерел.

ГС сприйнятлива до випромінювання, оскільки провідники та виводи компонентів утворюють своєрідні антени. Незважаючи на прийняті в приладобудуванні заходи щодо зниження рівня паразитних зв'язків і наводок до допустимих значень для забезпечення необхідних характеристик виробів ЕТ, залишковий їх рівень створює складності при експлуатації багатьох пристроїв.

Між провідниками гнучкої ДП, які перебувають один від одного на суміжних шарах, виникає ємнісний зв'язок (рис. Е.1).

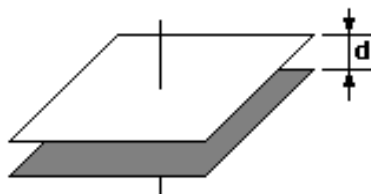


Рисунок Е.1 – Міжшарова ємність

Величина паразитної ємності розраховується за формулою

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (\text{Е.1})$$

де ε – відносна діелектрична проникність;

ε_0 – електрична постійна, яка дорівнює $8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$;

S – площа накладення провідників;

d – товщина ізоляції.

Виходячи із наведеної залежності, одним з варіантів вирішення проблеми паразитних ємностей є зменшення довжини провідників або їх ширини. За рахунок цього можливо знизити значення ємності у десятки разів.

Приклад розташованих на різних шарах провідників, в точці перетину утворюють паразитний зв'язок, представлений на рис. Е.2.



Рисунок Е.2 – Утворення паразитного зв'язку між провідниками

На рис. Е.3 представлено взаємозв'язок між паралельними сигнальними провідниками, між якими утворюється ємнісний зв'язок.

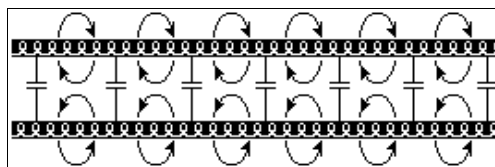


Рисунок Е.3 – Взаємозв'язок між паралельними сигнальними провідниками

Отже, зменшення ємності між сигнальними провідниками досягається за рахунок зменшення ширини провідників. Однак ширина визначається як технологічним процесом виготовлення ДП на гнучкій основі, так і товщиною фольги (за використання фольгованого діелектрика, наприклад, полііміду марки ФДИ-А). Також ширина провідника може обмежуватися вимогами ТЗ для високочастотних схем. Як альтернативне рішення даної проблеми можна запропонувати збільшити кількість шарів ДП (до максимально допустимого) і зменшити площу накладення провідників у різних шарах. При цьому важливо пам'ятати, що збільшення кількості шарів гнучкі ДП під час експлуатації пристрою може знизити її динамічну гнучкість.

Індуктивний зв'язок може виникати між провідниками, розташованими близько один до одного, а також під час створення міжшарового з'єднання у вигляді перехідного отвору (рис. Е.4).

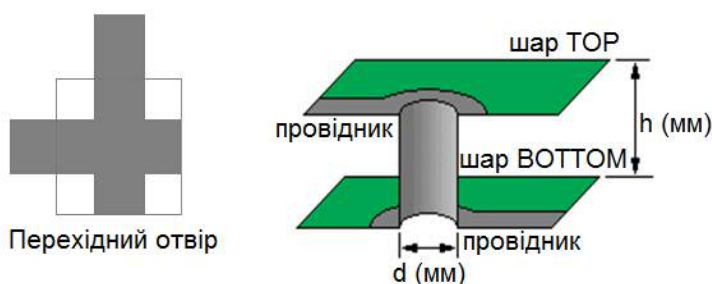


Рисунок Е.4 – Індуктивність перехідного отвору

Слід пам'ятати, що індуктивність отворів разом із ємністю формують резонансний контур, що може позначитися на роботі модуля за високих частот. І хоча власна індуктивність отворів є досить малою, і резонансна

частота контуру знаходиться приблизно у гігагерцовому діапазоні, але якщо сигнал протягом свого шляху змушений проходити через кілька перехідних отворів, то їх індуктивності складаються (послідовне з'єднання), а резонансна частота знижується. Тому слід уникати великої кількості перехідних отворів в гнучких ДП при розведенні відповідальних високочастотних провідників аналогових схем.

У процесі проектування виробів ЕТ необхідно забезпечити необхідні електричні характеристики топології ГС, а також мінімізувати паразитні параметри схеми. Для зниження паразитних параметрів рекомендується розташовувати окремо інформаційні елементи та провідники живлення. Також варто пам'ятати, що чим меншою є кількість вигинів провідників на ГС, тим кращими є частотні характеристики схеми.

У завданні забезпечення ЕМС виробів ЕТ можна виділити кілька підзавдань, таких як мінімізація впливу зовнішніх електромагнітних полів на гнучкі комутаційні структури, затримку та спотворення сигналів у міжз'єднаннях та ін. Серед цих завдань на даний час на перше місце виходить завдання прогнозування електромагнітного випромінювання від міжз'єднань друкованих плат. Застосування спрощених моделей для такого прогнозування на етапі розробки виробів ЕТ вважається досить складним через складну геометрію досліджуваного об'єкта.

Додаток Ж

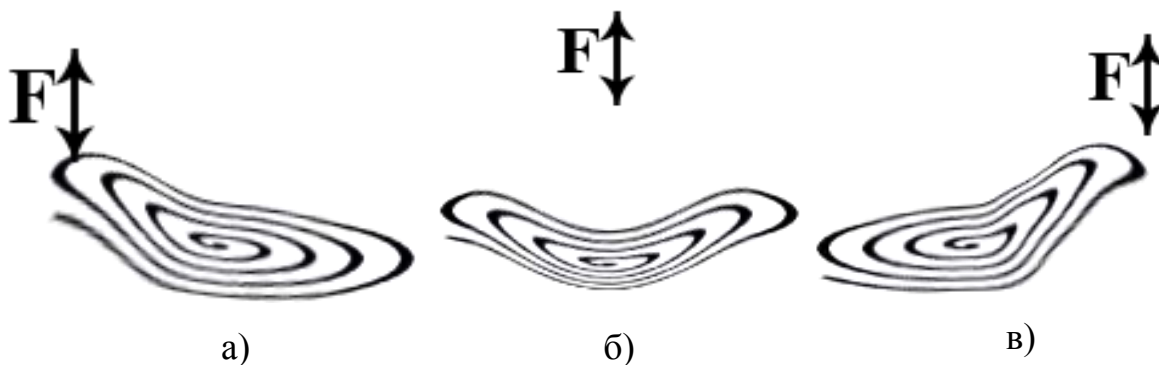
Результати дослідження друкованої котушки індуктивності

Визначення індуктивності виконувалося за допомогою індукціометра, зовнішній вигляд якого показано на рисунку Ж.1.



Рисунок Ж.1 – Зовнішній вигляд індукціометра

Дослідження механічної деформації відбувається шляхом послідовних часткових деформацій кожного з кінців ГС та її центральної частини. Деформування здійснюється на заздалегідь відому величину. На рис. Ж.2 схематично зображено місця докладання механічних зусиль до котушки індуктивності.



