

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ДЕМСЬКА НАТАЛІЯ ПАВЛІВНА

УДК. 621.3.066.6

ДИСЕРТАЦІЯ

**ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МІЖЗ'ЄДНАНЬ
МОДУЛІВ 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. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Н. П. Демська

Науковий керівник: Невлюдов Ігор Шакирович, доктор технічних наук,
професор

Цей примірник дисертаційної роботи
ідентичний за змістом з іншими,
поданими до спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04

Вчений секретар спецради Д 64.052.04

Одаренко Є. М.

Харків 2020

АНОТАЦІЯ

Демська Н. П. Технологія електричних міжз'єднань модулів електронної техніки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2020.

У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання забезпечення якості високощільних рознімних і нерознімних електричних міжз'єднань у багатошарових гнучких комутаційних структур для модулів електронної техніки шляхом розробки технології формування цих з'єднань на основі досліджень фізико-технологічних параметрів гнучких комутаційних структур.

Отримав подальший розвиток метод розрахунку матриці жорсткості скінчених елементів при відомому векторі зовнішніх сил, який дозволяє забезпечити розрахунок деформацій пружних елементів міжз'єднань, з метою забезпечення механічної міцності міжз'єднань та надтонких електронних компонентів.

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

Вперше за допомогою багатofакторного експерименту отримано модель впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача з нульовою силою вставки на перехідний опір, який виникає між з'єднувачем і шлейфом, що дозволило оптимізувати конструкцію з'єднувача за критерієм мінімізації перехідного опору.

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

Розроблено технологію складання поліімідних гнучких комутаційних структур, що забезпечує формування високощільних нерознімних електричних між'єднань за допомогою ультразвукове зварювання та рознімних між'єднань на основі запропонованого з'єднувача з нульовою силою вставки.

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

ABSTRACT

Demka N. P. Technology of electrical interconnections of electronic equipment modules. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

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

The paper solved topical scientific and practical task of ensuring quality of high-density detachable and non-detachable electrical interconnections in multilayer flexible commutative structures for electronic equipment modules by developing the technology of forming these connections based on studies of physical and technological parameters of flexible commutative structures.

The method of calculating the stiffness matrix of finite elements with a known vector of external forces has been further developed, which allows to calculate the deformations of elastic elements of interconnections, in order to ensure the mechanical strength of interconnections and ultrathin electronic components.

The technology of electrical switching elements was further developed, which allowed to develop the design of a flat connector for electronic devices with zero insertion force with pneumatic pressing of contact elements, which differs from analogues: less likely to cause defects, increased contact density and number of pins.

For the first time, a multifactor experiment was used to get the influence model of the design parameters of a flat connector on the transient resistance that occurs between the connector and the loop, which allowed to optimize the design of the connector by minimizing the transient resistance.

The mathematical model of the technological process of assembling electronic equipment modules has been improved based on aluminum-polyimide flexible commutative structures was proposed, which allows to evaluate the reliability and stability of the technological process, determine the percentage of suitable products, average manufacturing time of one product, average number of assembled products.

The technology of assembly of polyimide flexible switching structures has been improved, which provides the formation of high-density fixed electrical interconnections by means of ultrasonic welding and detachable interconnections based on the proposed connector with zero insertion force.

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

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації
(Publications with the main scientific results of the thesis):*

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

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

3. Палагин В. А., Разумов-Фризиук Е. А., Невлюдова В. В., Демская Н. П. Анализ и разработка конструкций разъемов для FFC или FPC шлейфов. *Технология приборостроения*. 2016. № 1. С. 50-53.
4. Притчин С. Е., Гуріна Д. В., Демська Н. П. Методи контролю якості гнучких структур. *Radioelectronics & Informatics journal*. 2016. №3. С. 3-6.
5. Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризиук Є. А., Демська Н. П., Невлюдова В. В. Оцінка впливу механічних дій на гнучкі друковані плати. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. № 1 (70). С. 143-149.
6. Боцман І. В., Новоселов С. П., Демська Н. П., Невлюдова В. В. Прогнозування параметрів гнучких структур у рамках вирішення завдання забезпечення їх якості. *Технология приборостроения*. 2017, № 1. С. 42-48.
7. Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризиук Є. А., Демська Н. П., Гуріна Д. В. Аналіз впливу механічних напружень на можливість мініатюризації гнучких структур електронної техніки на прикладі ZIF з'єднувача. *Проблеми тертя та зношування*. 2017, № 3 (76). С. 74-80.
8. Стародубцев Н. Г., Демская Н. П. та ін. Математическое моделирование выбора информативных признаков для анализа состояния процессов жизненного цикла радиоэлектронных средств. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2017. No. 1 (1). С. 82-89.
9. Невлюдов І. Ш., Борщов В. М., Демська Н. П. та ін. Новітні конструктивно-технологічні рішення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2018. № 5 (3). С. 67-78.
10. Демська Н. П. Гнучкі комутаційні структури: аналіз технологій та галузі застосування. *Технология приборостроения*. 2019. №1. С. 38-42.
11. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Демська Н. П. та ін. Дослідження напружено-деформованого стану поліімідних комунікаційних структур на прикладі гнучкого шлейфу. *Проблеми тертя та зношування*. 2019. № 2 (83). С. 54-64.
12. Nevliudov I., Omarov M., Botsman I., Demska N., Nevliudova V.,

Starodubcev M. Research of factors influencing the process of formation of welded microconnections in electronic modules. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering, 20 (2019), pp. 181-187. DOI: 10.18038/estubtda.651032.

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

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

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (List of publications in support of the thesis results approbation):

16. Невлюдова В.В., Демская Н.П., Бондаренко Ю.В. Основные причины отказов гибких коммутационных плат // *Фізичні процеси та поля технічних та біологічних об'єктів: матеріали XVI-міжнар. наук.-техніч. конф., 3-5 листопада 2017 р. Кременчук: КРНУ, 2017. С. 33-34.*

17. Разумов-Фризюк Є.А., Невлюдова В.В., Демська Н.П. Плоский роз'єм для електронних пристроїв з нульовою силою вставки // *Новые технологии в машиностроении: материалы 27-международ. научн.-технич. конф., 3-8 сентября 2017 г. Коблево-Харьков : ХАИ. С. 77-78.*

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

19. Невлюдов І.Ш., Новоселов С.П., Боцман І.В., Демська Н.П. Розробка параметричної моделі гнучких комутаційних структур для дослідження механічних впливів на них // Фізичні процеси та поля технічних та біологічних об'єктів: матеріали XVII-міжнар. наук.-техніч. конф., 2-4 листопада 2018 р. Кременчук: КРНУ, 2018. С. 141-143.

20. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Демська Н.П., Разумов-Фризюк Є. А. Моделювання вигину двошарової структури при термовпливах // Математичне моделювання процесів в економіці та управлінні проектами і програмами (ММП-2019): матеріали міжнар. наук.-техніч. конф., 09-13 вересня 2019 р. Харків-Коблево: ХНУРЕ, 2019. С. 55-58.

21. Демська Н. П., Палагін В. А., Омаров Ш. А. Математичні моделі мікроелектромеханічних міжз'єднань // Виробництво & Мехатронні Системи (M&MS-2019): матеріали III міжнар. наук.-техніч. конф., 24-25 жовтня 2019 р. Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 119-122.

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

23. Демская Н. П., Невлюдов И. Ш., Боцман И. В., Старобудцев Н. Г. Эксплуатационные характеристики гибких печатных структур МЭМС-устройств // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка: матеріали XVII-міжнар. наук.-техніч. конф., 14-16 травня 2020 р. Кременчук: КРНУ, 2020 р. С. 62.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації (List of publications with supplementary results of the thesis):

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

радіоелектроніки. опубл. 10.12.2015, бюл. № 23.

25. Nevliudov I., Demska N., Starodubcev N., Nevliudova V. Modeling of destruction processes of the installation connection of electronic equipment // Information systems and innovative technologies in project and program management [Text] : Collective monograph edited by I. Linde, I. Chumachenko, V. Timofeyev – Riga: ISMA, 2019. pp. 248-257.

26. Nevliudov I., Starodubcev N., Demska N., Omarov Sh. Visual monitoring of the break surface of the installation connection of electronic equipment // Information systems and innovative technologies in project and program management [Text] : Collective monograph edited by I. Linde, I. Chumachenko, V. Timofeyev. - Riga: ISMA, 2019. pp. 258-270.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	12
Вступ.....	13
Розділ 1 Аналіз стану проблеми створення та використання електричних між'єднань модулів ЕТ	22
1.1 Класифікація електричних між'єднань модулів ЕТ	22
1.1.1 Основні види контактних з'єднань.....	24
1.1.2 Вимоги до контактних з'єднань.....	28
1.2 Аналіз технологій і галузей застосування гнучких комутаційних структур у модулях ЕТ	29
1.3 Технології електричних між'єднань модулів ЕТ	34
1.4 Плаский з'єднувач для електронних пристроїв з нульовою силою вставки на основі ГС	38
1.5 Висновки до розділу	42
Розділ 2 Модель напружено-деформованого стану скінченних елементів рознімних електричних між'єднань модулів електронної техніки	44
2.1 Постановка задачі та мета досліджень.....	46
2.2 Розрахунок елементів матриці жорсткості елемента структури за методом скінченних елементів.....	49
2.3 Розрахунок компонентів матриці жорсткості	60
2.4 Висновки до розділу 2	67
Розділ 3 Модель впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача з нульовою силою вставки для модулів ЕТ на перехідний опір у зоні контактування.....	68
3.1 Аналіз конструктивних параметрів плаского з'єднувача з нульовою силою вставки на основі ГС для модулів ЕТ	68
3.2 Планування експерименту для побудови моделі впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача на перехідний опір у	

	10
зоні контактування	72
3.3 Отримання моделі системи впливу конструкційних параметрів з'єднувача на перехідний опір і перевірка її адекватності	76
3.4 Висновки до розділу 3	84
Розділ 4 Експериментальні дослідження експлуатаційних характеристик з'єднувача гнучких шлейфів для міжмодульних електричних з'єднань	85
4.1 Планування експерименту	85
4.2 Опис експериментального стенда	88
4.3 Аналіз отриманих результатів	100
4.4 Висновки до розділу 4	105
Розділ 5 Дослідження процесів формування та руйнування зварних мікроз'єднань модулів ЕТ	107
5.1 Дослідження особливостей технології формування монтажних з'єднань у модулях ЕТ.....	107
5.2 Дослідження фізико-хімічних процесів під час формування та руйнування зварних мікроз'єднань.....	109
5.3 Дослідження впливу конструктивно-технологічних факторів на кінетику формування зварних міжз'єднань	113
5.4 Моделювання напружено-деформованого стану отриманих зварних міжз'єднань.....	121
5.5 Висновки до розділу 5	132
Розділ 6 Створення імітаційної моделі технологічного процесу складання модуля ЕТ із поліімідними ГКС у їх складі зі зварними міжз'єднаннями	134
6.1 Дослідження технологічних характеристик зварних мікроз'єднань	134
6.2 Побудова імітаційної моделі ТП складання модулів ЕТ на основі поліімідних гнучких структур	137
6.3 Побудова моделі прямої задачі.....	141
6.4 Побудова моделі зворотної задачі.....	146
6.5 Аналіз результатів моделювання ТП складання модулів ЕТ	151
6.6 Висновки до розділу 6	159

	11
Висновки	160
Перелік джерел посилання	163
Додаток А Патент.....	178
Додаток Б Комплект документів на типовий технологічний процес виготовлення алюміній-поліімідних ГКС	179
Додаток В Акти впровадження.....	192
Додаток Г Список опублікованих праць за темою дисертації	198

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- FFC – Flat Flexible Cable;
- FPC – Flat Printed Circuit;
- LIF – Light Insertion Force;
- ZIF – Zero Insertion Force;
- БКП – багатошарові комутаційні плати;
- ГДП – гнучкі друковані плати;
- ГКП – гнучкі комутаційні плати;
- ГКС – гнучкі комутаційні структури;
- ЕЗ – електричні з'єднання;
- ЕМЗ – електричні міжз'єднання;
- ЕТ – електронна техніка;
- ЗЗ – зварне з'єднання;
- ІС – інтегральні схеми;
- КЕ – конструктивний елемент;
- КП – комутаційні плати;
- КТЛР – коефіцієнт температурного лінійного розширення;
- ЛЗ – лінії зв'язку;
- ММ – математична модель;
- МЕМС – мікроелектромеханічні системи;
- МСЕ – метод скінчених елементів;
- МСТ – мікросистемна техніка;
- НДС – напружено-деформований стан;
- ОКП – одноканальні пристрої;
- ПФЕ – повний факторний експеримент;
- ТП – технологічний процес;
- УЗ – ультразвукове зварювання;
- УЗК – ультразвукові коливання.

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних умовах речі дуже швидко змінюються і збільшуються аж до медіа-інтерфейсів, при цьому розмір та форма самого об'єкту зменшується [1]. Із зростанням впливу цих об'єктів на всі сфери життя сучасного суспільства неминучим стає впровадження новітніх технологій [2]. І такою технологією, що швидко розвивається як сфера досліджень, розробок, експериментального виробництва [3] та випробувань [4-5] визнано гнучку електроніку. Її розвиток пропонує нові функціональні можливості, які раніше не були можливі, за допомогою гнучкої конструкції, особливо в галузях, таких як медицина, одяг та IoT, сенсори та смарт-текстиль [6].

Однак, основною проблемою її впровадження, в тому числі й технології Industry 4.0, залишається те, що нині готові деталі базуються на традиційних електронних компонентах жорстких друкованих платах, у зв'язку з чим сенсори мають значну товщину і обмежені в гнучкості, а також не можуть мати повністю адаптоване апаратне рішення для кожного конкретного розміру та форми об'єкту автоматизації [1]. Тому останнім часом технологія виходить з традиційного дизайну жорсткої електроніки в майбутнє гнучких форм-факторів.

На даний час цим вимогам найбільше відповідають гнучкі комутаційні структури (ГКС), до яких належать з'єднувачі, які мають забезпечити: малі габаритно-масові характеристики пристрою; можливість високої щільності розташування електричних контактів; простоту монтажу; низьку собівартість; використання групових методів виготовлення; велику кількість контактних елементів; можливість великої протяжності контактів; можливість об'єднання в одному міжз'єднанні інформаційних каналів і каналів живлення [7-8]. Їх широке застосування 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; чітка організація несучих провідників, що виключає заплутування; з'єднання модулів і виконавчих пристроїв, віддалених один від одного, у рамках одного блоку або виробу; «рухливість» з'єднання.

Але надійність таких з'єднувачів залежить від їх мініатюризації і зменшується із збільшенням ступеню мініатюризації [9] і тому конструкційна гнучкість є з одного боку перевагою ГКС [10], але з іншого боку призводить до появи проблем, викликаних необхідністю забезпечення стабільності матеріалів і конструкцій ГКС в часі під впливом деформацій різного виду [11], адже конструкції сучасної електронної техніки (ЕТ) є складними механічними системами з безліччю жорстких зв'язків, а їх мікромініатюризація у багатьох випадках дійшла до фізичної межі розмірного, зарядового та енергетичного квантування компонентів.

При численних перевагах в існуючих електричних міжз'єднаннях, що відзначається науковцями та розробниками (Г. А. Блінов [25, 115], В. Т. Балабанов [106], А. А. Єфименко [11, 44], Peter Macleod [81], В. М. Борщов [101, 102, 104, 130]), існують серйозні проблеми забезпечення якісних показників модулів на їх основі, враховуючи що кожен модуль міжз'єднання часто являє собою складний автономний пристрій із великою кількістю каналів інформації та живлення.

Також до чинників появи великої кількості дестабілізуючих факторів можна віднести зростання ступеня мініатюризації компонентів, що з одного боку призводить до зменшення розмірів і ваги як окремих електричних контактів, так і всього пристрою в цілому, але з іншого призводить до зменшення жорсткості, як окремих елементів, так і всієї конструкції міжз'єднання в цілому.

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

Все це свідчить про те, що технологічне забезпечення якості електричних між'єднань модулів електронної техніки, а також удосконалення методів оцінки та прогнозування їх якісних характеристик на етапах проектування, виробництва і експлуатації обумовлює актуальність сформульованої теми дисертаційної роботи та проведених у роботі досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, проводилися відповідно до держбюджетних тем НДР, виконаних у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ): у рамках ініціативної науково-дослідної роботи «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями та їх впровадження» (ДР № 0113U000358); «Створення мікромініатюрних компонентів електромеханічних інтелектуальних технологічних засобів промислового обладнання та робототехніки» (ДР № 0115U002433); «Безскладальні гнучко-жорсткі конструкції зі змінною конфігурацією для мікросистемної техніки та інтелектуальних роботів» (ДР № 0219U001644). Автор брала участь у виконанні даних робіт як виконавець.

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

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення таких **завдань:**

– побудова матриці жорсткості, що дозволить забезпечити розрахунок деформації гнучких електричних між'єднань модулів ЕТ за відомого вектора зовнішніх сил;

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

– отримання математичної моделі впливу конструкційних параметрів

плаского з'єднувача на перехідний опір у зоні контактування ГКС із його матрицею контактів;

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

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

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

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

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

Предмет дослідження – фізико-технологічні параметри електричних різних та нерозрізних міжз'єднань у ГКС.