Деформація частин котушки: а – лівої; б – центральної; в – правої

Рисунок Ж.2 – Місця прикладення зусиль до котушки індуктивності

Результати вимірювань індуктивності за вказаних впливів занесені до таблиці Ж.1.

Таблиця Ж.1 – Результати вимірювань індуктивності друкованої котушки

Значення деформації h , мм	Індуктивність L , мкГн		
	Деформація центральної частини	Деформація лівої частини	Деформація правої частини
-10	8,05	8,05	8,06
-8	8,05	8,06	8,06
-7	8,07	8,08	8,08
-5	8,08	8,08	8,08
-2	8,08	8,09	8,08
-1	8,10	8,10	8,10
0	8,10	8,10	8,10
1	8,08	8,08	8,07
2	8,08	8,06	8,06
5	8,04	8,06	8,06
7	8,03	8,06	8,06
8	8,00	8,06	8,06
10	7,99	8,04	8,05

На рис. Ж.3 зображена залежність індуктивності котушки від механічної деформації.

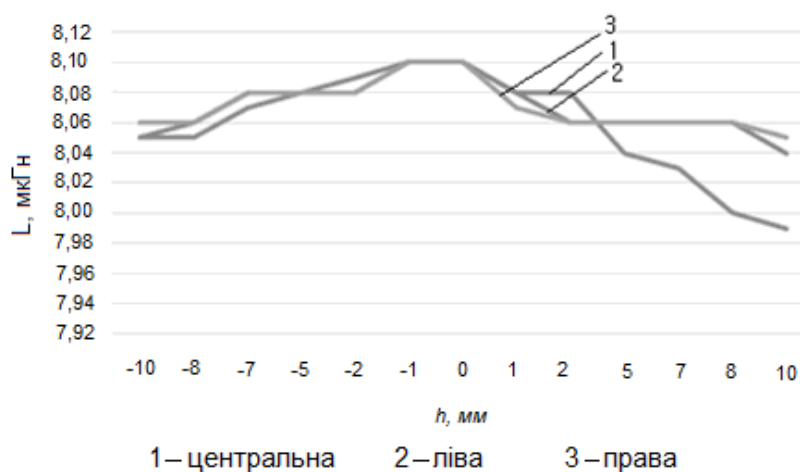


Рисунок Ж.3 – Залежність індуктивності котушки від механічної деформації

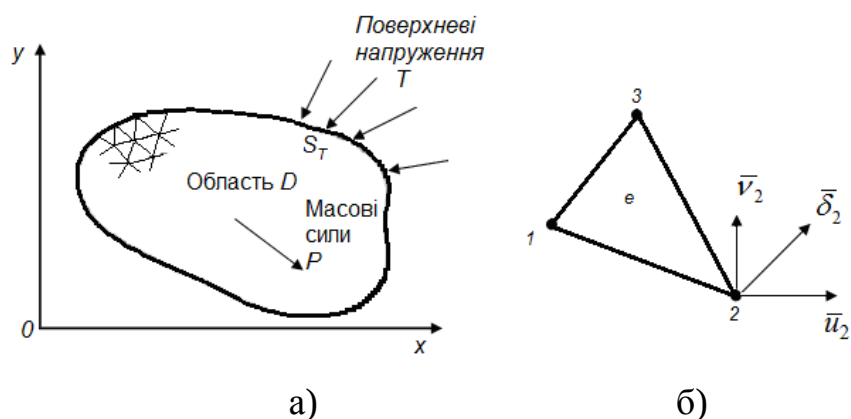
Як видно, найбільші зміни вихідних параметрів спостерігаються за умови впливу сил деформації у центральній частині ГС.

Додаток К

Математичне формулювання задачі моделювання згинальних коливань ГС

К.1 Постановка завдання

Розглянемо двовимірну область D з межами S (рис. К.1, а), що є плоскою проекцією пружного тіла товщини t . На частині A_T зовнішньої граничної поверхні додається розподілене навантаження, яка в будь-якій точці може бути виражена у вигляді сили T , яка додається до одиничної площі. Навантаження рівномірно уздовж товщини t , і частина S_T граничної кривої відповідає частині A_T зовнішньої поверхні.



а – двовимірна область; б – типовий елемент e

Рисунок К.1 – Двовимірне пружне тіло, розбите на кінцеві елементи

Позначаючи через T_x і T_y відповідно x - і y -компоненти матриці T в точці, матрицю поверхневих напружень T в точці можна записати в такий спосіб:

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}. \quad (\text{К.1})$$

Нехай P – масові сили на одиницю об'єму і U – вектор переміщень в точці аналогічно задані через їх x - і y -компоненти відповідно у вигляді:

$$P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}. \quad (\text{K.2})$$

Для двовимірних задач механіки твердого тіла на основі принципу мінімуму потенційної енергії можна отримати наступний функціонал:

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} \varepsilon^T \sigma dV - \int_V U^T P dV - \int_{A_T} U^T T dA_T, \quad (\text{K.3})$$

де вектори деформацій ε і напружень σ визначаються матрицями:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \quad \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}. \quad (\text{K.4})$$

а на об'єм V і зовнішню поверхню A_T діють відповідно сили P і T (рис. К.1).

У виразах (К.4) величини ε_x , ε_y і σ_x , σ_y є нормальні деформації та напруження у напрямках x і y відповідно, γ_{xy} – деформація зсуву, а τ_{xy} – дотичне напруження.

Перший нижній індекс при τ позначає вісь, нормальну до площини дотичних напружень, а другий вказує вісь, паралельну дотичній силі.

На основі принципу мінімуму потенційної енергії можна показати, що поле переміщень, що задовольняє рівнянням рівноваги (і сумісності) для двовимірної задачі пружності, також мінімізує функціонал, заданий рівнянням (К.3).

Для розбиття, показано на рис. К.1, а, вираз (К.3) може бути записано у вигляді:

$$\chi = \sum_{e=1}^l t_e \int_{D_e} \frac{1}{2} \varepsilon^T \sigma dD_e - \sum_{e=1}^l t_e \int_{D_e} U^T P dD_e - \sum_{e=1}^l t_e \int_{S_{T_e}} U^T T dS_{T_e}, \quad (K.5)$$

де D_e – елементна підобласть, t_e – її товщина, а l – загальне число елементів в системі. Останній справа член не дорівнює нулю лише для елементів, розташованих вздовж кордону S_T . Матриці ε , σ , і U для кожного елемента можуть бути виражені через елементний вектор вузлових переміщень δ^e ; як показано нижче, це дозволяє визначити χ у вигляді функції вектора вузлових переміщень системи δ . Крім того, зміщення U всередині елемента виражаються через вузлові зміщення з використанням базисних функцій:

$$U = N^e \delta^e. \quad (K.6)$$

Тут N^e – матриця базисних функцій елемента, а δ^e – вектор вузлових переміщень елемента, який визначається виразом

$$(\delta_1, \delta_2, \delta_3)^T = (\bar{u}_1, \bar{v}_1, \bar{u}_2, \bar{v}_2, \bar{u}_3, \bar{v}_3)^T.$$

З метою спрощення запису в решті цього підрозділу індекс e буде опускатися, якщо контекст виключає можливість непорозумінь.

У разі лінійних трикутних елементів, вибраних для даної задачі, вирази переміщень u і v через базисні функції мають вигляд:

$$u = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_3 \end{bmatrix}, \quad v = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{bmatrix}, \quad (K.7)$$

де $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3$ – x -компоненти, а, $\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3$ – y -компоненти вузлових

переміщень $\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2, \bar{\delta}_3$ відповідно (рис. К.1, б).

Використовуючи (К.2) і (К.7), можна записати вираз (К.5) наступним чином:

$$U = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{v}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{u}_3 \\ \bar{v}_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{К.8})$$

У двовимірному випадку деформації пов'язані з переміщеннями стандартними співвідношеннями:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (\text{К.9})$$

Використовуючи (К.9), матрицю деформацій ε можна записати у вигляді:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} U. \quad (\text{К.10})$$

Підстановка (К.6) у (К.10) дає:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} N\delta = B\delta, \quad (\text{K.11})$$

де матриця B визначена самою рівністю. Можна просто показати, що для розглянутого тривузлового лінійного елемента матриця B має вигляд:

$$B = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} y_2 - y_3 & 0 & y_3 - y_1 & 0 & y_1 - y_2 & 0 \\ 0 & x_3 - x_2 & 0 & x_1 - x_3 & 0 & x_2 - x_1 \\ x_3 - x_2 & y_2 - y_3 & x_1 - x_3 & y_3 - y_1 & x_2 - x_1 & y_1 - y_2 \end{bmatrix}. \quad (\text{K.12})$$

Тепер висловлюючи σ через ε і підставляючи ε з (K.12), можна визначити матрицю напружень σ у термінах δ . Для плоских напружень (напруження σ_z , що дорівнює нулю, нормальне до розглянутого плоского тіла) з теорії пружності відомі співвідношення:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E}, \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}. \end{aligned} \quad (\text{K.13})$$

З використанням (K.13) ε може бути записано як:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}, \quad (\text{K.14})$$

де E – модуль пружності Юнга і ν – коефіцієнт Пуассона.

Вирішуючи (К.14) щодо $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, отримуємо

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \quad (\text{К.15})$$

або, простіше,

$$\sigma = D\varepsilon, \quad (\text{К.16})$$

де D визначається виразом (К.15).

Співвідношення (К.16) також може бути застосовано до задач про плоскі деформації, але в цьому випадку матриця D має вигляд:

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2(1-\nu) \end{bmatrix}. \quad (\text{К.17})$$

Зауважимо, що матриця D у рівняннях (К.15) і (К.17) симетрична. Нарешті, підставляючи (К.6), (К.11) і (К.16) до (К.5), отримуємо такий вираз для функціонала χ :

$$\chi = \sum_{e=1}^l \chi^e = \sum_{e=1}^l t_e \int_{D_e} \frac{1}{2} \delta^T B^T D B \delta dD_e - \sum_{e=1}^l t_e \int_{D_e} \delta^T N^T P dD_e - \sum_{e=1}^l t_e \int_{S_{T_e}} \delta^T N^T T dS_{T_e}, \quad (\text{К.18})$$

де матриця D задана або рівністю (К.15), або рівністю (К.17) в залежності від того, чи розглядається задача про плоскі напруження або про плоскі деформації.

Тепер з рівняння (К.18) отримуємо елементне матричне рівняння диференціюванням елементної ділянки χ^e по δ :

$$\frac{\partial \chi^e}{\partial \delta} = \int_{D_e} t_e B^T DB \delta dD_e - \int_{D_e} t_e N^T P dD_e - \int_{S_{Te}} t_e N^T T dS_e. \quad (\text{К.19})$$

Рівняння (К.19) можна записати в стандартній формі:

$$\frac{\partial \chi^e}{\partial \delta} = k^e \delta - F_P^e - F_T^e, \quad (\text{К.20})$$

де

$$k^e = t_e \int_{D_e} B^T DB dD_e, \quad (\text{К.21, а})$$

$$F_P^e = t_e \int_{D_e} N^T P dD_e, \quad (\text{К.21, б})$$

$$F_T^e = t_e \int_{S_T} N^T T dS_{Te}. \quad (\text{К.21, в})$$

Матриці в виразах (К.21) не залежить від змінних інтегрування і можуть бути винесені за знак інтеграла. Інтеграл, що залишається, дорівнює Δ_e – площі трикутника, так що елементна матриця жорсткості k^e отримує вигляд:

$$k^e = B^T DB \Delta_e t_e. \quad (\text{К.22})$$

Оскільки розмірність матриці δ^e дорівнює 6×1 [см. (К.6) і (К.8)], то матриця k^e має розмірність 6×6 . Рівність (К.22) задає елементи k^e у вигляді функцій від E , ν і вузлових координат елемента. Таким чином, для випадку плоских напружень маємо:

$$k_{11}^e = \frac{t_e}{4\Delta_e} \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} (y_2 - y_3)^2 + \frac{E}{2(1+\nu)} (x_3 - x_2)^2 \right\}. \quad (\text{K.23})$$

Для інших елементів k^e виходять подібні вирази.

Підстановка N^T з (К.8) і P з (К.3) в (К.21, б) дозволяє записати вектор стовпець F_P^e у вигляді:

$$F_P^e = t_e \int_{D_e} \begin{bmatrix} N_1 p_x \\ N_1 p_y \\ N_2 p_x \\ N_2 p_y \\ N_3 p_x \\ N_3 p_y \end{bmatrix} dD_e. \quad (\text{K.24})$$

Якщо p_x і p_y всередині елемента, за припущенням є постійними (наприклад, такими, що дорівнюють їх середнім значенням), то інтегрування в (К.24) виконується легко. Так, для другого елемента F_P^e отримуємо:

$$(F_P^e)_2 = t_e \int_{D_e} N_1 p_y dD_e = p_y^e t_e \int_{D_e} N_1 dD_e = \frac{t_e \Delta_e}{3} p_y^e, \quad (\text{K.25})$$

де p_y^e – постійне або середнє значення p_y для елемента e .

Узагальнюючи, можна показати, що пари елементів в матриці F_P^e , відповідні локальним номерами вузлів $i = 1, 2, 3$, та можуть бути записані у вигляді:

$$(F_P^e)^i = \frac{t_e \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} p_x^e \\ p_y^e \end{bmatrix}. \quad (\text{K.26})$$

Матриця граничних навантажень, що задається рівністю (К.21, в), може бути обчислена в формі, що ідентична (К.26), але з заміною величин p_x , p_y , на, T_x , T_y і з інтегруванням по S_{T_e} замість D_e . З цього співвідношення за умови, що i – граничний вузол, відповідна пара елементів в матриці F_T^e визначається виразом:

$$(F_T^e)^i = \int_{S_{T_e}} N_i \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} dS_{T_e} = \int_0^{L_{ij}^e} N_i \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}^e ds, \quad (\text{К.27})$$

де L_{ij}^e – довжина сторони елемента уздовж S_T . При виведенні (К.27) прикладені навантаження T_x і T_y передбачалися постійними вздовж межі елемента (наприклад, рівними їх середнім значенням).