Методи дослідження. Під час проведення дисертаційних досліджень використовувалися: методи скінчених елементів і розв'язання диференціальних рівнянь, положення теорій пружності та руйнування твердих тіл, методи математичного та комп'ютерного моделювання – для розробки моделі руйнування електричних міжз'єднань у ГКС, виконаних за допомогою УЗ-зварювання, та оцінки напружено-деформованого стану ГКС; метод регресійного аналізу та положення теорії факторного експерименту – для

розробки експериментальної моделі процесу контактування плаского з'єднувача з нульовою силою вставки з ГКС; положення теорії масового обслуговування – для розробки моделі технологічного процесу складання модулів ЕТ на основі поліімідних ГКС; методи експериментальних досліджень – для оцінки впливу механічних чинників на експлуатаційні параметри запропонованого з'єднувача для ГКС.

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

– отримав подальший розвиток метод розрахунку складових матриці жорсткості скінчених елементів для електричних міжз'єднань, який дозволяє забезпечити розрахунок деформацій пружних елементів міжз'єднань, враховуючи особливості видів деформації для різних видів зовнішніх сил;

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

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

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

– вперше розроблено математичну модель ТП складання модулів ЕТ на основі алюміній-поліімідних гнучких структур, що дозволяє за допомогою системи моделювання GPSS World виконувати оцінку надійності та стабільності

ТП, визначати відсоток виходу придатних виробів, середній час виготовлення одного виробу, середню кількість зібраних виробів.

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

– розроблено конструкцію плаского з'єднувача з нульовою силою вставки та технологію його з'єднання з гнучкими комутаційними структурами у складі модулів ЕТ. Викладені рішення захищені патентом на корисну модель № 103402 «Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки» (від 10.12.2015 р.) (Додаток А). Виготовлено дослідні зразки шлейфів плаского з'єднувача з діелектрику лакофольгового марки ФДІ-А-50 (товщина алюмінію 30 мкм, товщина полііміду 20 мкм);

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

– розроблено та відпрацьовано технологічний процес складання гнучких алюміній-поліімідних комутаційних структур зі зварними міжз'єднаннями, виконаними за допомогою УЗ-зварювання, розроблено маршрутну карту на вказаний ТП (Додаток Б).

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджені на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (НДТІП, м. Харків, акт від 22.10.2019 р.); на підприємстві ТОВ «НВП «Укрінтех» (акт від 27.01.2020 р.), на підприємстві ТОВ «НВП «ЛТУ» (акт від 10.06.2020 р.), а також у навчальний процес на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька

політехніка» (акт від 20.05.2020 р.), на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського (акт від 30.04.2020 р.) та на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки (акт від 30.04.2020 р.) (Додаток В).

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 експериментальних зразків міжз'єднань та їх компонентів.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані безпосередньо здобувачем та опубліковані в роботах [1-26]. Робота [10] написана без співавторів і містить передумови створення гнучких комутаційних структур та застосування їх в існуючих та нових пристроях.

У публікаціях, написаних у співавторстві, внесок здобувача полягає в тому, що: [1, 8] – розроблено методику прогнозування параметрів РЕЗ та побудови моделі їх відмов; [2] – визначено основні вимоги до забезпечення технологічних умов виробництва ЕТ в умовах мікромініатюризації; [3, 7] – проведено аналіз типової конструкції та досліджено механічні навантаження, що виникають в конструкції з'єднувача FFC і FPC шлейфів; [4, 6] – проведено аналіз існуючих методів контролю якості гнучких структур на всіх етапах виробництва; [5, 7, 16, 18, 19] – досліджено забезпечення якісних показників гнучких компонентів в умовах дії великої кількості дестабілізуючих чинників на всіх етапах життєвого циклу; [9] – проведено вибір та обґрунтування матеріалу елементів комутації; [12, 13] – визначено особливості формування мікроз'єднань в електронних модулях на алюмінієво-поліімідній основі методом ультразвукового зварювання; [14, 21, 22] – описаний спосіб, який застосовується для побудови матриці жорсткості МЕМС на основі методу напружень з урахуванням типу деформації; [15, 23] – розроблено стенд для

дослідження якості електричних міжз'єднань гнучких структур та методику проведення експериментальних досліджень; [19, 24] – запропонована конструкція плоского з'єднувача електронних пристроїв з нульовою силою вставки; [11, 20] – досліджено особливості механічних деформацій і руйнувань гнучких друкованих плат; [25, 26] – здійснено моделювання процесів руйнування монтажного з'єднання ЕТ.

Здобувачка брала особисту участь в обробці й обговоренні результатів, підготовці публікацій і в усіх етапах впровадження у виробництво отриманих результатів. Здобувачка брала особисту участь в обробці й обговоренні результатів, підготовці публікацій і в усіх етапах впровадження у виробництво отриманих результатів.

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

Публікації. За темою дисертації з викладенням основних її результатів опубліковано 26 наукових праць, у тому числі 1 патент на корисну модель,

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

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота є рукописом і складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 130 найменувань (на 15 сторінках), 4 додатків (на 23 сторінках), 70 рисунків (на 57 сторінках), 11 таблиць (на 12 сторінках). Загальний обсяг роботи складає 200 сторінок, з них 150 сторінок основного тексту.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МІЖЗ'ЄДНАНЬ МОДУЛІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

1.1 Класифікація електричних міжз'єднань модулів ЕТ

Під конструкцією електронної техніки розуміється сукупність деталей і матеріалів з різними фізичними властивостями, що знаходяться в певному фізичному зв'язку (електромагнітному, тепловому, механічному і т. п.), що забезпечує виконання заданих функцій з необхідною точністю і надійністю при дії зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів і відтворена в умовах виробництва. Конструкція визначає взаємне розташування частин в просторі, способи їх з'єднання, характер взаємодії, а також матеріал, з якого вони виготовлені [8]. Конструкції ЕТ відрізняються рядом особливостей, які виділяють їх в окремий клас серед інших конструкцій:

- ієрархічною структурою, під якою мається на увазі послідовне об'єднання простіших електронних вузлів в більш складні [12];
- домінуючою роллю електричних і електромагнітних зв'язків;
- наявністю неоднорідностей в електричних з'єднаннях, що призводять до спотворення і загасання сигналів, а також паразитних зв'язків, що породжують перешкоди (наведення);
- наявністю теплових зв'язків, що вимагає вживання заходів захисту термочутливих елементів;
- слабким зв'язком внутрішньої структури конструкції з її зовнішнім оформленням.

Удосконалення методів конструювання ЕТ має бути спрямоване на зменшення маси і габаритів апаратури; підвищення її надійності при збереженні високої стабільності конструктивних параметрів в умовах досить

жорстких зовнішніх впливів; забезпечення високої ремонтпридатності; зручності роботи з апаратурою та технічного обслуговування.

Тільки мікромініатюризація без використання нових принципів конструювання не дозволяє успішно вирішити поставлене завдання. При мікромініатюризації виникають труднощі, пов'язані з виробництвом апаратури, знижується надійність, зростає вартість, погіршуються точність і стабільність параметрів, не можуть відведення тепла і усунення паразитних електричних, магнітних і гальванічних зв'язків. Рішення проблеми полягає в розробці нових принципів конструювання з широким використанням тонкоплівкової і напівпровідникової технології, багат шарових друкованих плат, сучасних матеріалів; у впровадженні модульного методу проектування, нових високопродуктивних методів виробництва, стандартизації і уніфікації [1-6].

Зменшення розмірів при паралельному ускладненні пристроїв, збільшенні їх функціональності веде до необхідності створення модульних продуктів, що мають на увазі використання декількох друкованих плат і безлічі зв'язків між ними.

Зростання функціональності також позначилось на зменшенні часу реакції пристроїв, потреби в обробці даних в режимі реального часу, збільшенні обсягів даних. При цьому до пристроїв пред'являються суворі вимоги до цілісності сигналів для забезпечення стабільної роботи пристроїв.

При виборі компонентів для проектного пристрою, розробник завжди балансує між мініатюрністю, електричними характеристиками і надійністю [13].

Таким чином, такі параметри ЕТ, як рівень інтеграції, швидкодію, надійність, теплові режими, габаритно-масові характеристики, вартість істотно залежать від використовуваних конструктивно-технологічних рішень з'єднань (рис. 1.1), комунікацій елементів, вузлів і пристроїв систем, значна частина яких виконується у вигляді багат шарових комутаційних плат (БКП).



Рисунок 1.1 – Класифікація конструкторсько-технологічних методів реалізації електричних з'єднань ЕТ

Особливе місце в складі ЕТ, перспективних для здійснення комплексної мініатюризації, займають інтегральні схеми високих ступенів інтеграції в складі так званих комплектів інтегральних схем – цифрових мікропроцесорних і аналогових функціональних комплектів. Комплектом інтегральних схем будемо називати групу з кількох взаємозалежних інтегральних схем високого ступеня інтеграції, узгоджених один з одним по живленню, параметрам входу і виходу, функціонуванню і забезпечують при спільному включенні в різних поєднаннях широкий набір складних функціональних характеристик.

Подальша мікромініатюризація ЕТ має теоретичну межу, що обумовлено електричними обмеженнями, пропускнуною спроможністю, надійністю, конструкторської складністю [14].

1.1.1 Основні види контактних з'єднань

Основні види контактних з'єднань (нерознімні, обмежено-рознімні, рознімні) з'явилися задовго до появи електричних з'єднань (ЕЗ) в

мікроелектронному виконанні. Однак створення мікроелектронної апаратури потребувало її подальшого розвитку з метою мінімізації габаритів і маси, збільшення надійності; зниження вартості виробництва і експлуатації, забезпечення роботи з мілівольтовими і мікроамперними сигналами; підвищення граничної частоти, забезпечення мінімуму випромінювання в навколишній простір і т. д. [12].

Нерознімні контактні з'єднання є найбільш поширеними в конструкціях ЕЗ зважаючи на їх високу надійність, малі габарити і низьку вартість. Малі габарити обумовлюють також хороші частотні властивості контактів. Нерознімні контактні з'єднання реалізуються пайкою, зварюванням, клейкою (рис. 1.1). Перевагами контактування пайкою є простота процесу і хороша ремонтпридатність. Технологія накладає обмеження на конструкцію. Так, для того щоб припій заповнив зазор між металізацією отвору в платі і виводів, що вставляються в цей отвір, зазор повинен складати 0,1 ... 0,15 мм. При меншому зазорі припій буде пористим, при більшому – він може не проникнути на всю товщину плати.

При контактуванні зварюванням необхідно забезпечити локалізацію тепла. Зварювання з мідною фольгою не дає стабільної якості через високу теплопровідність міді (10 ... 20% зварних контактів можуть бути перегріті або недогріті). Тому матеріал контактної поверхні під зварювання вибирається з меншою, ніж у міді, теплопровідністю (нікель, нержавіюча сталь).

Обмежено-рознімне контактне з'єднання може здійснюватися притиском контактуємих поверхонь за допомогою жорсткого (земляна клема на несучій конструкції), пружного металевого або еластичного полімерного контакту.

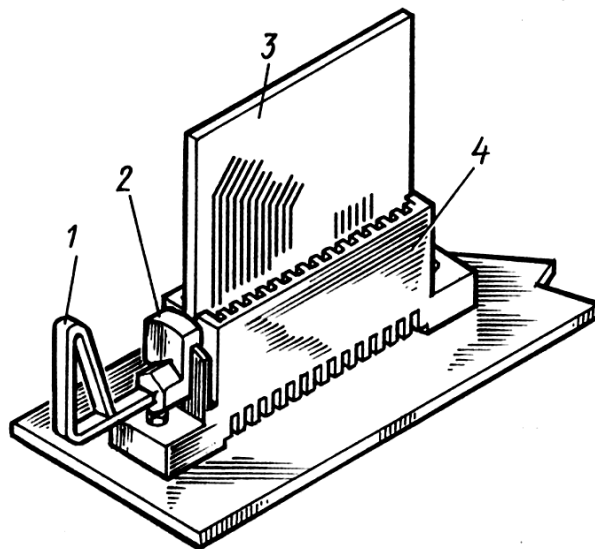
Еластичний контакт може бути отриманий шляхом нанесення на силіконову гуму або поліімідну плівку провідних ліній, її що покриває, а також за допомогою еластомеру з наповнювачем з дрібнодисперсного срібла, міді, нікелю, графіту.

Рознімні контактні з'єднання [12] дозволяють збільшити ремонтпридатність при експлуатації і спростити складання ЕЗ. Однак при

цьому збільшуються маса, габарити і вартість контактного з'єднання. Крім того, ресурс рознімних з'єднань не перевищує декількох тисяч з'єднань / роз'єднань, а стійкість до механічних і кліматичних впливів значно гірше, ніж у нерознімних з'єднань.

У конструкції ЕЗ широко застосовуються низько- і високочастотні рознімні з'єднувачі. Розрізняють низькочастотні з'єднувачі безпосереднього контактування, непрямого контактування, з нульовим зусиллям зчленування (рис. 1.2).

Необхідність використання з'єднувачів з нульовим зусиллям зчленування обумовлена: збільшенням контактного тиску з метою зниження перехідного опору; неприпустимим збільшенням зусилля стиковки / розстикування з'єднувача при числі контактів більше 50; викривленням плат, що викликає нерівномірне підтискання контактів і ускладнює стикування / розстикування з'єднувачів. Використання таких з'єднувачів дозволяє замикати контакти в потрібному порядку, наприклад шини заземлення – шини живлення – сигнальні шини при вмиканні і в зворотному порядку при вимиканні.



1 – кулачковий ключ; 2 – замок; 3 – друкована плата;

4 – розетка з'єднувача

Рисунок 1.2 – З'єднувач з нульовим зусиллям зчленування для друкованої плати [12]

Лінії зв'язку (ЛЗ) напівпровідникових інтегральних схем (ІС) і великих ІС виконуються за допомогою шару металізації і дифузійного шару; монтажні з'єднання ВГІС і міжз'єднань – одно-, дво- і багатошарового плівкового і мікродротового монтажу; з'єднання між ВІС і міжз'єднань – друкованого та мікродротового монтажу; з'єднання між осередками і блоками ЕТ – джгутів, гнучких шлейфів і плоских кабелів (рис. 1.3) [8]. Перераховані види мікроапаратури мають різну технологічну природу і сильно відрізняються по конструктивним характеристикам.

Серед усіх видів ЛЗ можна умовно виділити дві групи сполук: плоскі (плівкові, друковані) і об'ємні (мікродротові, гнучкі шлейфи і плоскі кабелі). На рівні мікросхем і мікроблоків все ширше використовується матричне розташування виводів, що забезпечує до півтисячі виводів (в перспективі до кількох тисяч) від одного мікроблоку.

Знання електрофізичних параметрів, показників надійності, вартості виробництва сучасних багатошарових комутаційних плат, що є конструктивною основою вузлів і блоків ЕТ, що здійснює об'єднання елементів в єдину систему, а також методів виготовлення, особливостей різних видів ліній зв'язку БКП, є необхідним при розробці конструкції електричних з'єднувачів для поверхневого монтажу, де контактне з'єднання забезпечується за рахунок взаємного притиску контактуючих поверхонь [11].

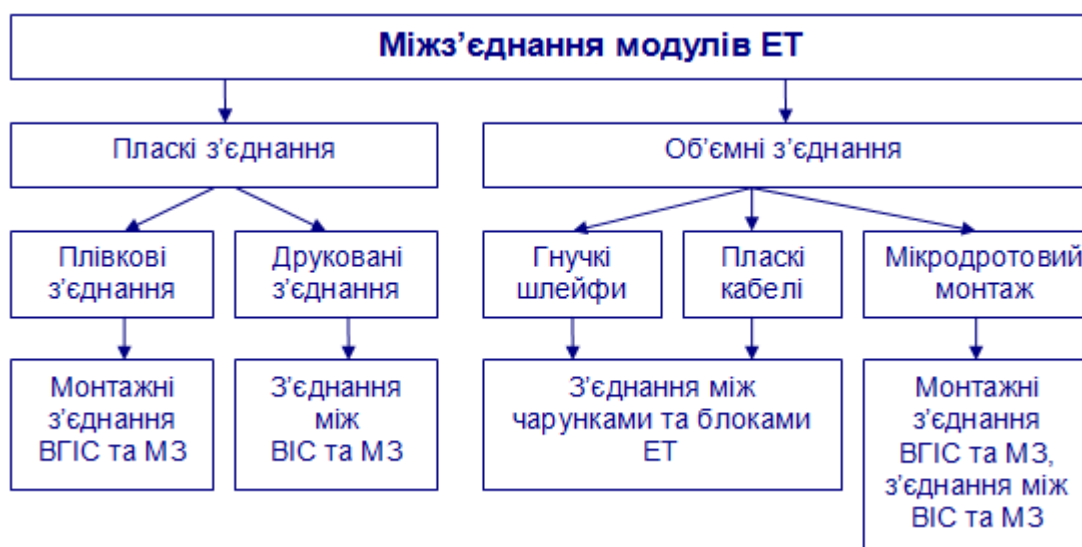


Рисунок 1.3 – Види електричних міжз'єднань модулів ЕТ [8]

1.1.2 Вимоги до контактних з'єднань

Одні вимоги є загальними для рознімних та нерознімних з'єднань, а частина – специфічними для того чи іншого виду контактних з'єднань. Загальними вимогами до контактних електричних міжз'єднань є: мінімальний перехідний опір з'єднання і його нестабільність, достатня механічна міцність.