Так як для цього елемента пробна функція лінійна, то базова функція N_i може бути записана у вигляді лінійного виразу:

$$N_i = \left[1 - \left(\frac{s}{L_{ij}^e} \right) \right] \quad (\text{К.28})$$

щодо s . Після підстановки (К.28) до (К.27) і інтегрування виходить наступний вираз для $(F_T^e)^i$:

$$(F_T^e)^i = \frac{L_{ij}^e}{2} \begin{bmatrix} T_x^e \\ T_y^e \end{bmatrix}. \quad (\text{К.29})$$

Для вузла j елемента, що розглядається, співвідношення $N_j - \frac{s}{L_{ij}}$ замінює (К.28), але легко можна перевірити, що подальше інтегрування дає вираз, ідентичний (К.29). Отже, рівність (К.29) може бути застосовано до будь-якого вузла елемента, який лежить на межі S_T . Для вузла, що не лежить на межі, права частина (К.29), повинна бути замінена нулем. Так, якщо вузли 2, 3 лежать на межі S_T , а вузол 1 – ні, то F_T^e буде мати вигляд:

$$F_T^e = L_{23}^e \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_x^e \\ T_y^e \\ T_x^e \\ T_y^e \end{bmatrix}. \quad (\text{К.30})$$

Отже, у випадках плоских деформацій або плоских напружень вибір тривузлових трикутних елементів з лінійними пробними функціями дозволяє відносно легко визначити елементне матричне рівняння у вигляді (К.30). Потім звичайним чином здійснюються об'єднання цих елементних матричних рівнянь в матричне рівняння системи і облік заданих переміщень. Рішення цього рівняння дає вузлові переміщення, а потім за формулами (К.11) і (К.16) визначаються напруження та деформації.

Для тривузлового трикутного елемента лінійна пробна функція відповідає лінійному розподілу переміщень на елементі. Однак розподіл деформацій є постійним, як це видно з рівняння (К.10). З цієї причини елемент часто називається трикутним з постійною деформацією. Можна, звичайно, використовувати і інші елементи при відповідній модифікації формулювань.

К.2 Основи розрахунку довговічності за багатоциклової втоми

К.2.1 Визначення небезпечної точки

Розглянемо більш детально основні етапи при вирішенні задачі оцінки втомної довговічності.

Процес багатоциклової втоми за визначенням відноситься до процесів руйнування, що не супроводжується розвиненою пластичною деформацією. Як наслідок, даний процес локалізований у межах деякої точки, в якій виникають найбільш сприятливі умови для протікання досліджуваного процесу.

Зазначена точка визначається не тільки видом напруженого стану, а й характеристиками самої конструкції.

К.2.2 Визначення історії навантаження

При визначенні історії навантаження в обраній небезпечній точці виникає ряд проблем, пов'язаних з тим, що в загальному випадку історія навантаження є випадковою функцією, а напружений стан, як правило, є багатовісним. Розглянемо докладніше способи вирішення зазначеного завдання.

Традиційно прийнято розбивати всі типи навантаження на два основних типи: регулярне навантаження і випадкове навантаження. У разі першого типу навантаження, залежність параметра, що характеризує навантаження, від часу являє собою синусоїду або набір синусоїд, що послідовно змінюють одна одну у часі. У разі другого типу навантаження залежність параметра, що характеризує навантаження, від часу є випадковою функцією або випадкову функцією на деякому відрізку, яка періодично повторюється в часі.

Всі методи оцінки втомної довговічності використовують зовнішнє навантаження в тому вигляді, який характерний для опису регулярного

навантаження – цикл навантаження характеризується середнім і амплітудним значеннями.

Тому перед проведенням розрахунку втомної довговічності попередньо проводять схематизацію історії навантаження, зводячи історію випадкового навантаження до блокового регулярного навантажування.

В даний час для вирішення зазначеного завдання застосовуються методи «падаючого дощу» або повних циклів.

При характеристиці історії навантаження в разі багатоциклової втоми прийнято використовувати три основні підходи: зовнішній вплив описується залежністю компонент тензора напружень в небезпечній точці від часу, залежністю непружної деформації в небезпечній точці від часу і залежністю або повної питомої енергії, або якоїсь її частини від часу. В інженерних додатках традиційно для характеристики історії навантаження використовується перший підхід.

В елементах реальних конструкцій в основному виникає багатовісний напружений стан. Велика частина експериментальних даних, на яких базується розрахунок втомної довговічності, отримані в разі одновісного навантаження за симетричного циклу навантаження. Тому при використанні для опису зовнішнього впливу залежності, компонент тензора напружень в небезпечній точці від часу, необхідно вміти переходити від багатовісного напруженого стану до одноосьового і від асиметричного циклу навантаження до симетричного. Для переходу від багатовісного до одноосьового напруженого стану використовуються різні типи еквівалентної по пошкоджуваності одноосного напруження. При переході від асиметричного циклу навантаження до симетричного також використовуються різні типи еквівалентного напруження. Для переходу від реальної історії навантаження до її схематизованого аналогу, який може бути зіставлений з експериментальними даними, застосовуються різні підходи, основна відмінність яких полягає в послідовності виконання наступних операцій: схематизація історії навантаження, перехід від багатовісного до

одноосьового напруженого стану і перехід від асиметричного до симетричного навантажування.

Розглянемо докладніше залежності, що описують перераховані вище операції.

Введемо позначення: $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(t)$ – залежність компонент тензора напружень в небезпечній точки від часу, що характеризує історію навантаження; σ^l – який-небудь параметр напруженого стану після процесу схематизації історії навантаження.

Перелічимо основні залежності, використовувані при переході від багатовісного до одноосьового напруженого стану.

Згідно з результатами експериментальних і теоретичних робіт хід процесу багатоциклової втоми обумовлений накопиченням мікропластичної деформацій в зернах матеріалу конструкцій. Тому для проведення зазначеного вище переходу традиційно використовують гіпотези максимального дотичного напруження (Тріска-Сен-Венана) і питомої енергії формозміни (Губера-Мізеса-Генки), в яких одновісний напружений стан, еквівалентний за пошкодженнями даному багатовісному стану і описується наступними співвідношеннями відповідно

$$\sigma_{eqv} = |\sigma_1 - \sigma_3|, \quad (K.31)$$

$$\sigma_{eqv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (K.32)$$

де σ_{eqv} – еквівалентне напруження;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – перш, друге та третє головні напруження даного напруженого стану.

Для опису переходу від асиметричного до симетричного циклу навантаження використовуються наступні залежності, що зв'язують амплітуду напруження, еквівалентного по пошкоджуваності симетричного

циклу навантаження σ_{aeqv} , з амплітудною і середнім напруженням даного асиметричного циклу навантаженості.

Залежність Серенсена-Кінасошвілі

$$\sigma_{aeqv} = \sigma_a + \Psi_\sigma \cdot \sigma_m, \quad (K.33)$$

де σ_a , σ_m – амплітудна і середнє напруження даного асиметричного циклу навантаження;

Ψ_σ – коефіцієнт обліку асиметрії циклу навантаження, який визначається за формулою

$$\Psi_\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \quad (K.34)$$

тут σ_{-1} – межа втоми при симетричному циклі навантаження ($\sigma_m = 0$);

σ_0 – межа втоми за пульсуючого циклу навантаження ($\sigma_a = \sigma_m$).

Залежність Гудмана

$$\sigma_{aeqv} = \sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \sigma_m, \quad (K.35)$$

де σ_B – межа міцності.

Залежність Герберта

$$\sigma_{aeqv} = \sqrt{(\sigma_a)^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}\right)^2 (\sigma_m)^2}, \quad (K.36)$$

Залежність Зодерберга

$$\sigma_{aeqv} = \sqrt{(\sigma_a)^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T}\right)^2 (\sigma_m)^2}, \quad (K.37)$$

де σ_T – межа плинності.

Окремо від наведених вище залежностей стоїть залежність Сайнса (Sines), яка спочатку розроблялася для випадку опису багатовісного напруженого стану, для можливості отримання амплітуди напруження симетричного циклу навантаженості, який еквівалентний по пошкоджуваності з даним асиметричним циклом навантаженості, в тому випадку якщо головні вісі тензорів напружень амплітудних і середніх значень напруження циклу не збігаються (наприклад, в разі симетричного циклу крутіння при постійному вигині і т. п.).

$$\sigma_{aeqv} = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{aoct} + 3 \cdot \Psi_{\sigma} \cdot \sigma_{m oct}, \quad (K.38)$$

де τ_{aoct} – дотичне октаедричне напруження тензора амплітуд напружень, яке визначається за формулою

$$\tau_{aoct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a1} - \sigma_{a3})^2}, \quad (K.39)$$

тут σ_{a1} , σ_{a2} , σ_{a3} – перше, друге і третє головні напруження тензора амплітуд напружень;

$\sigma_{m oct}$ – октаедрична нормальне напруження тензора середніх напружень циклу, що визначається за формулою

$$\sigma_{m oct} = \frac{\sigma_{m1} + \sigma_{m2} + \sigma_{m3}}{3}, \quad (K.40)$$

де σ_{m1} , σ_{m2} , σ_{m3} – перше, друге і третє головні напруження тензора середніх напружень.

Під час визначення послідовності виконання дій для отримання схематизованої історії навантаження, яка застосовується при оцінці втоми довговічності, виділяють два основних шляхи:

- схематизація історії навантаження – перехід від багатовісного до одноосьового напруженого стану – перехід від асиметричного циклу навантаженості до симетричного;

- схематизація історії навантаження – перехід від асиметричного циклу навантаженості до симетричного – перехід від багатовісного до одноосьового напруженого стану.

Результатом процесу схематизації і зведення до еквівалентних значень історії навантаженості є послідовність значень еквівалентних амплітуд напружень при одноосьовому симетричному циклі навантаження $\sigma_{a\ eqv}^l$, де $l = \overline{1, N_b}$, де N_b – кількість циклів, виділених при схематизації нерегулярної навантаженості.

К.3 Завдання властивостей матеріалу

При описі процесу багатоциклової втоми основною характеристикою матеріалу, що використовується для опису його здатності опору процесу багатоциклової втоми, є крива Велера (крива втоми). Ця крива (рис. К.8) описує залежність максимального значення напруження у циклі від числа циклів до руйнування при даному рівні максимального напруження, яке є постійним у ході усього процесу навантаженості.

Для різних типів матеріалів зазначена крива в області багатоциклової втоми має різний вигляд.

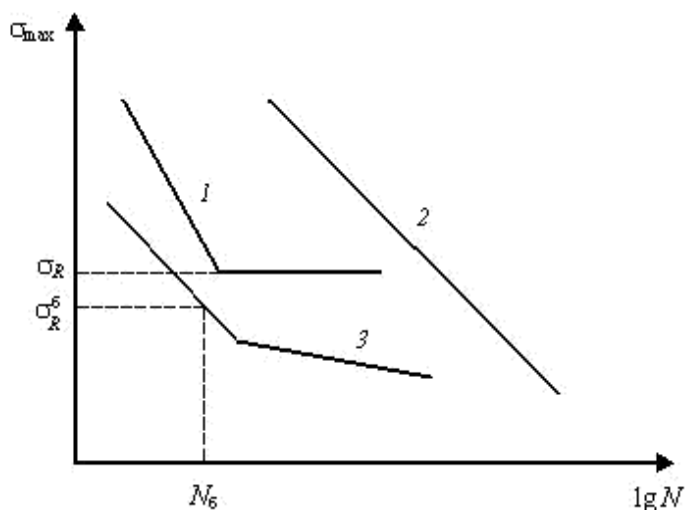


Рисунок К.2 – Криві втоми

Для опису похилої ділянки (ділянок) кривої Велера при багатоцикловій втомі традиційно використовується рівняння Басквіна

$$\sigma_a = CN^m, \quad (\text{К.41})$$

де N – число циклів навантаженості до руйнування за амплітуди напруження, яка дорівнює σ_a ;

m – константа матеріалу;

C – константа матеріалу, яка для матеріалів першого типу має вигляд

$$C = \sigma_{-1} \cdot N_G^{-m}, \quad (\text{К.42})$$

де N_G – абсциса точки перегину на кривій Велера.

Наведені вище криві втоми відповідають поведінці зразків матеріалів. Дані криві є експериментальними залежностями. В даний час при дослідженні ходу процесу багатоциклової втоми застосовуються такі типи експериментів: циклічний вигин (плоский і з обертанням, консольний, триточковий і чотирьох точковий); циклічне розтягнення-стиснення;

циклічне крутіння. Вид одержуваних в ході даних експериментів кривих втоми еквівалентний, а числові значення відрізняються.

Крім зазначених вище співвідношень, від типу проведеного випробування, згідно з експериментальними даними, також залежить коефіцієнт чутливості до асиметрії циклу навантаженості у залежності (К.33). У разі циклічного згину і циклічного розтягнення-стиснення його значення збігаються і можуть бути визначені відповідно до формули (К.34), а в разі циклічного крутіння дані значення відрізняються і визначаються відповідно до залежності

$$\Psi_{\tau} = \frac{2 \cdot \tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0}, \quad (\text{К.43})$$

тут τ_{-1} – межа втоми при симетричному циклічному крученні ($\sigma_m = 0$);

τ_0 – межа втоми за умови пульсуючого циклічного кручення ($\tau_a = \tau_m$).

З урахуванням зазначеного вище, стає очевидною необхідність розгляду виду напруженого стану, до якого тяжіє напружений стан в елементі конструкції, з подальшим вибором відповідної діаграми втоми і відповідного набору констант в співвідношенні (К.33).

Для визначення виду напруженого стану можна використовувати параметр Надаї-Лоде

$$\chi_{\sigma} = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (\text{К.44})$$

Значення даного параметра χ_{σ} належать відріzkу [-1; 1].

Залежно від значення параметра напружений стан відповідає одному з наступних видів:

- $\chi_{\sigma} = -1$ – одноосьове розтягнення;

- $\chi_\sigma = 1$ – одновісне стиснення;
- $\chi_\sigma = 0$ – чистий зсув;
- $(-1 \leq \chi_\sigma < -0,5)$ – розтягнення;
- $(-0,5 \leq \chi_\sigma < 0,5)$ – зсув;
- $(0,5 \leq \chi_\sigma < 1)$ – стиснення.