Основними параметрами нерознімних контактних з'єднань є: незначний вплив технологічних чинників на сусідні ділянки; хороша ремонтпридатність; можливість механізації і автоматизації технологічного процесу контактування. Нерознімні контактні з'єднання ІС повинні відповідати наступним додатковим вимогам: міцність з'єднання повинна бути не нижче міцності елементів, що з'єднуються; можливість з'єднання елементів з різних матеріалів і різних типорозмірів (наприклад, золотого дроту діаметром 40 мкм і алюмінієвої контактної площадки товщиною 1 мкм).

При розробці конструкцій електричних з'єднань визначають [12]:

- перетин жил зв'язків;
- конструкцію провідника (одножильний, багатожильний, срібний, луджений, з ізоляцією або без неї, коаксіальний, екранований, високовольтний, низьковольтний, друкований, плівковий і т. д.);
- конструкцію сукупності провідників (скручування провідників, джгут круглого перетину, плоский кабель, друкований монтаж плати і т. д.);
- методи кріплення окремих провідників і їх сукупності;
- відстань між окремими провідниками;
- взаємне розташування провідників (ортогональне, під кутом, паралельне);
- конструкцію контактних з'єднань (роз'ємні і нероз'ємні); розташування елементів узгодження та фільтрації.

При цьому враховуються не тільки схемотехнічні, а й технологічні чинники: номенклатура використовуваних технологічних процесів, їх стабільність, характеристики обладнання і оснастки, параметри матеріалів конструкції; їх стійкість до технологічних впливів [13].

1.2 Аналіз технологій і галузей застосування гнучких комутаційних структур у модулях ЕТ

Гнучкість, на противагу звичайним методам зміцнення за рахунок збільшення розмірів або міцності використовуваних матеріалів, забезпечує розподіл навантаження, зберігаючи напруги в матеріалі в межах пружної деформації. Методи зниження напружень можуть бути різними: шляхом локалізації області напруг, введення додаткових робочих ділянок для розподілу навантаження, зміни конфігурації пристрою, форми [9].

В цілому, гнучкість знижує матеріаломісткість тому дозволяє використовувати більш якісні матеріали [10]. 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 [15].

У якості діелектричної основи ГКС застосовуються найрізноманітніші полімерні матеріали: поліефіри, зокрема поліетилентерефталат (Mylar або лавсан), поліімід (Каптон різних типів), фторополімерні плівки (Teflon), рідинно-кристалічні полімери (LCP) і навіть термопластичні плівки, такі, наприклад, як поліетилен, полівініл хлорид і ін. Товщина полімерної основи змінюється в широких межах, найчастіше вона становить від 10 до 125 мкм [16].

Для ГКС більшості груп електронних пристроїв використовується неорганічний напівпровідник (поліімідна плівка або поліетилентерефталат) – міцний базовий матеріал, що має високий ступінь гнучкості, в першу чергу, завдяки експлуатаційним характеристикам, які значно перевищують значення продуктивності відомих органічних матеріалів, включаючи високоефективну рухливість і довгострокову стабільність при механічних, електричних і екологічних навантаженнях. Основною причиною у використанні неорганічних напівпровідників і пов'язаних з ними традиційних методів обробки є

обмеження у виборі матеріалів і стратегій виготовлення.

Наприклад, більшість полімерних субстратів несумісні з високими температурами, необхідними в традиційних процедурах осадження, кристалізації і легування. Крім того, при виробництві рулонним друком, великі площі і низька ціна на одиницю площі, в деяких випадках, легше досягається з використанням неорганічними речовинами, ніж органічними аналогами [17].

Нещодавні дослідження демонструють, однак, що відповідний вибір матеріалів, конструкторських схем і стратегій інтеграції дозволяють використовувати високопродуктивні монокристалічні неорганічні напівпровідники в механічно сумісних системах, таким чином, щоб подолати такі обмеження [18].

Однак для досягнення цих потенційних переваг такі плати повинні мати певні характеристики. Наприклад, гнучкі ділянки цих друкованих плат повинні бути здатні витримувати часті вигини і деформації, пов'язані з процесами експлуатації, що використовуються для виготовлення плати і включення її в електронне обладнання, в якому вона буде використовуватися.

Якщо плата не має таких характеристик, то загальна вартість виготовлення таких плат різко зростає внаслідок високої частоти відходів, пов'язаних з виготовленням і установкою таких блоків.

Крім того, для того, щоб легко використовувати жорсткі / гнучкі плати в компактних конфігураціях, гнучкі ділянки друкованої схеми повинні мати здатність згинатися навколо дуже малих радіусів без збоїв. Якщо мінімальний радіус вигину гнучкого перерізу занадто великий, можливість використання плати в компактних місцях буде небажано зменшена. Відповідно, секція гнучкого ланцюга повинна мати найменший можливий мінімальний радіус вигину [1, 19].

Термін «гнучка електроніка» (полімерна, друкована) відображає дві основні складові даного напрямку:

- 1) матеріалознавчий базис – конструктивно-матеріалознавчі особливості підкладок, систем комутації-ізоляції і функціональних елементів. Для

виготовлення пристроїв гнучкої електроніки можна використовувати розчинні і друковані методи, що значно знижує вартість технологічних процесів і збільшує їх продуктивність. Використання матеріалів гнучкою електроніки дозволяє не тільки знизити вартість одного пристрою, але також робити пристрої великої площі, знизивши при цьому вартість одиниці площі. Це відіграє велику роль у виробництві дисплеїв і сенсорних інтерфейсів [6];

2) технологічний базис – комплекс способів формування функціональних елементів і систем комутації-ізоляції, заснованих на друкованих рулонних трафаретних і крапельно-струменевих технологіях. Перевагою таких технологій є більш прості і дешеві виробничі процеси, які дозволяють знизити вартість кінцевих пристроїв в порівнянні з традиційними технологіями електроніки. Так, можна знизити кількість циклів фотолітографії, уникнути високотемпературних процесів і спеціальних вакуумних умов [20].

Виробництво гнучкої електроніки в наш час орієнтується на виготовлення таких виробів, як надмініатюрні радіотехнічні модулі, в тому числі інтегровані з сенсорами і системами для збору і передачі інформації, мініатюрні навігаційно-орієнтаційні системи для автономної навігації і позиціонування, мікроаналітичні системи типу «лабораторія на чипі» матричного і капілярного типів для біомедичного та технічного контролю біотехносфери, інтелектуальний високоінтегрований багатофункціональний одяг, в тому числі з епідермальною розподіленою сенсорно-виконавчою системою, розподілені, гнучкі і інші мініатюрні джерела енергії, включаючи рекуператори з ефіру і навколишнього середовища, мікроробототехнічні засоби наземного та повітряного базування, дисплеї, гнучкі акумулятори, фотоелектричні, освітлювальні, автомобільні та оборонні прилади та багато ін.

Для звичайного споживача гнучка електроніка – це в основному пристрої побутового призначення (гнучкі дисплеї та датчики), для виробників та вчених коло використання ГКС набагато ширше, тому що дозволяє: зменшити габарити і вагу пристрою; вбудувати електроніку в корпус складної форми; відмовитися від сполучних роз'ємів; забезпечити динамічну гнучкість з'єднань; підвищити

надійність з'єднань; спростити обслуговування при експлуатації; створювати тривимірну структуру, що дає можливість тривимірного монтажу і здатність обгинання контурів блоків електронних пристроїв; використання органічних матеріалів для створення підкладки [16].

Використовують ГКС у тих випадках, коли вони працюють в умовах вібрації, багатократних згинань, або коли платі необхідно надати компактную вигнуту форму. Було б несправедливо стверджувати, що ГКС у всьому перевершують свої жорсткі аналоги [10], але вони мають цілий ряд безумовних переваг, що дозволяють зайняти свою нішу у виробництві функціональної електроніки. Конструкційна гнучкість є з одного боку перевагою ГКС, але з іншого боку призводить до появи проблем, викликаних необхідністю забезпечення стабільності матеріалів і конструкцій ГКС в часі під впливом деформацій різного виду [21-22].

Більшість гнучких схем – всього лише пасивні сполучні елементи, які використовуються для з'єднання таких електронних компонентів, як інтегральні схеми, резистори і конденсатори. Однак, деякі з них можуть застосовуватися для створення взаємного зв'язку між іншими електронними блоками як безпосередньо, так чи через з'єднувачі.

Працездатність виробів ЕТ все частіше залежить 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. 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 [23].

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; чітка організація несучих

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. Але надійність таких з'єднувачів залежить від їх мініатюризації і зменшується із збільшенням ступеню мініатюризації [24].

Спільне використання різних середовищ в якості рухомих елементів, елементів змінної форми дозволило створити високонадійні пристрої нового принципу дії: струменеві друкуючі голівки принтерів, безконтактне зчитування інформації з жорстких магнітних дисків, наноімпрінтинг з використанням тиску через повітряну прокладку (air cushion pressing), а також контактування в багатозондових підключаючих пристроях [25], мікродозуючих пристроях, рідинних і твердотільних реактивних мікродвигунах.

Наявність надійного з'єднання між окремими блоками або пристроями – запорука їх тривалої роботи. У багатьох випадках для з'єднання окремих друкованих плат вдаються до так званої гнучкої електроніки – шлейфів, виконаним у вигляді металізованої синтетичної плівки.

Подібні міжз'єднання є більш гнучкими і компактними і більш надійними в плані стійкості до багаторазових вигинів, ніж традиційні шлейфи з паралельних провідників. Разом з тим, виникає необхідність в спеціалізованих рознімах для фіксації гнучких шлейфів.

В основному гнучкі шлейфи застосовуються для підключення до основної плати приладу пристроїв отримання даних або сигналів (сенсорні панелі) і її відображення (дисплеї, видошукачі) [22]. Струми через ці сполуки, як правило, невеликі – не більше декількох сотень мА, а часто набагато менше. Основними вимогами до подібних рознімів є надійність фіксації, простота монтажу, легкість підключення шлейфа, невеликі габарити (зокрема, висота).

1.3 Технології електричних між'єднань модулів ЕТ

Технологія гнучких друкованих шлейфів FFC (Flat Flexible Cable), а також гнучких друкованих плат FPC (Flat Printed Circuit) була розроблена задля мініатюризації конструкції приладів, зменшення вартості, а також поліпшення технологічності монтажу з'єднань електронних пристроїв, в першу чергу в секторі портативних і мобільних пристроїв [26].

FFC – гнучкий плоский шлейф, що складається з безлічі мідних провідників, ламінованих між двома шарами діелектричної плівки (поліестеру або полііміду). Гнучкі шлейфи використовуються для створення компактних з'єднань між друкованими платами пристроїв. Для з'єднання провідників шлейфу з провідниками на друкованій платі використовуються пайка або ж роз'єми з затискними контактами.

На рис. 1.4 показана спрощена схема FFC-шлейфа для електричних між'єднань (ЕМЗ) модулів ЕТ.

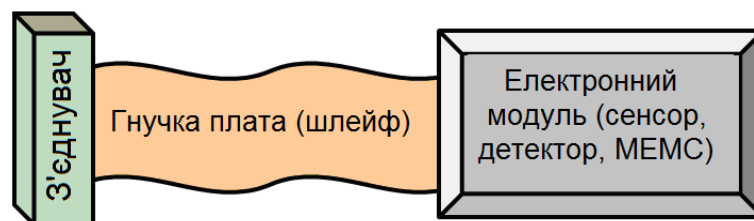


Рисунок 1.4 – Спрощена схема електричних між'єднань модулів ЕТ

В основному гнучкі шлейфи застосовуються для підключення до процесорної плати приладу пристроїв отримання даних або сигналів від ПЗС- і КМОП матриць, мікрофонів, а також пристроїв введення інформації (сенсорні панелі) і виведення (дисплеї, видошукачі). Токи через ці сполуки, як правило, невеликі - не більше декількох сотень міліампер, а часто набагато менше. Основними вимогами до подібних роз'ємів є надійність фіксації, простота монтажу, легкість підключення шлейфа, невеликі габарити (зокрема, висота).

FPC – технологія схожа на технологію FFC, але в цьому випадку на

гнучкій плівці-носії монтуються електронні компоненти схеми (SMD-резистори, конденсатори, мікросхеми та інші компоненти). Для з'єднання з іншими складальними одиницями портативного пристрою можуть використовуватися паяні з'єднання або ж затискні роз'єми. FPC-плата може мати багат шарову структуру і складну топологію (рис. 1.5).

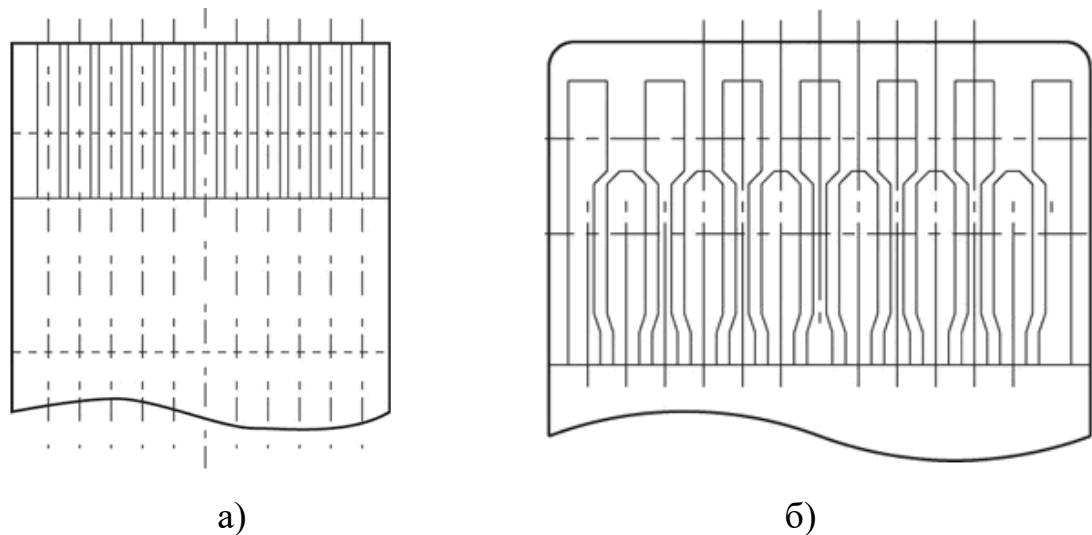


Рисунок 1.5 – Типове розташування контактних площадок на гнучких шлейфах: а) однорядне, б) дворядне

Гнучкий шлейф являє собою систему мідних провідників, сформованих на гнучкій діелектричній плівці. Найбільш широке використання в якості основ шлейфів отримали поліімідні плівки, які, поряд з хорошими електрофізичними і міцністними якостями, характеризуються високою стійкістю до термовпливів (гнучкість плівок зберігається в широкому діапазоні), відсутністю істотних газовиділень в вакуумі, а також високою радіаційною стійкістю. Конструкція FFC / FPC-шлейфів показана на рис. 1.6.

Вибір роз'єму не менш важливий, ніж вибір плівкового кабелю, оскільки від цього залежить стійкість пристрою до механічних впливів, перепадів температур, а також якість проходження сигналу.

Вибрані FFC-роз'єм і FFC-кабель насамперед повинні бути сумісні з габаритними розмірами і виводами. Для цього, крім кроку і кількості контактів,

в документації на роз'єм вказуються параметри відповідного шлейфа (ширина шлейфу, положення і розміри контактів, наявність у кабелю «вух» для найкращого утримання в роз'ємі і так далі).

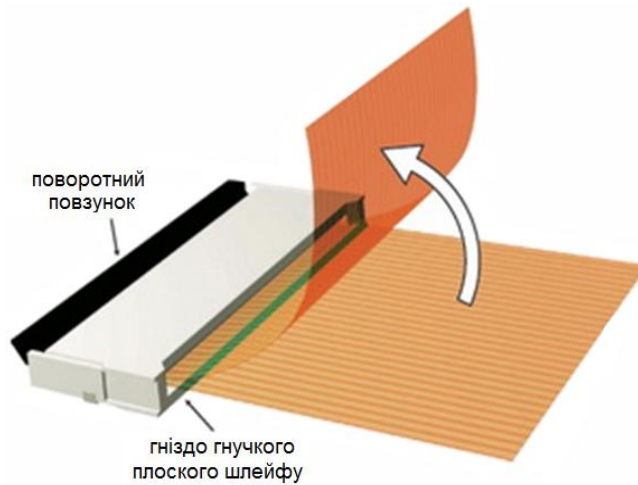


Рисунок 1.6 – Конструкція FFC / FPC-шлейфів

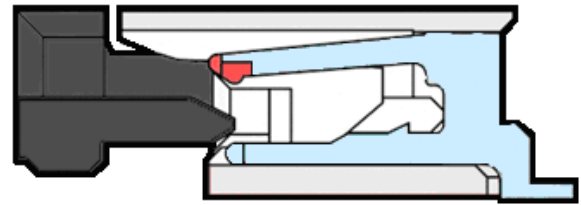
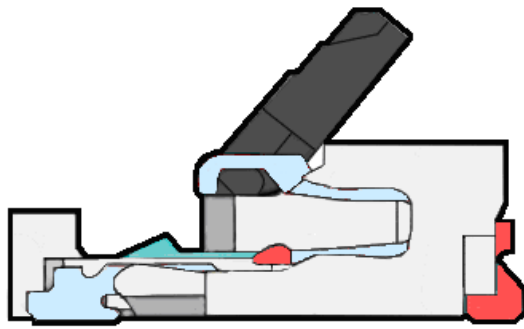
Також має значення положення контактів (Contact Position) в роз'ємі щодо його площині і орієнтація роз'єму щодо площині друкованої плати.