Часто при вирішенні практичних завдань для матеріалу конструкції, що вивчається, відома тільки одна крива Велера (найбільш поширеними є дані, отримані в умовах циклічного згину), в той час як напружений стан виробу тягнеться до іншого напруженого стану. В цьому випадку, з урахуванням припущення про еквівалентність виду кривих втоми, при різних видах експериментів, шукану криву можна отримати шляхом множення відомих даних на коефіцієнт, узятий з формул (К.43) і (К.44) (паралельний перенос кривої вздовж вісі максимальних напружень (див. рис. К.2)).

К.4 Завдання характеристик конструкції

Згідно з експериментальними даними, на хід процесу багатоциклової втоми, крім історії навантаження і втомних властивостей матеріалу, впливає також розмір конструкції (масштабний ефект), величини градієнтів напружень в межах небезпечної точки (концентрація напружень), наявність і величина залишкових напружень в межах небезпечної точки, якість обробки поверхні в області небезпечної точки, середовище, в якому працює елемент конструкції.

Для обліку зазначених вище факторів при оцінці рівня втомної пошкодженості конструкції вводять коефіцієнти перерахунку межі втоми K_D . У ході дослідження елементів конструкцій замість межі втоми зразка σ_{-1} розглядається межа втоми елемента конструкції σ_{D-1} , що визначається за формулою

$$\sigma_{d-1} = K_d \cdot \sigma_{-1}. \quad (\text{K.45})$$

В інженерній практиці прийнята наступна формула для визначення коефіцієнта K_d із урахуванням зазначених вище факторів

$$K_d = \frac{1}{(K_\sigma / K_d + 1 / K_F - 1) / K_v}, \quad (\text{K.46})$$

де K_d – ефективний коефіцієнт концентрації напружень (відношення границі втоми гладкого зразка до межі втоми зразка з концентратором напружень), визначається за формулою

$$K_\sigma = 1 + (\alpha_\sigma - 1) \cdot q, \quad (\text{K.47})$$

тут α_σ – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, який визначається з номограм;

q – коефіцієнт чутливості матеріалу до концентрації напружень;

K_d – коефіцієнт впливу абсолютних розмірів поперечного перерізу або масштабний фактор (відношення границі втоми зразка заданого діаметра до межі втоми зразку зі стандартним діаметром), визначається на основі номограм;

K_F – коефіцієнт впливу якості обробки поверхні (відношення границі втоми зразку з розглянутою якістю обробки поверхні до межі втоми зразка, на підставі якого була отримана крива Велера), визначається на основі номограм;

K_v – коефіцієнт впливу поверхневого зміцнення (відношення границі втоми зразку з розглянутою обробкою поверхні до межі втоми не зміцненого зразка), визначається на основі номограм.

Чим більше бездефектною є структура матеріалу і чим менше пластичним є даний матеріал, тим він більш чутливий до концентрації

напружень (тим ближче ефективний коефіцієнт концентрації напружень K_σ до теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ).

При проведенні розрахунків у формулах (К.32-К.36), замість амплітуди напружень циклу σ_a підставляється величина

$$\sigma_a^D = \frac{\sigma_a}{K_D}. \quad (\text{К.48})$$

Наприклад, формула (К.40) набуде вигляду

$$\sigma_{a\text{ eqv}} = \frac{\sigma_a}{K_D} + \Psi_\sigma \cdot \sigma_m. \quad (\text{К.49})$$

К.5 Розрахунок втомної довговічності

Після того як отримано схематизований опис процесу навантаження у вигляді набору амплітуд еквівалентних напружень $\sigma_{a\text{ eqv}}^l, l = \overline{1, N_b}$; задано рівняння, що описує криву Велера; враховані особливості елемента конструкції шляхом введення в розгляд межі втоми елемента конструкції σ_{D-1} , можна переходити до оцінки пошкодженості конструкції, накопиченої у ході процесу багатocyклової втоми.

Припустимо, що кожен l -й цикл навантаження у даному процесі руйнування конструкції повторюється k_l раз.

При описі пошкодження, накопиченого в конструкції, найбільш часто використовується правило лінійного підсумовування пошкоджень Пальмгрен-Мінера. Згідно з цим правилом пошкодження, накопичене в небезпечній точці, визначається за формулою

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{N_i}, \quad (\text{К.50})$$

де n – число різних амплітуд напружень в процесі навантаженості;

k_i – число повторень амплітуди $\sigma_{a\,eqv}^i$ в процесі навантаженості;

N_i – число циклів до руйнування за амплітуди напруження $\sigma_{a\,eqv}^i$, яке визначається за допомогою кривої Велера.

З урахуванням співвідношення (К.50), приймаючи припущення про неповторюємість амплітуд напружень в процесі навантаженості, пошкодження, накопичене в небезпечній точці досліджуваної конструкції при заданих умовах навантаження, буде визначатися за формулою

$$\Psi = \sum_{i=1}^{N_b} \Psi_i = \sum_{i=1}^{N_b} \frac{k_i}{N_i}, \quad (\text{К.51})$$

де Ψ_i – пошкодження, що накопичене в результаті дії амплітуди $\sigma_{a\,eqv}^i$ за весь час процесу навантаженості, буде визначатися за формулою

$$\Psi_i = \frac{k_i}{N_i}. \quad (\text{К.52})$$

У разі опису процесу накопичення пошкоджень рівнянням (К.51) умова руйнування записується у вигляді

$$\Psi \geq a_p. \quad (\text{К.53})$$

Традиційно $a_p = 1$. Але в залежності від характеру навантаженості a_p може бути як більше, так і менше одиниці. Разом з тим, при нерегулярному навантаженні з хаотичним порядком зміни пікових значень напружень оцінка $a_p = 1$ є коректною.

Додаток Л

Результати експериментальних досліджень перехідного опору

Результати вимірювання перехідного опору у контактній парі «кулька припою – кінцевий провідник» та статистичної обробки експериментальних даних під час дослідження параметрів запропонованого плаского з'єднувача наведено у табл. Л.1.

Таблиця Л.1 – Результати дослідження з визначення перехідного опору у контактній парі «кулька припою – кінцевий провідник»