Контакти можуть розташовуватися в нижній частині роз'єму (Bottom), у верхній частині (Top) і з двох сторін (Dual) (рис. 1.7). Також з'єднувачі розділяють за характером підключення: вертикальним або горизонтальним, кількістю і розташуванням контактів.

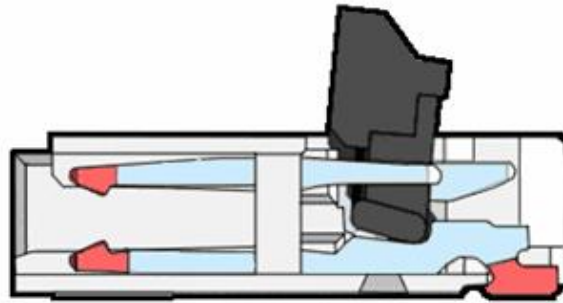
Положення контактів роз'єму і його орієнтація повинні бути обрані спільно з типом плівкового кабелю (А або D), виходячи зі зручності приєднання і щоб уникнути перекручування кабелю.

За типом утримання кабелю роз'єми можна розділити на два види: ZIF (Zero Insertion Force) і non-ZIF, або LIF (Light Insertion Force – підвид non-ZIF-роз'ємів).

Роз'єми ZIF забезпечені фіксатором, який одночасно забезпечує утримання кабелю в роз'ємі і притискає виводи кабелю до його контактів. Фіксатори можуть бути поворотні або ковзаючі. Поворотні фіксатори можуть розташовуватися як в передній, так і в задній частині роз'єму.



а) з нижнім розташуванням контактів б) з верхнім розташуванням контактів



в) з двостороннім розташуванням контактів

Рисунок 1.7 – Приклад конструкції роз'єму

У роз'ємах LIF підключення кабелю відбувається шляхом його вставки в роз'єм, а утримання проводиться за рахунок підпружинення контактів роз'єму. Незважаючи на те, що зусилля вставки досить мале, на тонких кабелях можливе утворення заломів.

Роз'єми LIF, як правило, мають меншу вартість і менші габарити, ніж ZIF (рис. 1.8).

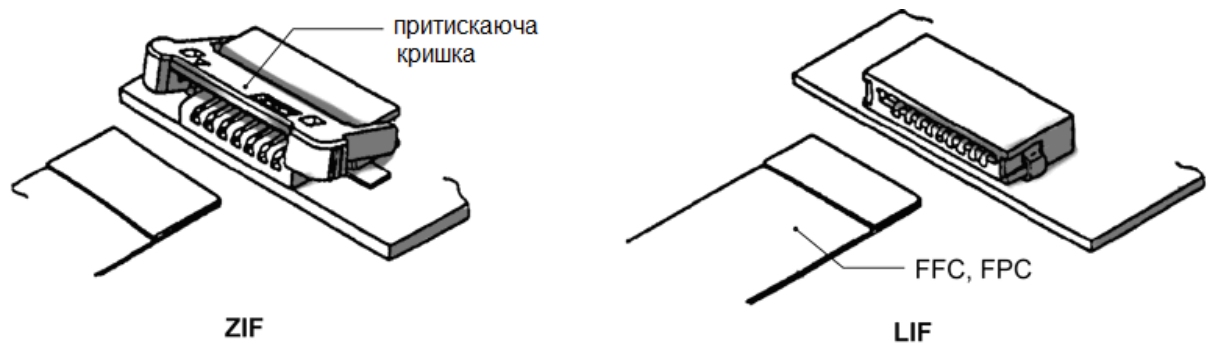


Рисунок 1.8 – Різниця роз'ємів ZIF та LIF

Як правило, FPC-роз'єми розраховані на вкрай обмежене (близько 20) кількість циклів сполучення.

Крім стандартних роз'ємів ZIF і LIF, існують також роз'єми FPC-To-Board, призначені для надійного приєднання довгих кабелів в таких застосуваннях як LCD-телевізори. Роз'єми FPC-To-Board складаються з двох частин, одна з яких фіксується на кабелі, а інша встановлюється на платі. В результаті замикання однієї частини в іншу утворюється надійне з'єднання, що запобігає вислизанню або недостатньо глибокому устанівку кабелю в роз'єм.

1.4 Плаский з'єднувач для електронних пристроїв з нульовою силою вставки на основі ГС

У ході досліджень, проведених на кафедрі КІТАМ ХНУРЕ, було подано заявку й отримано патент України на корисну модель «Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки» (Додаток А). Запропонована корисна модель відноситься до електромеханічних пристроїв, зокрема до струмоведучих з'єднувачів пласких або стрічкових шлейфів [27-28].

За результатами аналізу аналогічні конструкції [29] мають низку суттєвих недоліків. По-перше, низька ремонтпридатність у випадку пошкодження пружних контактів, по-друге, відносно невелика щільність розташування контактів, по-третє, швидке стирання зовнішнього гнучкого шлейфу при багатократній установці, по-четверте, значна крихкість конструкції важеля.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення щільності розташування контактів з'єднувача, збільшення можливої кількості виводів, та підвищення надійності механізму фіксації за рахунок удосконалення конструкції.

Поставлена задача вирішується наступним чином. У плоскому з'єднувачі електронних пристроїв з нульовою силою вставки, що містить контактну систему, розташовану в корпусі з отвором для введення зовнішнього гнучкого шлейфа, що підключається, притискну рухому планку та фіксатор для

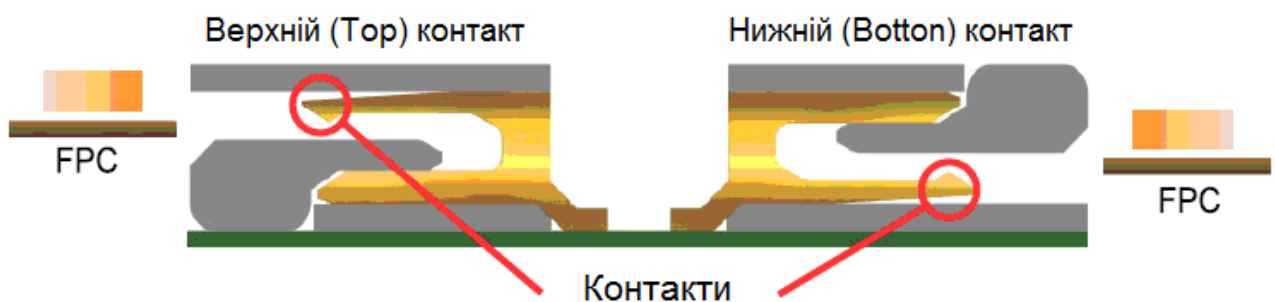
притискної рухомої планки, згідно з запропонованим технічним рішенням, контактна система виконана у вигляді порожнистої герметичної ємності, сформованої з гнучкої друкованої плати та заповненої повітрям, на якій на одній стороні розташовані паралельні контакти для зовнішнього гнучкого шлейфу, що виконані на полімерному фольгованому матеріалі контактної системи шляхом травлення, причому зовнішній вивід контактної системи жорстко з'єднаний з зовнішньою платою, притискна рухома планка виконана у вигляді кришки корпуса з ущільнювачем на нижній стороні.

Аналогами цього плоского з'єднувача можуть бути численні шлейфи FFC і FPC, які в свою чергу поділяються на ZIF і non-ZIF структури. Зокрема, аналогом є з'єднувач для шлейфів FFC / FPC [23].

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. 1.9).



а) принцип роботи заціпки з'єднувача FPC



б) з'єднувачі із верхнім і нижнім розташуванням контактів

Рисунок 1.9 – З'єднувачі FPC

Зовнішній гнучкий контактуючий шлейф проходить через отвір у корпусі. У замкнутому положенні рухома планка зміщується на невелику відстань (порядку сотень мікрметрів) і пружно притискає контакти до шлейфу в корпусі з'єднувача.

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.

Зовнішній гнучкий контактуючий шлейф проходить через отвір у корпусі. У замкнутому положенні рухома планка зміщується на невелику відстань (порядку сотень мікрметрів) і пружно притискає контакти до шлейфу в корпусі з'єднувача.

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 [27].

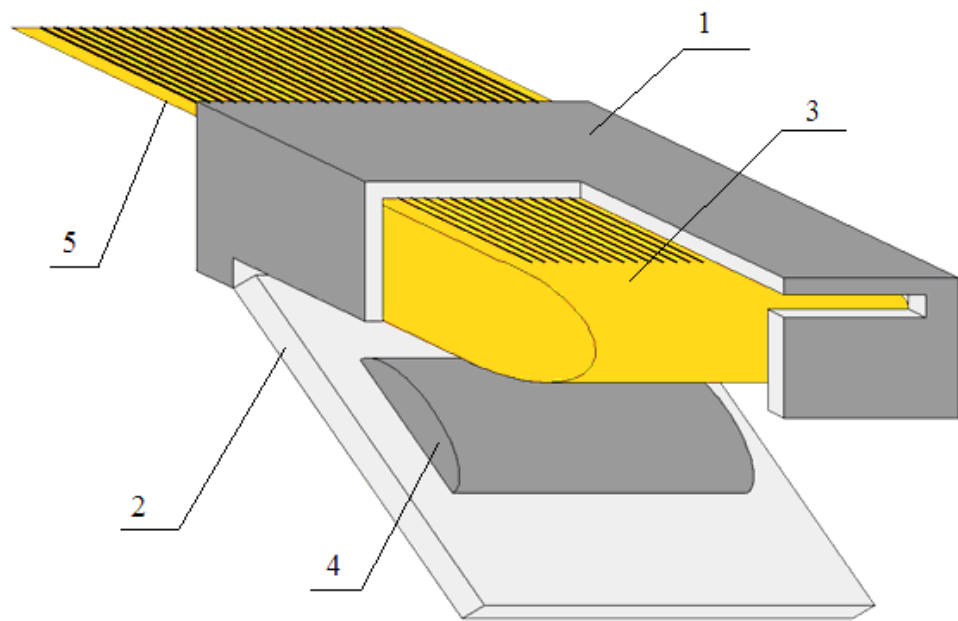
На рис. 1.10 наведена структура запропонованого з'єднувача, прийнятими позначеннями: 1 – корпус; 2 – рухлива планка у вигляді кришки; 3 – матриця контактів; 4 – ущільнювач; 5 – зовнішній вивід матриці

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 фольгової полімерної (наприклад, поліімідної) плати, згорнутої у вигляді циліндра, з гнучкою пластиною, що може пружно деформуватися.

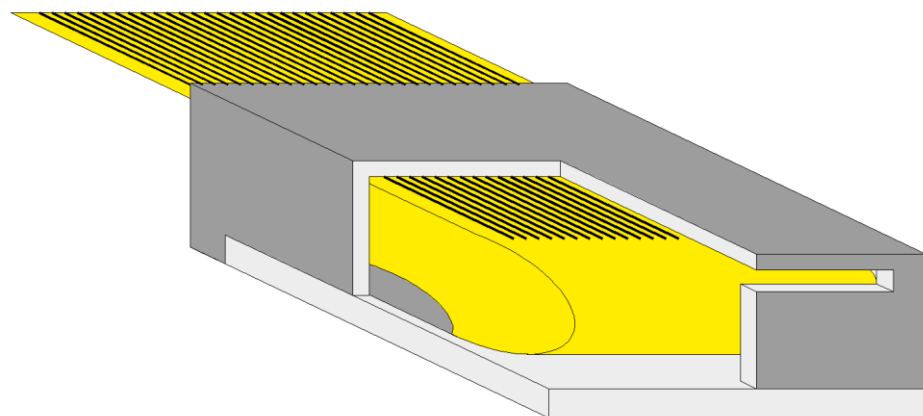
Під час повороту рухомої планки 2 (закриття кришки) матриця контактів деформується завдяки ущільнювачам 4, які знаходяться на кришці. При цьому підвищується тиск у внутрішній герметичній порожнині матриць і контактів і зовнішній гнучкий шлейф механічно притискається між матрицею контактів і

кришкою пристрою. Ступінь притиснення можна регулювати, змінюючи форму й об'єм ущільнювача.

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).



а)



б)

Рисунок 1.10 – Конструкція розробленого роз'єму у відкритому стані (а) та у закритому стані (б)

З'єднувач дозволяє підвищити щільність розташування контактів у рознімному з'єднанні ГКС, 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.

Таким чином, розроблений з'єднувач має підвищену щільність розташування контактів, можливу кількість виводів та надійність механізму фіксації.

Запропонована конструкція має ряд переваг у порівнянні зі стандартними роз'ємами:

- можливість зменшення кроку провідників підключаючого шлейфу до 50 мкм і як наслідок збільшення кількості контактів роз'єму при тих же розмірах;

- підвищення надійності фіксації шлейфа в роз'ємі за рахунок більшої поверхні контактування роз'єму і шлейфу (механічний контакт здійснюється не тільки в точках електричного контакту «провідник шлейфу - контакт роз'єму», а по всій поверхні шлейфу);

- можливість виготовлення контактів різної ширини груповим методом для забезпечення різних робочих струмів і напруг (наприклад контакт з провідником живлення, інформаційним і т.д.);

- підвищення ремонтпридатності роз'єму, а саме: технологія виготовлення контактної системи досить проста та дешева, що дозволяє у разі необхідності здійснити заміну контактної системи у тому ж корпусі.

1.5 Висновки до розділу 1

Подальша мікромініатюризація ЕТ має теоретичну межу, що обумовлено електричними обмеженнями, пропускнуою спроможністю, надійністю, конструкторською складністю.

Знання електрофізичних параметрів, показників надійності, вартості

виробництва сучасних багатошарових комутаційних плат, які є конструктивною основою вузлів і блоків ЕТ, що здійснює об'єднання елементів в єдину систему, а також методів виготовлення, особливостей різних видів ліній зв'язку БКП, є необхідним при розробці конструкцій електричних з'єднувачів для сучасних модулів ЕТ, зокрема компонентів гнучкої електроніки, де контактне з'єднання забезпечується за рахунок взаємного притиску контактуючих поверхонь.

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

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах автора [1-8] (Додаток Г).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [1-6, 8-29].

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОЗНІМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МІЖЗ'ЄДНАНЬ МОДУЛІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Конструкції сучасної електронної техніки є складними механічними системами з безліччю жорстких зв'язків, а їх мікромінітюаризація у багатьох випадках дійшла до фізичної межі розмірного, зарядового та енергетичного квантування компонентів. Для таких механічних систем, з неklasичними для механіки способами кріплення окремих конструктивних елементів, складно побудувати розрахункову модель, досить просту і в той же час таку, що добре відображає фізичні і динамічні властивості.

Для забезпечення механічної міцності міжз'єднань та зверхтонких електронних компонентів необхідною є можливість визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій. Ці причини зумовлюють необхідність застосування чисельних методів для розрахунку динамічних параметрів конструкцій електричних міжз'єднань ЕТ, що дозволить підвищити показники надійності розроблюваних засобів, що відповідатимуть вимогам нормативно-технічної документації по механічним характеристикам, скоротити терміни і вартість їх створення. Тому для подальших досліджень необхідно визначити деформації елементів конструкції пристроїв з використанням матриці жорсткості при відомому векторі зовнішніх сил.

Різноманітні види міжз'єднань, балки і мембрани є багатофункціональними компонентами мікросистемної техніки (МСТ) та мікроелектромеханічних систем (МЕМС), що має на увазі інтеграцію на кристалі мікроелектронних, мікромеханічних пристроїв, інформаційної та вимірювальної підсистем [30, 31]. Вони використовуються в якості плоских пружин (підвісів), в тому числі багатовиткових чутливих елементів сили, тиску, швидкості, потоку, частоти, температури, вмісту газів, консолей, мілліпеди,

кутів нахилу, прискорення та ін. [32-33].

Для їх створення характерно широке використання нових матеріалів, конструктивно-технологічних рішень, мікромінітюаризація, автоматизація та інтелектуалізація всіх етапів створення виробів. Необхідність враховувати принципи функціонування приладів і систем, зростаючі вимоги до точності, надійності, швидкодії, обсяги інформації, що опрацьовується [7], визначає необхідність використання і розвитку різних напрямків функціональної електроніки, МСТ і нанотехнологій [30, 34], інтелектуальних і 4D технологій.

МСТ, як сполучна ланка між мікроелектронікою, мікромеханікою і нанотехнологіями сприяє їх взаємному розвитку та збереженню темпів розвитку електронних пристроїв згідно емпіричному закону Мура [35]. МЕМС [36], як одним з напрямків МСТ, забезпечує створення мікромініатюрних міжз'єднань [37], основною проблемою яких є зменшення жорсткості, як окремих елементів, так і всієї конструкції в цілому.

Для використання «механічного» аспекту більшість мікроелектромеханічних пристроїв повинні мати можливість «руху». Переважна більшість з них є «мікромеханізмами», а тому до них можна застосовувати поняття кінематики та динаміки при їх розробці [35-38].

Для подолання більшості цих проблем багато мікромеханізмів розроблені як «сумісні механізми – міжз'єднання». Міжз'єднання – це клас механізмів, який не використовує жодних традиційних з'єднань (наприклад, повзункові, призматичні тощо), а натомість використовує гнучкі «пружинні» з'єднання, щоб дозволити їх складовим частинам перекладатися та обертатися. Розглянемо переваги міжз'єднань загалом та те, як вони застосовуються до мікроприладів.

Переваги:

- один матеріал, що не потребує з'єднань або мастил;
- високоточні, з нульовим «нахилом» в механізмі;
- невеликі витрати на виготовлення.

Обмеження:

- вбудований Springback [39-42] (геометрична зміна, внесена до деталі в

кінці процесу формування, коли деталь була звільнена від сил формуючого інструменту. Після завершення формування деталь, після сильного стиснення і розтягнення, повертається назад і це впливає на розмірну точність готової деталі);

– комплекс для проектування, що часто вимагає аналізу кінцевих елементів. Потрібно враховувати прикладені навантаження та термін дії втомі.

Проблеми, що виникають у зв'язку з цим, вирішуються різними способами. Одним з універсальних принципів забезпечення міцності конструкцій є використання властивості пружності елементів і пристроїв конструкції, які засновані на аналізі напружено-деформованого стану (НДС) під дією системи зовнішніх сил, розподілів температури, фізичних властивостей матеріалів і особливостей структури [33].

2.1 Постановка задачі та мета досліджень

Механічні елементи, як і електричні, можуть з'єднуватися послідовно або паралельно з іншими механічними елементами для утворення складних ланцюгів, а їхній стан може перетворюватися в електромагнітні величини з використанням ємнісних, електромагнітних, п'єзоелектричних та інших ефектів. Слід зазначити, що еквівалентні значення електричних параметрів, механічних елементів можуть значно перевищувати значення цих параметрів, досяжних при використанні електронних компонентів [31].

В цілому механічні елементи представляються у вигляді мас, елементів пружності (жорсткості), демпфування і втрат [43]. Електричними параметрами служать напруги і струми.

Проектування між'єднань апаратури, мікромеханічних сенсорів і актюаторів [44] базується на їх ієрархічному поданні як сукупності елементів загального призначення і оцінці параметрів на основі узагальнених механічних і електричних величин.

Механічні узагальнені сили визначають НДС елементів структури, електричні струми та напруги – теплову, електричну та магнітну взаємодію елементів. І ті й інші проявляються у вигляді узагальнених сил (сил, моментів сил, напружень, електричних напруг) та переміщень (деформацій), швидкостей, прискорень, струмів.

Узагальнені сили визначають напружено-деформований стан елементів структури. Використання узагальнених сил, мас, координат базується на принципах фізичних аналогій. Для мікропристроїв – це електромеханічні аналогії (рис. 2.1): «сила-напруга» і «сила-струм» [45-46].



Рисунок 2.1 – Проектування між’єднань на основї електромеханїчних аналогїї

У бїльшостї випадкїв аналітичнї методи аналізу зважаючи на складнїсть геометрїї пристроїв, рїзнї властивостї окремих мїкрообластей розглянутих

структур не представляється можливим. Методи опису та аналізу повинні в необхідній мірі враховувати специфіку використовуваних конструкцій і технологічних процесів виготовлення конкретних структур [46-48].

Аналітична механіка для опису динамічних процесів руху і деформацій використовує принципи фізичних аналогій, яка в термінах узагальнених координат, сил, мас і похідних понять одноманітно представляє залежність параметрів руху і деформацій від діючих сил різної природи, властивостей матеріалів, структури [49-50]. Методами вирішення подібних задач є метод матричного структурного аналізу [51] та метод скінченних елементів [52].

Ці методи на даний час є найбільш простими числовими методами для вирішення завдань механіки деформованого твердого тіла; вони успішно застосовується для розрахунку конструкцій практично будь-якої складності, систем, що мають складну геометричну конфігурацію та нерегулярну фізичну структуру завдяки властивій їм універсальності й алгоритмічності [53-55].

Сутність методів полягає в розбивці структури на малі (кінцеві) елементи, які взаємодіють між собою в вузлових точках, в яких визначаються фіктивні сили [56], еквівалентні поверхневим напруженням, розподіленим по межах елементів. Для кожного елемента складається рівняння руху.

Предметом дослідження у даному розділі дисертаційної роботи є деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осьових сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі.

Метою даного дослідження є визначення деформації елементів конструкції пристроїв з використанням матриці жорсткості при відомому векторі зовнішніх сил.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних завдань:

– розглянути існуючі методи опису та аналізу, які враховують специфіку використовуваних конструкцій і технологічних процесів виготовлення конкретних структур МЕМС і дослідити сутність цих методів;

– провести розрахунок переміщень і деформацій, використовуючи метод

скінченних елементів;

– використовуючи матрицю жорсткості, визначити деформації елементів конструкції пристроїв;

– провести розрахунок деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осьових сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі.

Матриця жорсткості, побудована з використанням матричного функціонального аналізу, дозволить забезпечити розрахунок деформації елементів гнучких електронних між'єднань, а також МЕМС.

2.2 Розрахунок елементів матриці жорсткості елемента структури за методом скінченних елементів

Розробка складних мікроелектронних пристроїв виконується з використанням систем автоматизованого проектування (Sugar, Coventor, Tanner Pro, MemCad), об'єднання взаємодіючих простих мікромеханічних балок, мембран, електростатичних проміжків, вузлів, кріплень до корпусу та ін., на основі аналізу напружено-деформованого стану під дією системи зовнішніх сил, розподілів температури, фізичних властивостей матеріалів і особливостей структури. Компоненти мікроелектронних пристроїв, за електромеханічними властивостями дозволяють проектувати різного рівня ієрархії датчики високої швидкодії, чутливості і конструктивно-технологічних параметрів [57-60]. Перераховані характеристики пов'язані одним загальним для електромеханічних систем рівнянням, що визначає власну резонансну частоту системи ω_0 , а отже і швидкодію:

$$\omega_0^2 = \frac{K}{M},$$

де K – жорсткість, пружність кріплення;

M – рухома маса.

З огляду на зв'язок пружності з чутливістю датчика $S = 1/K$, отримуємо умову інваріантності балкових, мембранних і мембранно-балкових структур:

$$f_0^2 MS = const.$$

Ставлячи потрібні значення однієї з трьох величин визначаємо залежність між двома іншими величинами.

У загальному випадку рівняння руху, в тому числі і деформації механічної системи, що містить основні компоненти: маси m , втрат і демпфування R , пружності (жорсткості) K , під дією зовнішніх, внутрішніх сил структури, які визначаються розподілом напружень, температури в елементах, фізичними властивостями матеріалів і особливостями конструкції, представляється у вигляді [61]:

$$[m]\{q\} + [R]\{q\} + [K]\{q\} = \{F\}, \quad (2.1)$$

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

$\{F\}$ – вектор (матриця) узагальнених сил структури.

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

Зовнішні узагальнені сили F діють на узагальнені основні фізичні елементи: маси, пружності, елементи втрат і демпфування, розподілені в малих обсягах структури ij (кінцевих елементах). Матриці мас, втрати, жорсткості

складаються з підматриць окремих кінцевих елементів структури з координатами, визначеними індексами ij : m_{ij} , k_{ij} , r_{ij} .

За матричним рівнянням (2.1) може виконуватись аналіз функціонування пристроїв в режимах постійного струму, перехідному, сталому режимі при впливі гармонійних коливань різної частоти, динамічному.

Елементом маси структури зовнішні сили надають прискорення, змінюючи їх кінематичну енергію, на елементах жорсткості під дією пружної деформації змінюється потенційна енергія, переміщення (і деформації) викликають втрати частини енергії пропорційно швидкості переміщень [61].

Розподіл діючих сил між окремими складовими частинами рівняння (2.1) залежить від характеру діючих сил, конструкції і механічних властивостей матеріалів структури, тобто матриць $[m]$, $[R]$ і $[K]$.

При розрахунках переміщень і деформацій кінцевих елементів використовуються класичні теорії пружності, опору матеріалів, матрично-структурного аналізу і різні методи: скінченних елементів, вузлового аналізу, рівняння динаміки.

Жорсткість розраховується, використовуючи теорему Кастільяно:

$$F_i = \frac{\partial S}{\partial \delta_i},$$

де F_i – узагальнена сила (тобто сила або момент);

δ_i – зміщення координат для трьох ступенів рухливості $[i = 1, 2, 3; q_i(x_i, y_i, Q_i)]$.

Залежно від характеру діючих сил розрізняють об'ємні, площинні і лінійні напружено-деформовані стани твердого тіла [45].

При об'ємному напруженому стані деформації зсуву визначаються нормальними σ і дотичними τ напруженнями, а в загальному випадку для анізотропних матеріалів – тензорами четвертого рангу напруг і деформацій.

З урахуванням просторової симетрії властивостей пружності матеріалів з кубічної кристалічної структурою число незалежних змінних зменшується до 36 [61].

При малих значеннях зсувів об'ємні деформації визначаються наступними лінійними залежностями [62]:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= s_{11}\sigma_x + s_{12}\sigma_y + s_{13}\sigma_z + s_{14}\tau_{yz} + s_{15}\tau_{yx} + s_{16}\tau_{xy} \\
 \varepsilon_y &= s_{21}\sigma_x + s_{22}\sigma_y + s_{23}\sigma_z + s_{24}\tau_{yz} + s_{25}\tau_{yx} + s_{26}\tau_{xy} \\
 \varepsilon_z &= s_{31}\sigma_x + s_{32}\sigma_y + s_{33}\sigma_z + s_{34}\tau_{yz} + s_{35}\tau_{yx} + s_{36}\tau_{xy} \\
 \gamma_{yz} &= s_{41}\sigma_x + s_{42}\sigma_y + s_{43}\sigma_z + s_{44}\tau_{yz} + s_{45}\tau_{zx} + s_{46}\tau_{xy} \\
 \gamma_{zx} &= s_{51}\sigma_x + s_{52}\sigma_y + s_{53}\sigma_z + s_{54}\tau_{yz} + s_{55}\tau_{zx} + s_{56}\tau_{xy} \\
 \gamma_{xy} &= s_{61}\sigma_x + s_{62}\sigma_y + s_{63}\sigma_z + s_{64}\tau_{yz} + s_{65}\tau_{zx} + s_{66}\tau_{xy}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

або у векторно-матричній формі:

$$\varepsilon_i = s_{ij}\sigma_{ij}, \tag{2.3}$$

$$\sigma_{ij} = k_{ij}\varepsilon_{ij}, \tag{2.4}$$

де k_{ij} – коефіцієнти пружності;

s_{ij} – коефіцієнти податливості матеріалу в напрямку дії відповідної напруги слід зазначити, що $s_{ij} \neq 1/k_{ij}$;

ε_i – відносні деформації (розтягування-стиснення) по осях x, y, z ;

γ_{ij} – кути зсуву в площинах, які визначаються нижніми індексами.

Описується деформуюча формула пружної структури під дією системи сил (і розподілу температури) трьома розподілами:

$$q_x = q_x(x, y, z); \quad q_y = q_y(x, y, z); \quad q_z = q_z(x, y, z). \tag{2.5}$$

Відносні (питомі) деформації представляються як часткові похідні розподілів q_x , q_y , q_z і за малих деформаціях залежності напруження-зміщення (деформація) будуть лінійними, а їх компоненти рівними [61]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial q_x}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\partial q_y}{\partial y}; \varepsilon_{zz} = \frac{\partial q_z}{\partial z}; \\ \varepsilon_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial q_x}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial x}; \varepsilon_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial q_z}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial z}; \varepsilon_{zx} = \gamma_{xz} = \frac{\partial q_x}{\partial z} + \frac{\partial q_z}{\partial x}; \end{aligned} \quad (2.6)$$

де ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} являють собою нормальні зміщення, що викликаються нормальними напруженнями σ ;

γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} – зміщення зсуву.

Термічні напруги, викликані тепловими впливами, можуть розраховуватися за формулою:

$$\varepsilon_{Tij} = \delta_{ij} \alpha T \quad \text{для } i, j = x, y, z, \quad (2.7)$$

де

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{для } j = i \\ 0 & \text{для } j \neq i \end{cases} \quad \text{– символ Кронекера.} \quad (2.8)$$

Деформація структури, при спільному навантаженні системою сил і температурних впливів (у вигляді розподілу температур) визначається сумарним впливом сил і температури:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} + \varepsilon_{Tij}, \quad (2.9)$$

тоді при:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})]; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})]; \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})]; \\
\gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}; \quad \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz}; \\
\gamma_{zx} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx}; \quad \gamma = \frac{2(1+\mu)}{E} = G.
\end{aligned} \tag{2.10}$$

З урахуванням температурних впливів:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T; \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \alpha T; \\
\gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}; \quad \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz}; \quad \gamma_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx}.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Важливо відзначити, що деформації γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} не залежить від температурних впливів на всю структуру.

З рівнянь (2.11) виходять такі залежності напружень:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_{xx} + \mu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})] - \frac{E\alpha T}{1-2\mu}, \\
\sigma_{yy} &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_{yy} + \mu(\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx})] - \frac{E\alpha T}{1-2\mu}, \\
\sigma_{zz} &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_{zz} + \mu(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})] - \frac{E\alpha T}{1-2\mu}.
\end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \varepsilon_{xy}, \\
\tau_{yx} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \varepsilon_{yz}, \\
\tau_{zx} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \varepsilon_{zx}.
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Рівняння (2.10) і (2.11) можуть бути записані в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} + \alpha T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} - \frac{E\alpha T}{1-2\mu} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Всі попередні рівняння напружено-деформованого стану були виражені через модуль пружності Юнга E і коефіцієнт Пуассона μ . Модуль зсуву

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

Ввівши позначення векторів-стовпців напруг і деформацій у вигляді:

$$\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}, \quad (2.16)$$

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}, \quad (2.17)$$

$$\chi_T = \frac{E}{1-2\mu} \{-1, -1, -1, 0, 0, 0\} = \chi_\tau^T, \quad (2.18)$$

$$\chi = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1-\mu & \mu & \mu & & & \\ \mu & 1-\mu & \mu & & & \\ \mu & \mu & 1-\mu & & & \\ \hline & & & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ & & & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ & 0 & & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{array} \right], \quad (2.19)$$

в матричному записі маємо:

$$\sigma = \chi \varepsilon + \alpha T \chi_T. \quad (2.20)$$

Помноживши (2.20) на χ^{-1} , отримаємо матричне подання напружено-деформованого стану:

$$\varepsilon = \chi^{-1} \sigma - \alpha T \chi^{-1} \chi_T = \Phi \sigma + \varepsilon_T, \quad (2.21)$$

де

$$\Phi = \chi^{-1} = \frac{1}{E} \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & \mu & -\mu & & & \\ -\mu & 1 & -\mu & & & \\ -\mu & -\mu & 1 & & & \\ \hline & & & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ & & & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ & & & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{array} \right]. \quad (2.22)$$

та

$$\varepsilon_T = -\alpha T \chi^{-1} \chi_T = \alpha T \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}. \quad (2.23)$$

Матричне рівняння (2.1) дозволяє проводити аналіз функціонування пристроїв в режимах постійного струму (direct current), встановленої стану

(steady state), перехідного процесу (transient), динамічного (dynamic mode).

Для цього необхідно описати властивості пристрою завданням матриць k_{ij} , m_{ij} , r_{ij} кінцевих елементів системи, з урахуванням досліджуваного режиму.

Для аналізу структури на постійному струмі рівняння (2.1) спрощується до рівняння рівноваги:

$$[K]\{q\} = \{F\}, \quad (2.24)$$

тому що похідні координат дорівнюють нулю.

Рівновага визначається рівністю внутрішніх сил напружено-деформованого стану матеріалу структури, викликаного дією зовнішніх сил, і залежить від механічних властивостей матеріалу: модуля пружності Юнга E , коефіцієнта Пуассона μ , коефіцієнта теплового розширення α . Ці параметри формують для кожної структури індивідуальну матрицю жорсткості $[K]$. Жорсткість – це чисельний показник сили протидії матеріалу елемента структури при його деформації зовнішніми силами, розрахована на одиницю довжини елемента [31].

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

Фізичний сенс елементів матриці жорсткості $[K]$ для найбільш загального – тривимірного НДС наступний:

– K_{ij} – визначає силу, яку необхідно прикласти в напрямку j для отримання одиничного зсуву в напрямку i ;

– для значень $i = j = 1, 2, 3$ елемент деформації є стисненням-розтягуванням під дією нормальних напружень та є рівними $K_{ij} = \frac{EA}{l}$, де A – площа поперечного перерізу балки, l – її довжина.