Вага прити- скання, г	№	Вимірюване падіння напруги, мВ					Падіння напруги у контактній зоні, мВ					Перехідний опір, мОм					Середнє значення	Дис- персія
		Номер дослідження										min, max						
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
200 (207,08) x4 51,77 x1	1	28,59	28,77	28,7	28,5	28,71	1,52	1,7	1,63	1,43	1,64	5,07	5,67	5,43	4,77	5,47	6,52	3,71
	2	28,68	29,31	28,3	28,23	28,2	1,61	2,24	1,23	1,16	1,13	5,37	7,47	4,10	3,87	3,77		
	3	29,80	30,2	29,94	29,42	29,1	2,73	3,13	2,87	2,35	2,03	9,10	10,43	9,57	7,83	6,77	3,77	
	4	29,21	29,7	29,25	28,81	29,09	2,14	2,63	2,18	1,74	2,02	7,13	8,77	7,27	5,80	6,73	10,43	
150 (157,08) x4 39,27 x1	1	29,89	28,95	28,79	28,69	28,79	2,82	1,88	1,72	1,62	1,72	9,40	6,27	5,73	5,40	5,73	7,16	4,42
	2	29,08	29,28	28,33	28,31	28,17	2,01	2,21	1,26	1,24	1,1	6,70	7,37	4,20	4,13	3,67		
	3	30,15	30,11	30,05	29,21	29,12	3,08	3,04	2,98	2,14	2,05	10,27	10,13	9,93	7,13	6,83	3,67	
	4	30,17	29,77	29,3	28,94	29,27	3,1	2,7	2,23	1,87	2,2	10,33	9,00	7,43	6,23	7,33	10,33	
100 (107,08) x4 26,77 x1	1	30,3	29,02	28,98	28,72	29,02	3,23	1,95	1,91	1,65	1,95	10,77	6,50	6,37	5,50	6,50	7,75	6,16
	2	28,93	29,32	28,54	28,42	28,21	1,86	2,25	1,47	1,35	1,14	6,20	7,50	4,90	4,50	3,80		
	3	31,00	30,5	30,19	29,41	29,2	3,93	3,43	3,12	2,34	2,13	13,10	11,43	10,40	7,80	7,10	3,80	
	4	30,06	30,09	29,56	29,14	29,29	2,99	3,02	2,49	2,07	2,22	9,97	10,07	8,30	6,90	7,40	13,10	

Продовження таблиці Л.1

Вага прити- скання, г	№	Вимірюване падіння напруги, мВ					Падіння напруги у контактній зоні, мВ					Перехідний опір, мОм					Середнє значення	Дис- персія
		Номер дослідження															min, max	
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
50 (57,08) x4 14,27 x1	1	30,8	29,53	29,27	29,21	29,39	3,73	2,46	2,2	2,14	2,32	12,43	8,20	7,33	7,13	7,73	9,08	7,28
	2	29,06	29,4	29,31	28,79	28,42	1,99	2,33	2,24	1,72	1,35	6,63	7,77	7,47	5,73	4,50		
	3	31,5	30,64	30,38	30,72	29,21	4,43	3,57	3,31	3,65	2,14	14,77	11,90	11,03	12,17	7,13	4,50	
	4	30,64	30,68	29,62	29,76	29,53	3,57	3,61	2,55	2,69	2,46	11,90	12,03	8,50	8,97	8,20	14,77	
40 (47,08) x4 11,77 x1	1	29,7	29,72	29,34	29,52	29,5	2,63	2,65	2,27	2,45	2,43	8,77	8,83	7,57	8,17	8,10	10,32	5,21
	2	30,96	30,85	29,62	30,02	29,72	3,89	3,78	2,55	2,95	2,65	12,97	12,60	8,50	9,83	8,83		
	3	31,7	30,82	30,55	30,08	29,42	4,63	3,75	3,48	3,01	2,35	15,43	12,50	11,60	10,03	7,83	7,57	
	4	31,01	31,05	29,8	30,21	29,71	3,94	3,98	2,73	3,14	2,64	13,13	13,27	9,10	10,47	8,80	15,43	
20 (27,08) x4 6,77 x1	1	30,00	30,05	29,5	29,71	29,62	2,93	2,98	2,43	2,64	2,55	9,77	9,93	8,10	8,80	8,50	10,30	7,88
	2	30,23	30	28,74	29,31	28,91	3,16	2,93	1,67	2,24	1,84	10,53	9,77	5,57	7,47	6,13		
	3	32,20	31,04	30,84	30,38	29,51	5,13	3,97	3,77	3,31	2,44	17,10	13,23	12,57	11,03	8,13	5,57	
	4	31,1	31,2	30,2	30,7	29,94	4,03	4,13	3,13	3,63	2,87	13,43	13,77	10,43	12,10	9,57	17,10	
15 (22,08) x4 5,52 x1	1	30,71	30,31	29,7	29,79	29,77	3,64	3,24	2,63	2,72	2,7	12,13	10,80	8,77	9,07	9,00	11,05	8,09
	2	30,61	30,02	29,02	29,52	29,21	3,54	2,95	1,95	2,45	2,14	11,80	9,83	6,50	8,17	7,13		
	3	32,57	31,24	30,87	30,52	29,82	5,5	4,17	3,8	3,45	2,75	18,33	13,90	12,67	11,50	9,17	6,50	
	4	31,20	31,5	30,54	30,81	29,99	4,13	4,43	3,47	3,74	2,92	13,77	14,77	11,57	12,47	9,73	18,33	
10 (17,08) x4 4,27 x1	1	30,90	30,68	29,85	29,88	29,84	3,83	3,61	2,78	2,81	2,77	12,77	12,03	9,27	9,37	9,23	11,64	8,61
	2	30,75	29,4	29,3	29,78	29,76	3,68	2,33	2,23	2,71	2,69	12,27	7,77	7,43	9,03	8,97		
	3	32,74	31,63	31,02	30,78	29,91	5,67	4,56	3,95	3,71	2,84	18,90	15,20	13,17	12,37	9,47	7,43	
	4	31,32	31,7	30,92	30,92	30,14	4,25	4,63	3,85	3,85	3,07	14,17	15,43	12,83	12,83	10,23	18,90	
7 (14,08) x4 3,52 x1	1	31,00	30,71	30,37	30,01	30,1	3,93	3,64	3,3	2,94	3,03	13,10	12,13	11,00	9,80	10,10	12,10	7,87
	2	30,87	29,71	29,37	29,82	29,92	3,8	2,64	2,3	2,75	2,85	12,67	8,80	7,67	9,17	9,50		
	3	32,70	31,68	31,17	30,93	29,94	5,63	4,61	4,1	3,86	2,87	18,77	15,37	13,67	12,87	9,57	7,67	
	4	31,5	31,9	31,01	31,02	30,28	4,43	4,83	3,94	3,95	3,21	14,77	16,10	13,13	13,17	10,70	18,77	