Вид матриці жорсткості залежить від сукупності безлічі діючих на структуру сил.

Для опису НДС при об'ємному напруженому стані, матриця мала розмірність 6×6 в кожному вузлі сітки структури, тобто вектор-стовпець напруг був:

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

Для плоского напруженого стану розрізняють два варіанти навантажень:

– стиснення тонких пластин: $\sigma_{zz}, \sigma_{zx}, \sigma_{zy} = 0$, модуль пружності тонких пластин $\frac{E}{1-\mu^2}$ [61], вектор деформацій являє: $\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}$;

– розтягування подовжених тіл з постійним поперечним перерізом: $\varepsilon_{zz} = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$, $\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}$.

Випадок стиснення тонкої пластини, передбачає, що вісь Z перпендикулярна площині пластини. $\sigma_{zz} = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$, тобто вектори напружень и деформацій мають вигляд:

$$\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}\}; \quad (2.25)$$

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}. \quad (2.26)$$

Закон Гука для плоского напружено-деформованого стану представляється у вигляді матриці 3×3 .

Вектор-стовпець напруг, згідно закону Гука:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} - \frac{E\alpha T}{1-\mu} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.27)$$

який у матричному вигляді може бути представлений:

$$\sigma = \chi \varepsilon + \alpha T \chi_T, \quad (2.28)$$

де

$$\chi_T = \frac{E}{1-\mu} \{-1, -1, 0\}, \quad (2.29)$$

$$\chi = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Для визначення деформацій отримуємо:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + \alpha T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Крім того, виникає ненульова компонента:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\mu}{E}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \alpha T = -\frac{\mu}{1-\mu}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha T. \quad (2.32)$$

При деформації подовженого кінцевого елемента постійного перетину з рівномірним навантаженням впродовж осі. Слід підкреслити, що вісь Z змінила напрям у порівнянні з випадком стиснення тонкої пластини. Як і в попередньому випадку:

$$\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}\}, \quad (2.33)$$

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}, \quad (2.34)$$

$$\sigma = \chi\varepsilon + \alpha T \chi_T. \quad (2.35)$$

Вона не включається у вектор деформацій, тому що є лінійною комбінацією ε_{xx} і ε_{yy} .

2.3 Розрахунок компонентів матриці жорсткості

Розглянемо приклад розрахунку деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осьових сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі (рис. 2.2). Позначення компонентів жорсткості відповідає номерам сил на рис. 2.2.

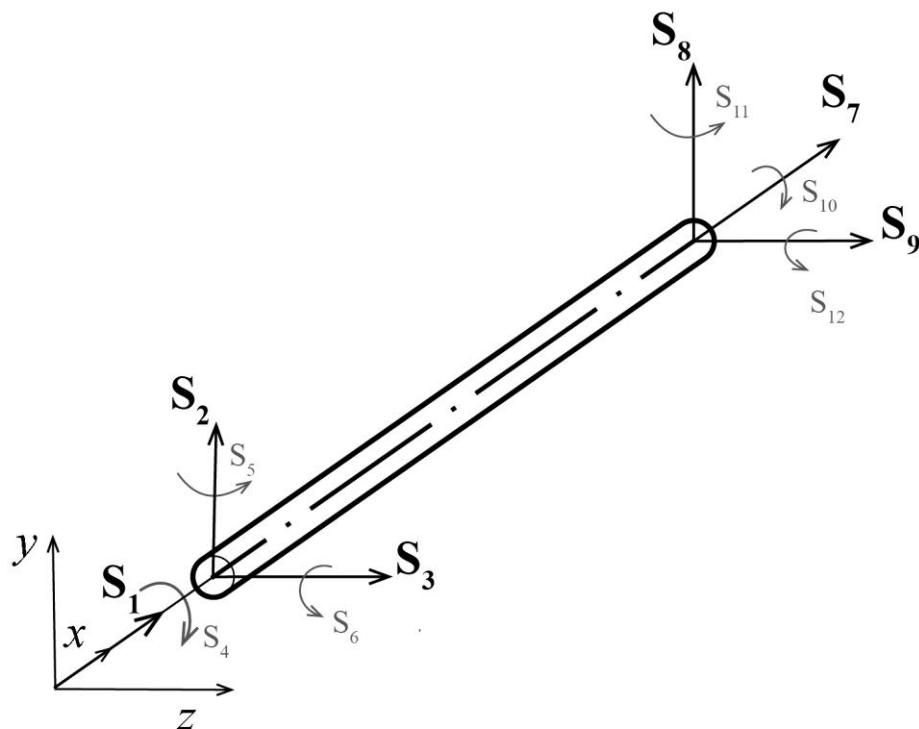


Рисунок 2.2 – Деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осьових сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі

Диференціальне рівняння для осьових зсувів u :

$$S_1 = -\left(\frac{du}{dx} - \alpha T_m\right)EA,$$

$$T_m = \frac{1}{A} \int T dA,$$

$$S_1 x = -uEA + \alpha T_m EA + C_1 \begin{cases} \text{перетину для} \\ x=0 & u = u_1 \\ x=l & u = 0 \end{cases} \quad C_1 = -S_1 l - \alpha T_m EA l.$$

маємо:

$$S_1 = \frac{EA}{l} u_1 + EA \alpha T_m,$$

$$S_1 = -S_z.$$

Алгебраїчна залежність сила-зміщення виражається залежністю $S = ku + Q$ і може використовуватися для визначення коефіцієнтів k_{ij} і термічних сил Q . Так k_{ij} , представляє силу S_i , необхідну для отримання одиничного переміщення u_j , коли всі інші сили (включаючи вплив температури) дорівнюють нулю.

$$K_{11} = \left(\frac{S_1}{U_1}\right)_{T=0} = \frac{EA}{l} \quad \text{та} \quad K_{71} = \left(\frac{S_7}{U_1}\right)_{T=0} = \frac{-EA}{l}.$$

Всі інші коефіцієнти в першій колонці K дорівнюють нулю.

Аналогічно, вважаючи $u_1 = 0$, а $u_7 \neq 0$ (рис. 2.3, б) можна отримати (або виходячи з симетрії, або рішенням для u можна отримати $K_{77} = \frac{EA}{l}$).

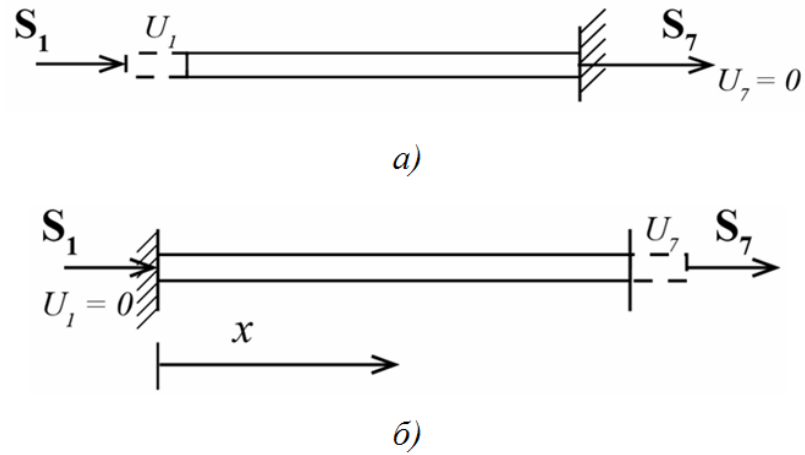


Рисунок 2.3 – Осьові зсуви

Оскільки температурні впливи на всю балку не викликають зміни її форми (2.11), то K_{ij} при крученні та температурних змінах залишаються незмінними.

Диференціальне рівняння для крутного моменту балки має вигляд:

$$S_4 = -GI \frac{d\theta}{dx}, \quad (2.36)$$

де GI – торсіонна жорсткість поперечного перерізу балки.

$$S_4 X = -GI\theta + C_1. \quad (2.37)$$

Використовуючи граничні умови $\theta = 0$ при $x = l$, отримуємо:

$$C_1 = S_4 l. \quad (2.38)$$

Оскільки $\theta = u_4$ при $x = 0$:

$$S_4 = \frac{GI}{l}. \quad (2.39)$$

Використовуючи умову рівноваги для обертальних моментів (рис. 2.4), маємо:

$$S_{10} = -S_4. \quad (2.40)$$

отже,

$$K_{4,4} = \left(\frac{S_4}{u_4} \right)_{T=0} = \frac{GI}{l}; \quad K_{10,4} = \left(\frac{S_{10}}{u_4} \right)_{T=0} = \frac{-GI}{l}. \quad (2.41)$$

Всі інші коефіцієнти в четвертій колонці рівні 0. Сили $Q_4 = Q_{10} = 0$.

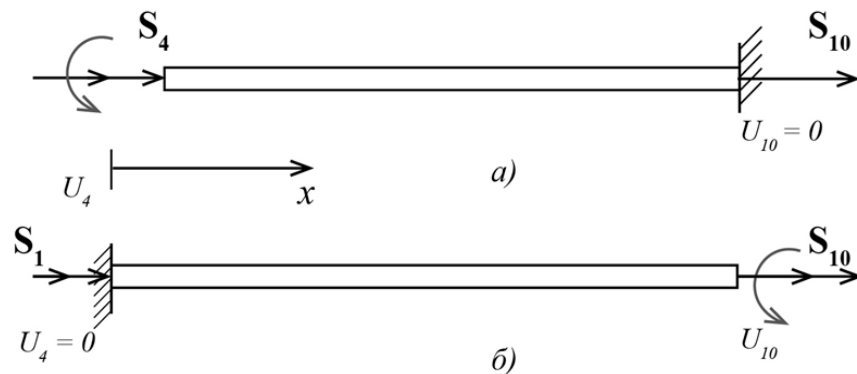


Рисунок 2.4 – Обертальні моменти

За рис. 2.4 виходить: $K_{10,10} = \frac{GI}{l}$.

Згинальні сили (рис. 2.5) (S_2 і S_8), пов'язані з моментами:

$$v = v_b + v_s, \quad (2.42)$$

де v_b – бічне відхилення, викликане згинальною силою;

v_s – додаткове відхилення, викликане зсувними напруженнями, так що

$$\frac{dv_s}{dx} = \frac{-S_2}{GA_s}, \quad (2.43)$$

де A_s – ефективна площа поперечного перерізу балки, що не піддається вигину (визначається диференціальним рівнянням Voley and Weiner):

$$EI_z \frac{d^2 v_b}{dx^2} = S_2 x - S_6 - M_{Tz}, \quad (2.44)$$

де

$$M_{Tz} = \int_A \alpha E T y dA. \quad (2.45)$$

Інтегруючи (2.44) і (2.45), отримуємо:

$$EI_z v = \frac{S_2 x^3}{6} - \frac{S_6 x^2}{2} - \frac{M_{Tz} x^2}{2} + \left(C_1 - \frac{S_2 EI_z}{GA_s} \right) x + C_2. \quad (2.46)$$

де $M_{Tz} = \int_A \alpha E T y dA$.

Використовуючи граничні умови:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{dv_s}{dx} = \frac{S_2}{GA_s} \quad \text{при } x=0, x=l, \quad (2.47)$$

$v=0$ при $x=l$ (2.48):

$$EI_z v = \frac{S_2 x^3}{6} - \frac{S_6 x^2}{2} - \frac{M_{Tz} x^2}{2} - \frac{S_2 \Phi x l}{12} + (1 + \Phi) \frac{l^3 S_2}{12}, \quad (2.48)$$

де

$$S_6 = \frac{S_2 l}{2} M_{Tz}, \quad (2.49)$$

та

$$\Phi = \frac{12 EI_z}{GA_s l^2}. \quad (2.50)$$

З умови рівноваги сил і моментів (рис. 2.11):

$$S_8 = -S_2,$$

$$S_{12} = -S_2 + S_2 l$$

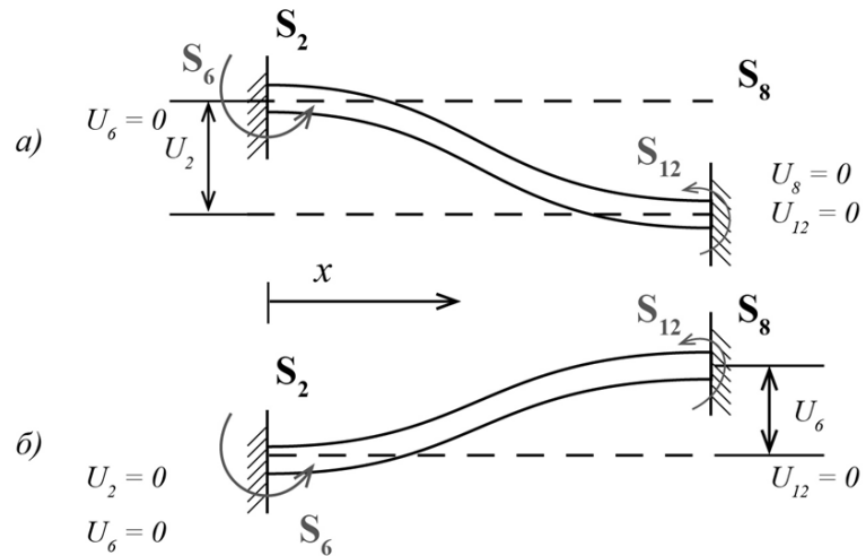


Рисунок 2.5 – Згин пластини

при

$$x = 0, v = u_4, \quad (2.51)$$

$$u_2 = (1 + \Phi) \frac{l_3 S_2}{12EI_z}.$$

Використовуючи рівняння (2.49-2.51) отримуємо:

$$K_{2,2} = \left(\frac{S_2}{u_2} \right)_{T=0} = \frac{12EI_z}{(1 + \Phi)l^3}, \quad (2.52)$$

$$K_{6,2} = \left(\frac{S_6}{u_2} \right)_{T=0} = \left(\frac{S_2 l}{2u_2} \right)_{T=0} = \frac{6EI_z}{(1 + \Phi)l^2}. \quad (2.53)$$

При деформації вигину жорсткість дорівнює добутку EI_y , де I_y – осьовий момент інерції перерізу відносно осі y . Для елементів з прямокутним

поперечним перерізом $I_y = \frac{bh^3}{12}$, b – ширина, h – товщина елемента.

Узагальнені сили, що викликають вигин, вносять внесок у вигляді відповідного компонента розтягування-стиснення [45-46].

Розраховується вигин від дії і сил і моментів (рис. 2.6).

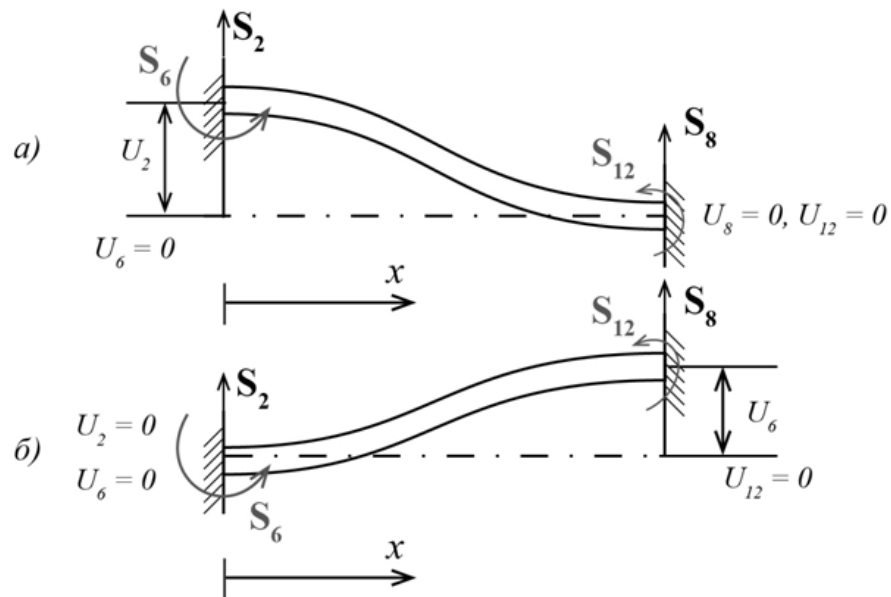


Рисунок 2.6 – Вигин пластини

$$K_{8,2} = \left(\frac{S_8}{u_2} \right)_{T=0} = \frac{12EI_z}{(1+\Phi)l^3}, \quad (2.54)$$

$$K_{12,2} = \left(\frac{S_{12}}{u_2} \right)_{T=0} = \left(\frac{-S_6 + S_2 l}{u_2} \right)_{T=0} = \frac{6EI_z}{(1+\Phi)l^2}. \quad (2.55)$$

За аналогією (або за принципом умовної симетрії), виходить:

$$K_{8,8} = K_{2,2} = \frac{12EI_z}{(1+\Phi)l^3}, \quad (2.56)$$

$$K_{12,8} = K_{6,2} = \frac{6EI_z}{(1+\Phi)l^2}. \quad (2.57)$$

2.4 Висновки до розділу 2

Таким чином, для компонентів електричних між'єднань, в умовах мікромініатюризації, найбільш важливим є статичний аналіз, який характеризує стан рівноваги, умовою якої є рівність нулю суми сил та суми моментів сили, що діють на пристрій (механічні, електричні, теплові).

Використовуючи матрицю жорсткості, при відомому векторі зовнішніх сил, визначаються деформації елементів конструкції пристроїв.

Вид і розмірність матриці жорсткості кінцевих елементів визначається напруженим станом. Для об'ємного напруженого стану її розмірності 6×6 . Для плоского напруженого стану 3×3 .

Часткові коефіцієнти K_{ij} матриці жорсткості пропорційні відповідним коефіцієнтам χ_{ij} , а коефіцієнти пропорційності визначається видом деформації. Для деформації розтягування-стиснення жорсткість дорівнює EA/l , а для деформації зсуву GI_y/l .

Важливо відзначити, що деформації γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} не залежить від температурних впливів на всю конструкцію.

Визначення компонентів жорсткості при згинанні найбільш складне та вимагає аналізу різних варіантів дії сил: тільки згинаючих сил, тільки моментів сил, сумісної дії сил, різних напрямків сил та моментів відносно осей координат, граничних умов. При формуванні загальної матриці жорсткості структури коефіцієнти суміжного поелементного в вузлі змінюють знак на протилежний.

Перспективи дослідження – для динамічного аналізу необхідний розрахунок всіх трьох матриць (мас, втрат і жорсткості) механічної структури. Здійснення трьох видів аналізу: на постійному струмі, в установленому режимі і при перехідних процесах, можливо в лінійних режимах (для малих відхилень) і нелінійних для великих відхилень від стану положення рівноваги.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах автора [9-12] (Додаток Г).

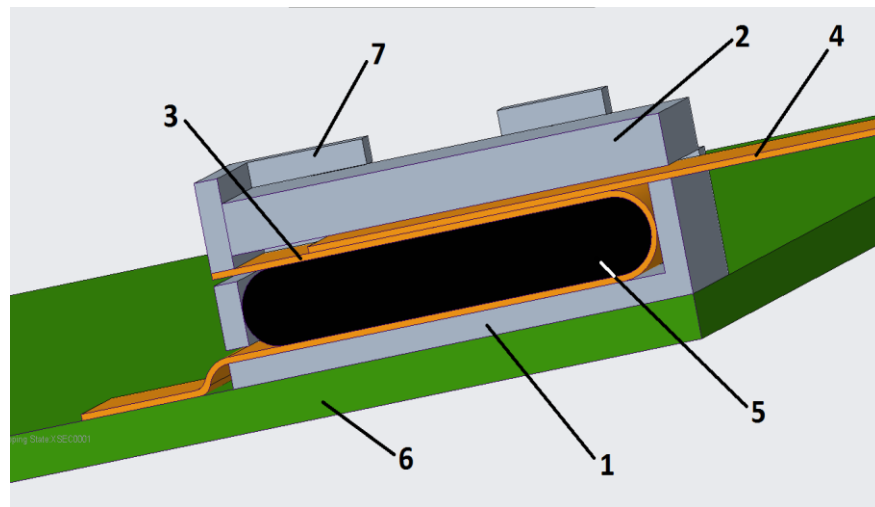
Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [7, 30-62].

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЬ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛАСКОГО З'ЄДНУВАЧА З НУЛЬОВОЮ СИЛОЮ ВСТАВКИ ДЛЯ МОДУЛІВ ET НА ПЕРЕХІДНИЙ ОПІР У ЗОНІ КОНТАКТУВАННЯ

3.1 Аналіз конструктивних параметрів плоского з'єднувача з нульовою силою вставки на основі ГС для модулів ET

Запатентований у ході проведення дисертаційних досліджень плоский з'єднувач складається з корпусу [27-28], 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 (рис. 3.1).



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

Рисунок 3.1 – Конструктивні особливості з'єднувача (у перерізі)

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 [63],

причому зовнішній вивід лінійки контактів жорстко з'єднаний із зовнішньою платою (рис. 3.2) [27].

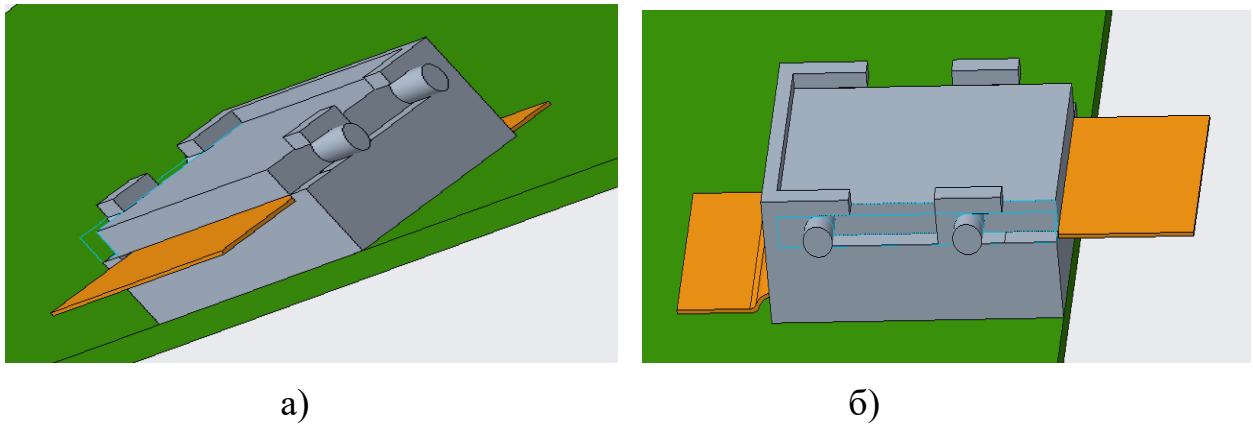


Рисунок 3.2 – Конструктивні особливості з'єднувача:

а – вид збоку; б – вид згори

Як вже відзначалось, розроблена конструкція плоского з'єднувача [27-28] з пневматичним притисненням контактних елементів, відрізняється від аналогів меншою вірогідністю виникнення дефектів, підвищеною щільністю розташування контактів та кількістю виводів. Однією з переваг запропонованої конструкції у порівнянні зі стандартними роз'ємами можливість зменшення кроку провідників підключаючого шлейфу до 50 мкм і як наслідок збільшення кількості контактів роз'єму при тих же розмірах, враховуючи що кроки провідників для стандартних ZIF-роз'ємів становить 200 мкм і перехідний опір становить 20 ... 50 мОм, для деяких допускається підвищення даного значення до 100 мОм [27].

Також необхідно врахувати, що з'єднання повинно забезпечувати високу надійність при жорстких механічних і кліматичних діях, тому одним з найважливіших параметрів з'єднувачів є перехідний опір між шлейфом і контактними елементами з'єднувача. Електричний з'єднувач повинен витримувати жорсткіші зовнішні кліматичні і механічні дії, ніж апаратура, в яку з'єднувач встановлюється. Запас по зовнішніх діях забезпечить його надійну роботу в процесі експлуатації. Чим більше контактів з'єднувача, тим

менше параметри надійності, що доводяться на один контакт [8].

В процесі роботи перехідний опір контактів не залишається постійним. Під впливом кисню, інших агресивних газів, підвищеної температури інтенсивність утворення плівки зростає.

Попередній огляд та аналіз всіх властивостей можливих матеріалів металевих і полімерних шарів фольгованих діелектриків, а також особливостей напівпровідникових компонентів електричних між'єднань дозволяє виділити в якості найбільш прийнятних при виготовленні між'єднань безадгезивний діелектрик типу алюміній-поліімід з повним ступенем імідизації. Це лакофольгові діелектрики типу ФДІ-А-50, що виготовляються ТОВ НВП «Поліком».

Його використання дозволяє:

- забезпечити високу надійність зварних з'єднань за рахунок утворення монометалічного з'єднання $Al-Al$, що не потребує створення додаткових виступів на кристалі;

- забезпечити широку номенклатуру товщин, як провідникового шару алюмінію (14, 20, 25 і 30 мкм), так і поліімідної основи, чим суттєво розширює можливості розробників при проектуванні виробів з даних матеріалів;

- забезпечити можливість складання компонентів, як ультразвуковим зварюванням, так і, при необхідності, пайкою після додаткової обробки алюмінієвих виводів за відомим способом або електрохімічної обробкою;

- підвищити щільність монтажу за рахунок зменшення ширини виводів виробів до 30-40 мкм і їхнього кроку до 50-80 мкм [64];

- забезпечити можливість роботи елементів комутації в умовах теплових і радіаційних навантажень [64].

Шлейф-контактор з'єднувача виготовлено з діелектрику лакофольгового марки ФДІ-А-50 (товщина алюмінію 30 мкм, товщина полііміду 20 мкм). Алюміній порівняно з міддю має значно меншу провідність і механічну міцність, утворює погано провідну тверду окисну плівку, тому кінці алюмінієвих провідників покриті шаром нікелю для зменшення перехідного

опору при контакті.

В ході виконання роботи були розроблена топологія шлейфу-контактора з'єднувача (рис. 3.3). Ширина провідників якого становить 200 мкм і мінімальна відстань між провідниками – 150 мкм. Загальна кількість провідників 32.



Рисунок 3.3 – Топологія шлейфу-контактора з'єднувача

В якості ущільнювача використана вакуумна гума поєднана зі шлейфом-контактором з'єднувача за допомогою поліімідного клею.

Приєднувальний шлейф та його топологія представлена на рис. 3.4. Мінімальна ширина провідників 100 мкм і 200 мкм в зоні контакту, мінімальна відстань між провідниками 100 мкм.

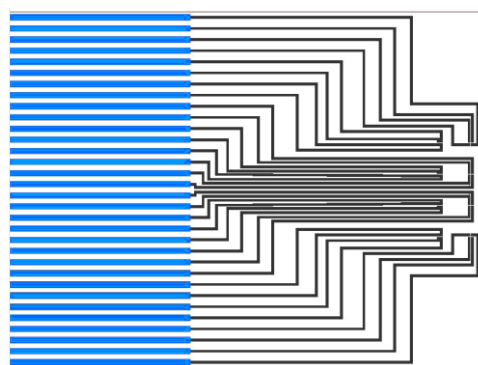
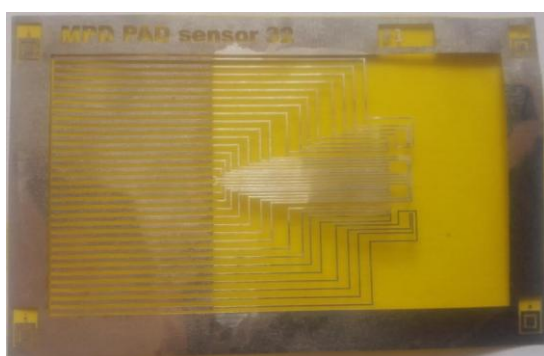


Рисунок 3.4 – Топологія приєднувального шлейфу

Таким чином, для подальшої роботи необхідно провести експеримент для побудови моделі впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача на перехідний опір у зоні контактування.

3.2 Планування експерименту для побудови моделі впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача на перехідний опір у зоні контактування

Передбачається, що на перехідний опір [65] у зоні контактування ГКС зі з'єднувачем, тобто вихідну функцію відгуку, впливає багато параметрів, які далі будемо називати факторами [66-68]. Для визначення виду залежності та подальшої оптимізації перехідного опору необхідно провести експериментальні дослідження [69-70].

Експеримент проводився на кафедрі КІТАМ ХНУРЕ, де проводились дослідження у рамках виконання дисертаційної роботи з використанням вимірника імітансних параметрів E7-15.

Основна вимога до чинників – їхня керованість. Під керованістю розуміють встановлення потрібного значення фактора та підтримання його протягом всього дослідження. Крім вимоги до керованості обраних факторів, є ще кілька вимог:

- для будь-якої пари чинників має виконуватися умова сумісності;
- фактори мають бути незалежними та однозначними;
- фактори мають безпосередньо впливати на параметр оптимізації;
- фактори мають бути визначені операційно;
- точність встановлення граничних значень факторів має бути максимально високою.

Найбільш значущими вхідними факторами в експерименті, які відповідають всім вимогам факторного експерименту, приймемо висоту зубців притискної пластини h , їх кількість a і жорсткість за Шором еластичної пластини – D .

Відгук на вплив вхідних факторів має бути ефективним з точки зору досягнення мети оптимізації, універсальним, кількісним, що виражається числом, яке має фізичний сенс, бути простим і легко обчислюватися.

Як відгук на вхідні впливи b в експерименті виберемо перехідний опір R_n .

Ефективна постановка дослідів експерименту досягається його плануванням. При цьому забезпечується досягнення максимальної точності вимірювань за мінімальної кількості проведених дослідів і збереження статистичної достовірності результатів [71-72]. Для того, щоб випадкова погрішність не перевищувала систематичну, необхідно також визначити необхідне число дослідів [73].

Плануванню експериментів передують етапи рішень про вибір області експериментування. Дана область факторного простору і становить інтерес для подальшої оптимізації.

Плануванню експерименту також передують етапи визначення центру експерименту й інтервалів варіювання факторів. При цьому оцінюються межі областей визначення факторів, що задаються технічними обмеженнями.

Побудова найбільш простих планів зводиться до вибору експериментальних точок, симетричних щодо центру експерименту. У цьому випадку всі k факторів змінюються на двох рівнях, і план експерименту носить назву плану типу $2k$. Рівні факторів зображуються двома точками на кожній з k координатних осей факторного k -мірного простору [74]. Ці рівні є симетричними відносно основного рівня. Один з них – верхній, інший – нижній. Інтервалом варіювання факторів називається деяке число (своє для кожного фактора), додавання якого до основного рівня дає верхній рівень, а віднімання – нижній.

Щоб спростити й уніфікувати запис умов дослідів і полегшити обробку експериментальних даних, масштаби по осях задаються у вигляді кодованих значень $+1$ і -1 . Для кількісних факторів це можна зробити за допомогою перетворення:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{J_j}, \quad (3.1)$$

де x_j – кодоване значення фактора;
 \tilde{x}_j – натуральне значення фактора;
 \tilde{x}_{j0} – натуральне значення осинового рівня;
 J_j – інтервал варіювання.

Межі змін і позначення факторів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Межі змін і позначення факторів

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

Базова функція залежності перехідного опору [75] від параметрів з'єднувача буде мати вигляд:

$$Y = f(h, a, D), \quad (3.2)$$

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

План другого порядку дозволяє провести експеримент для відшукування рівняння регресії, що містить і другий ступінь факторів. У цьому випадку потрібно, щоб кожен фактор варіювався не менше ніж на трьох рівнях. У такому разі повний факторний експеримент (ПФЕ) містить занадто велику кількість дослідів, що дорівнює $3k$. Так, якщо $k = 3$, їх 27, а число коефіцієнтів $b = 10$.

Для досягнення оптимізації застосовують ортогонально центральню-

композиційний метод. В основі цього методу лежить факторне планування типу ПФЕ $2k$, матриця якого доповнюється так званими «зоряними плечима» (α).

Метод дозволяє отримати регресійну модель у вигляді:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_2^2 + b_{13}x_3^2, \quad (3.3)$$

де b_i – коефіцієнт регресії;

x_i – значення фактора.

Зоряні плечі, тобто відстань між центральною та зоряної точками плану [75-76] другого порядку визначається по таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення зоряного плеча за різної кількості факторів

$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
1,0000	1,2154	1,4145	1,5462

Знаходимо значення факторів, відповідні «зоряним плечам», за формулами:

$$\Phi_i(1,2154) = \Phi_i^1 \cdot 1,2154, \quad (3.4)$$

$$\Phi_i(1,2154) = \Phi_i^{-1} - [\Phi_i^{-1} \cdot (-1,2154)], \quad (3.5)$$

де $\Phi_i(1,2154)$ – більше зоряне плече;

Φ_i^1 – значення i -го фактора, відповідне індексу «1» (більшій межі зміни фактора);

$\Phi_i(-1,2154)$ – менше зоряне плече;

Φ_i^{-1} – значення i -го фактора, відповідне до індексу «-1» (меншій межі зміни фактора).

Дані для проведення багатфакторного експерименту та результати

експериментів занесені в матрицю ортогонального центрально-композиційного плану другого порядку.

Експеримент проводився відповідно до значень факторів, зазначених у матриці планування.

3.3 Отримання моделі системи впливу конструкційних параметрів з'єднувача на перехідний опір і перевірка її адекватності

Оскільки істинний вигляд базової функції (3.2) невідомий, то для опису поверхні відгуку будемо використовувати рівняння, що являє собою розкладання цієї функції у статистичний ряд:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{ij=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (3.4)$$

де x_i, x_j – змінні фактори за $i = 1 \dots n$, $j = 1 \dots n, i \neq j$;

b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти регресії за відповідних змінних, значення яких визначають форму поверхні відгуку.

Рівняння (3.4) називають рівнянням регресії. У цьому рівнянні члени другого ступеня – добуток $x_i \cdot x_j$ і квадратні члени $x_i^2 \cdot x_j^2$ характеризують кривизну поверхні відгуку.