Продовження таблиці Л.1

Вага прити- скання, г	№	Вимірюване падіння напруги, мВ					Падіння напруги у контактній зоні, мВ					Перехідний опір, мОм					Середнє значення	Дис- персія
		Номер дослідження															min, max	
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
5 (12,08) x4 3,02 x1	1	31,1	30,96	30,54	30,38	30,3	4,03	3,89	3,47	3,31	3,23	13,43	12,97	11,57	11,03	10,77	12,28	10,06
	2	29,02	29,8	29,44	29,71	29,97	1,95	2,73	2,37	2,64	2,9	6,50	9,10	7,90	8,80	9,67		
	3	32,8	31,72	31,4	31,09	30,01	5,73	4,65	4,33	4,02	2,94	19,10	15,50	14,43	13,40	9,80	6,50	
	4	31,74	31,96	31,46	31,11	30,55	4,67	4,89	4,39	4,04	3,48	15,57	16,30	14,63	13,47	11,60	19,10	
4 (11,08) x4 2,77 x1	1	31,24	30,8	30,6	30,49	30,4	4,17	3,73	3,53	3,42	3,33	13,90	12,43	11,77	11,40	11,10	12,91	8,06
	2	30,2	30,31	29,67	29,93	29,94	3,13	3,24	2,6	2,86	2,87	10,43	10,80	8,67	9,53	9,57		
	3	32,86	32,02	31,7	31,01	30,23	5,79	4,95	4,63	3,94	3,16	19,30	16,50	15,43	13,13	10,53	8,67	
	4	31,9	32,04	31,52	31,2	30,81	4,83	4,97	4,45	4,13	3,74	16,10	16,57	14,83	13,77	12,47	19,30	
3 (10,08) x4 2,52 x1	1	31,26	31	30,67	30,5	30,48	4,19	3,93	3,6	3,43	3,41	13,97	13,10	12,00	11,43	11,37	14,16	8,74
	2	31,25	30,35	30,99	30,01	30,02	4,18	3,28	3,92	2,94	2,95	13,93	10,93	13,07	9,80	9,83		
	3	32,81	32,21	32,01	31,1	30,51	5,74	5,14	4,94	4,03	3,44	19,13	17,13	16,47	13,43	11,47	9,80	
	4	32,2	32,2	32,57	32,21	32,02	5,13	5,13	5,5	5,14	4,95	17,10	17,10	18,33	17,13	16,50	19,13	
2 (9,08) x4 2,27 x1	1	31,4	30,8	30,72	30,79	30,61	4,33	3,73	3,65	3,72	3,54	14,43	12,43	12,17	12,40	11,80	14,41	9,79
	2	31,31	30,5	30,11	30,12	30,14	4,24	3,43	3,04	3,05	3,07	14,13	11,43	10,13	10,17	10,23		
	3	32,91	32,34	32,05	31,19	30,8	5,84	5,27	4,98	4,12	3,73	19,47	17,57	16,60	13,73	12,43	10,13	
	4	32,47	32,4	32,6	32,32	32,29	5,4	5,33	5,53	5,25	5,22	18,00	17,77	18,43	17,50	17,40	19,47	
1 (8,08) x4 2,02 x1	1	31,42	30,92	31,04	30,72	30,72	4,35	3,85	3,97	3,65	3,65	14,50	12,83	13,23	12,17	12,17	14,89	9,94
	2	31,5	30,4	30,51	30,48	30,28	4,43	3,33	3,44	3,41	3,21	14,77	11,10	11,47	11,37	10,70		
	3	32,81	32,4	32,31	31,2	30,85	5,74	5,33	5,24	4,13	3,78	19,13	17,77	17,47	13,77	12,60	10,70	
	4	33,2	32,42	32,62	32,51	32,41	6,13	5,35	5,55	5,44	5,34	20,43	17,83	18,50	18,13	17,80	20,43	
0,1 (7,18) x4 1,795 x1	1	32,04	31,2	31,3	30,92	30,88	4,97	4,13	4,23	3,85	3,81	16,57	13,77	14,10	12,83	12,70	15,85	10,34
	2	31,72	30,89	30,8	31,2	30,49	4,65	3,82	3,73	4,13	3,42	15,50	12,73	12,43	13,77	11,40		
	3	32,92	33,02	32,4	31,29	30,93	5,85	5,95	5,33	4,22	3,86	19,50	19,83	17,77	14,07	12,87	11,40	
	4	33,9	32,51	32,7	32,6	32,81	6,83	5,44	5,63	5,53	5,74	22,77	18,13	18,77	18,43	19,13	22,77	

Продовження таблиці Л.1

Вага прити- скання, г	№	Вимірюване падіння напруги, мВ					Падіння напруги у контактній зоні, мВ					Перехідний опір, мОм					Середнє значен- ня	Дис- пер- сія
		Номер дослідження															min, max	
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
5 (5) x4 1,25 x1	1	32,19	30,9	31,4	30,9	30,98	5,12	3,83	4,33	3,83	3,91	17,07	12,77	14,43	12,77	13,03	16,52 12,10 23,80	11,91
	2	32,02	30,91	31,4	31,25	30,7	4,95	3,84	4,33	4,18	3,63	16,50	12,80	14,43	13,93	12,10		
	3	33,4	33,5	32,7	31,5	31,41	6,33	6,43	5,63	4,43	4,34	21,10	21,43	18,77	14,77	14,47		
	4	34,21	32,6	32,92	32,69	32,93	7,14	5,53	5,85	5,62	5,86	23,80	18,43	19,50	18,73	19,53		
2,5 (2,5) x4 0,625 x1	1	32,24	30,92	31,5	30,99	31,21	5,17	3,85	4,43	3,92	4,14	17,23	12,83	14,77	13,07	13,80	17,09 12,10 24,43	12,08
	2	32,12	30,7	31,91	31,51	30,93	5,05	3,63	4,84	4,44	3,86	16,83	12,10	16,13	14,80	12,87		
	3	33,6	33,8	32,72	32,2	31,77	6,53	6,73	5,65	5,13	4,7	21,77	22,43	18,83	17,10	15,67		
	4	34,4	32,62	32,99	32,82	33,01	7,33	5,55	5,92	5,75	5,94	24,43	18,50	19,73	19,17	19,80		
1 (1) x4 0,25 x1	1	32,4	30,91	31,56	31,02	31,3	5,33	3,84	4,49	3,95	4,23	17,77	12,80	14,97	13,17	14,10	17,48 11,10 24,80	13,38
	2	32,2	30,4	32,2	31,72	30,97	5,13	3,33	5,13	4,65	3,9	17,10	11,10	17,10	15,50	13,00		
	3	33,5	34,1	32,9	32,8	32,02	6,43	7,03	5,83	5,73	4,95	21,43	23,43	19,43	19,10	16,50		
	4	34,51	32,69	33,01	32,97	33,11	7,44	5,62	5,94	5,9	6,04	24,80	18,73	19,80	19,67	20,13		
0,5 (0,5) x4 0,125 x1	1	32,51	31,2	32,23	31,59	31,48	5,44	4,13	5,16	4,52	4,41	18,13	13,77	17,20	15,07	14,70	18,65 13,13 26,10	13,05
	2	32,2	31,2	32,9	31,92	31,01	5,13	4,13	5,83	4,85	3,94	17,10	13,77	19,43	16,17	13,13		
	3	33,62	34,9	33,01	32,93	32,9	6,55	7,83	5,94	5,86	5,83	21,83	26,10	19,80	19,53	19,43		
	4	34,5	32,8	33,5	33,09	33,79	7,43	5,73	6,43	6,02	6,72	24,77	19,10	21,43	20,07	22,40		
0,2 (0,2) x4 0,05 x1	1	33,55	31,6	32,72	31,19	31,72	6,48	4,53	5,65	4,12	4,65	21,60	15,10	18,83	13,73	15,50	20,10 13,73 27,77	13,45
	2	32,4	31,5	33,4	32,92	32,2	5,33	4,43	6,33	5,85	5,13	17,77	14,77	21,10	19,50	17,10		
	3	33,81	35,4	33,2	34,01	33,04	6,74	8,33	6,13	6,94	5,97	22,47	27,77	20,43	23,13	19,90		
	4	34,59	33,02	33,92	33,71	34,08	7,52	5,95	6,85	6,64	7,01	25,07	19,83	22,83	22,13	23,37		