Виходячи із властивостей симетричності рівняння (3.5), нормування (3.6) та ортогональності (3.7) матриці планування, коефіцієнти рівняння регресії (3.4) визначаються за формулою (3.8):

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 0, \quad (3.5)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 = 0, \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot x_{iu} = 0, \quad (3.7)$$

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}, \quad (3.8)$$

де b_i – коефіцієнти регресії;

N – кількість проведених дослідів;

y_i – значення функції Y , що відповідає N ;

x_i – значення фактора, що відповідає N .

Розраховані числові значення коефіцієнтів регресії занесені до табл. 3.3.

Перевірка статистичної значущості параметрів регресійного рівняння (коефіцієнтів регресії) виконується за t -критерієм Стьюдента, який розраховується за формулою:

$$t_{bi} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S_{bi}^2}}, \quad (3.9)$$

де b_i – коефіцієнти регресії;

S_{bi}^2 – дисперсія коефіцієнтів рівняння регресії.

Крім основних факторів, що впливають на об'єкт дослідження, діють і випадкові чинники.

З метою обліку випадкових похибок визначається дисперсія відтворюваності дослідів $S_{відтв}^2$, яка оцінена шляхом постановки паралельних (дублюючих) дослідів в однакових умовах 3 рази.

Дисперсія відтворюваності (відгуку) визначається за формулою:

$$S_{\text{відтв}}^2 = \frac{\sum_{q=1}^n (y_{iq} - \bar{y}_i)^2}{n-1}, \quad (3.10)$$

де \bar{y}_i – середнє арифметичне значень шорсткості паралельних дослідів;

y_{iq} – значення шорсткості паралельних дослідів;

$n-1$ – число ступенів свободи.

Розрахунок дисперсії відтворюваності результатів експериментальних досліджень:

$$\bar{y}_i = \frac{24 + 23 + 25}{3} = 24 \text{ (мОм)},$$

$$S_{\text{відтв}}^2 = \frac{(24 - 24)^2 + (24 - 23)^2 + (24 - 25)^2}{2} = 1 \text{ (мОм)}.$$

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії розраховуємо за формулою:

$$S_{bi}^2 = \frac{S_{\text{відтв}}^2}{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}, \quad (3.11)$$

де x_i – значення фактора.

Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії результатів експериментальних досліджень:

$$S_{b1}^2 = \frac{329,33}{10,954} = 30,064, \quad S_{b2}^2 = \frac{329,33}{10,954} = 30,064,$$

$$S_{b3}^2 = \frac{329,33}{10,954} = 30,064, \quad S_{b12}^2 = \frac{329,33}{8} = 41,167,$$

$$S_{b13}^2 = \frac{329,33}{8} = 41,167, \quad S_{b23}^2 = \frac{329,33}{8} = 41,167,$$

$$S_{b_{123}}^2 = \frac{329,33}{8} = 41,167, \quad S_{b_{11}}^2 = \frac{329,33}{4,364} = 75,461,$$

$$S_{b_{22}}^2 = \frac{329,33}{4,364} = 75,461, \quad S_{b_{33}}^2 = \frac{329,33}{4,364} = 75,461.$$

Розраховані числові значення дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії занесені в таблицю 3.3.

За формулою (3.9) перевіряємо статистичну значущість параметрів регресійного рівняння:

$$t_{b_0} = \frac{|29,37|}{\sqrt{329,698}} = 1,617, \quad t_{b_1} = \frac{|-4,916|}{\sqrt{30,064}} = 0,897,$$

$$t_{b_2} = \frac{|-2,735|}{\sqrt{30,064}} = 0,499, \quad t_{b_{22}} = \frac{|-0,863|}{\sqrt{75,461}} = 0,099,$$

$$t_{b_3} = \frac{|-5,073|}{\sqrt{30,064}} = 0,925, \quad t_{b_{12}} = \frac{|1,333|}{\sqrt{41,167}} = 0,177,$$

$$t_{b_{13}} = \frac{|0,733|}{\sqrt{41,167}} = 0,114, \quad t_{b_{23}} = \frac{|1,000|}{\sqrt{41,167}} = 0,156,$$

$$t_{b_{123}} = \frac{|1,533|}{\sqrt{41,167}} = 0,239, \quad t_{b_{11}} = \frac{|-1,060|}{\sqrt{75,461}} = 0,122,$$

$$t_{b_{33}} = \frac{|3,175|}{\sqrt{75,461}} = 0,365.$$

Зводимо всі розраховані значення в підсумкову таблицю 3.3.

Якщо отриманий коефіцієнт значущості t_{b_i} є більшим за табличний, то відповідний коефіцієнт – значимий, в іншому випадку – не значимий.

Таблиця 3.3 – Результати перевірки коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента

Коефіцієнти регресії	Перевірка коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента				
	Числове значення	S_{bi}^2	t_{bi}	Табличне значення коефіцієнта Стьюдента	Перевірка значущості
1	2	3	4	5	6
b_0	29,73	329,698	1,617	0,816	Значущий
b_1	-4,916	30,064	0,897	0,816	Значущий
b_2	-2,735	30,064	0,499	0,816	Незначущий
b_3	-5,073	30,064	0,925	0,816	Значущий
b_{12}	1,133	41,167	0,177	0,816	Незначущий
b_{13}	0,733	41,167	0,114	0,816	Незначущий
b_{23}	1,000	41,167	0,156	0,816	Незначущий
b_{123}	1,533	41,167	0,239	0,816	Незначущий
b_{11}	-1,060	75,461	0,122	0,816	Незначущий
b_{22}	-0,863	75,461	0,099	0,816	Незначущий
b_{33}	3,175	75,461	0,365	0,816	Незначущий

Рівняння регресії у кодованому вигляді приймає такий вигляд:

$$y = 29,73 - 4,916 \cdot x_1 - 5,073 \cdot x_3 \quad (3.12)$$

Для перевірки адекватності моделі виконаємо її оцінку за критерієм Фішера.

Знайдемо кодовані розрахункові значення Y згідно з отриманим рівнянням регресії (3.12). Результати кодованих розрахункових і експериментальних значень відгуку функції заносимо до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Розрахункові та експериментальні значення відгуку функції

№ досліду	\bar{y}_u	\hat{y}_u
1	24,00	17,78
2	23,00	79,00
3	12,00	21,25
4	31,00	31,08
5	25,00	25,92
6	41,00	35,75
7	32,00	52,00
8	45,00	43,22
9	15,00	24,39
10	37,00	52,06
11	13,00	25,76
12	41,00	32,41
13	38,00	24,20
14	57,00	36,53
15	12,00	51,00

Розсіювання результатів експерименту рівняння, що апроксимує шукану функціональну залежність, можна охарактеризувати за допомогою дисперсії адекватності, оцінка якої знаходиться за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{n-1}, \quad (3.13)$$

де \bar{y}_u – середнє експериментальне значення відгуку;

\hat{y}_u – експериментальне значення відгуку;

n – число дослідів;

l – кількість коефіцієнтів b_i .

Знайдемо дисперсію адекватності S_{ad}^2 за формулою (3.13):

$$S_{ad}^2 = 1274,786 \text{ мкм},$$

Адекватність рівняння перевіряємо за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{відтв}^2}, \quad (3.14)$$

де $S_{відтв}^2$ – дисперсія відтворюваності;

S_{ad}^2 – дисперсія адекватності.

Рівняння є адекватним, якщо складене таким чином F -відношення є меншим за теоретичне:

$$F < F_{\alpha; k_1; k_2},$$

де $k_1 = n - l$ – число ступенів свободи дисперсії адекватності;

k_2 – число ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

Визначаємо критерій Фішера F за формулою (3.14):

$$F = \frac{1274,786}{329,33} = 3,87.$$

Розрахункове значення критерію Фішера склало: $F_{розр} = 3,87$. Значить, отримане рівняння регресії адекватно описує процес у межах досліджуваної області, оскільки табличне значення $F_{табл} = 19,04$.

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

Для розкодування рівняння замінимо x_i на натуральні значення:

$$x_1 = \frac{h-1,0}{1} = h-1,0, \quad x_2 = \frac{a-4}{4} = 0,25 \cdot a - 1, \quad x_3 = \frac{D-100}{90} = 0,0111 \cdot t - 1,1111.$$

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

Після виконання перетворень і скорочень, отримаємо:

$$y(h, D) = 19,183 + 4,94h - 0,5631D. \quad (3.15)$$

Функція $R(a, h, D)$ має один мінімум в заданій області працездатності з'єднувача, її називають однокстремальною (унімодальною). У даному випадку завдання параметричної оптимізації відноситься до завдань лінійного програмування. Результати експерименту наведено на рисунку 3.5.

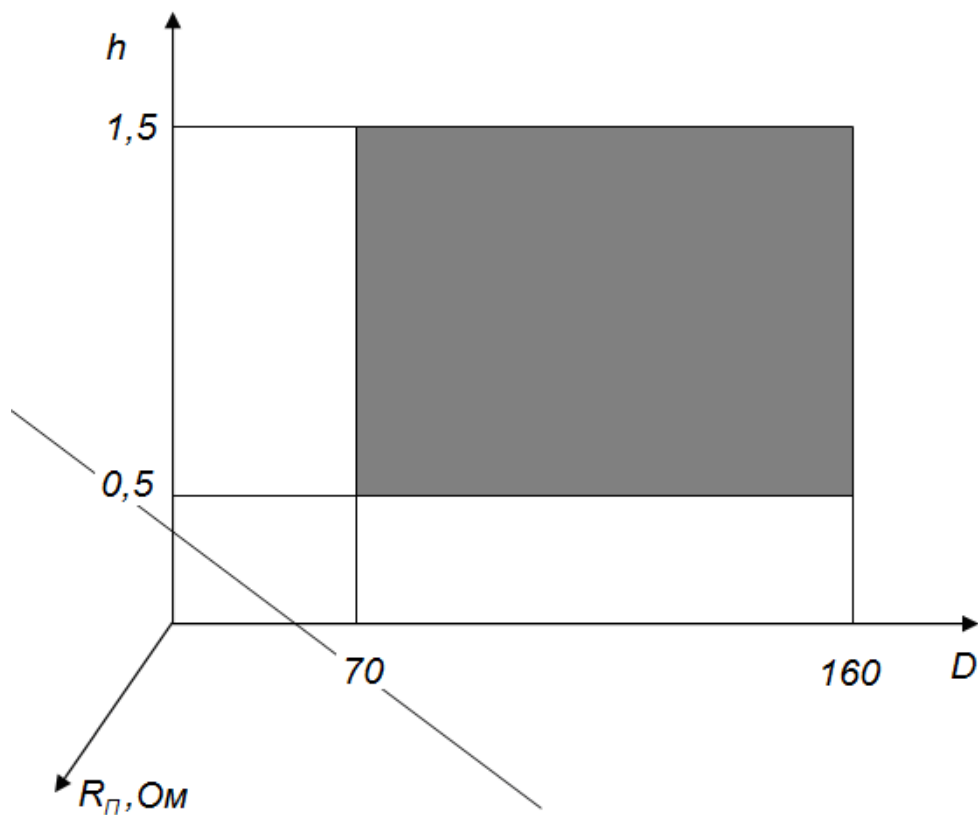


Рисунок 3.5 – Залежність перехідного опору від висоти зубців та жорсткості

3.4 Висновки до розділу 3

Таким чином, у даному розділі проведено аналіз розробленої конструкції плаского з'єднувача з нульовою силою вставки для модулів ET та виявлено фактори, що мають вплив на перехідний опір між шлейфом і матрицею контактів. До таких факторів відносяться: висота h і кількість зубців a на притискній пластині та жорсткість D еластичної пластини.

Проведено трьохфакторний експеримент і отримано математичну модель впливу конструкційних параметрів плаского з'єднувача на перехідний опір у зоні контактування:

$$y(h, D) = 19,183 + 4,94h - 0,5631D.$$

Адекватність отриманої моделі перевірено за допомогою критерію Фішера. Адекватність моделі підтверджено.

За допомогою отриманої моделі виявлено оптимальні конструкційні параметри конструкції плаского з'єднувача за критерієм мінімізації перехідного опору. Оптимальними параметрами є висота зубців $h = 1,17$ мм і жорсткість за Шором притискної пластини $D = 93$. Кількість зубців за результатом проведеного аналізу не є значущою.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах автора [5-7] (Додаток Г).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [8, 27-28, 63-76].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК З'ЄДНУВАЧА ГНУЧКИХ ШЛЕЙФІВ ДЛЯ МІЖМОДУЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ

4.1 Планування експерименту

Для проведення експериментальних досліджень експлуатаційних характеристик з'єднувача гнучких шлейфів необхідно визначити мету, завдання та об'єкт дослідження.

Мета проведення експерименту – експериментальне підтвердження теоретичних досліджень, виконаних на попередніх етапах роботи, та визначення експлуатаційних характеристик з'єднувача гнучких шлейфів для міжмодульних електричних з'єднань [8, 11, 64].

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

Для проведення експерименту обрано гнучкий шлейф з діелектрику лакофольгового марки ФДІ-А-50 32-ма контактами та лініями зв'язку [3, 4, 77]. Контакти розташовано в один ряд та з кроком 1,0 мм. На рисунку 4.1 показано зовнішній вигляд гнучкого шлейфа.

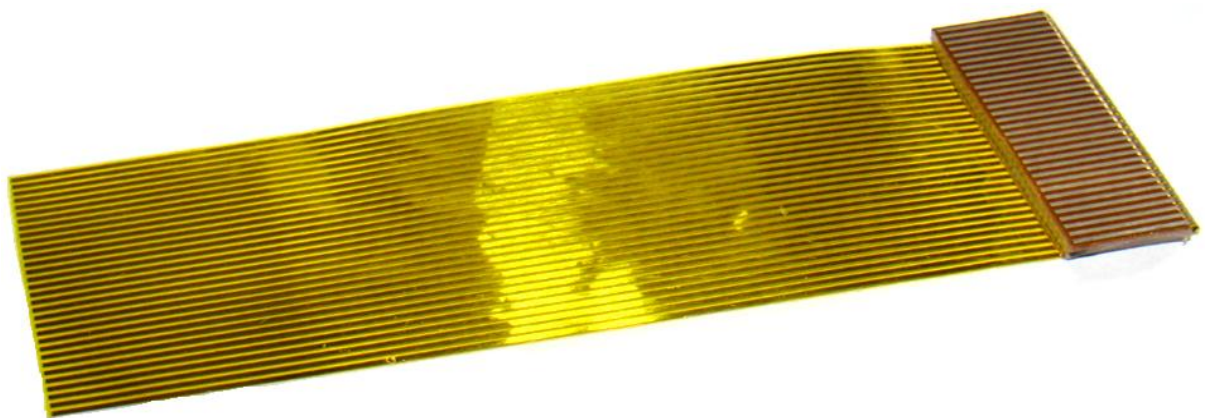


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд гнучкого шлейфа

Для з'єднання двох шлейфів запропоновано нову конструкцію з'єднувача, яка дозволяє швидко та точно виконувати процес підмикання та гарантує якісне електричне з'єднання між контактами лінії зв'язку [6, 27-28, 73].

На рисунку 4.2 показана схема конструкції з'єднувача.

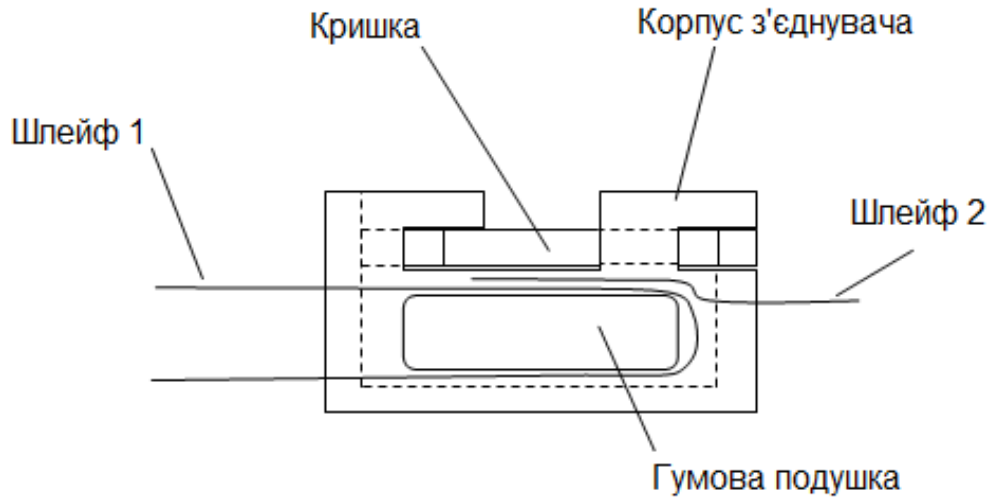


Рисунок 4.2 – Конструкція з'єднувача гнучких шлейфів [77]

Шлейф 2 притискається до шлейфа 1 за допомогою кришки. Гумова подушка здійснює необхідний тиск на внутрішню сторону петлі шлейфа 1, тим самим притискаючи його до контактів шлейфа. На рисунку 4.3 показана схема складання з'єднувача [27, 77-80].

Верхня кришка може мати різну форму нижнього боку. У залежності від форми рисунку можна досягти різних властивостей і якості з'єднання [5, 81].

Таким чином, до завдань експериментальних досліджень додається ще два пункти:

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

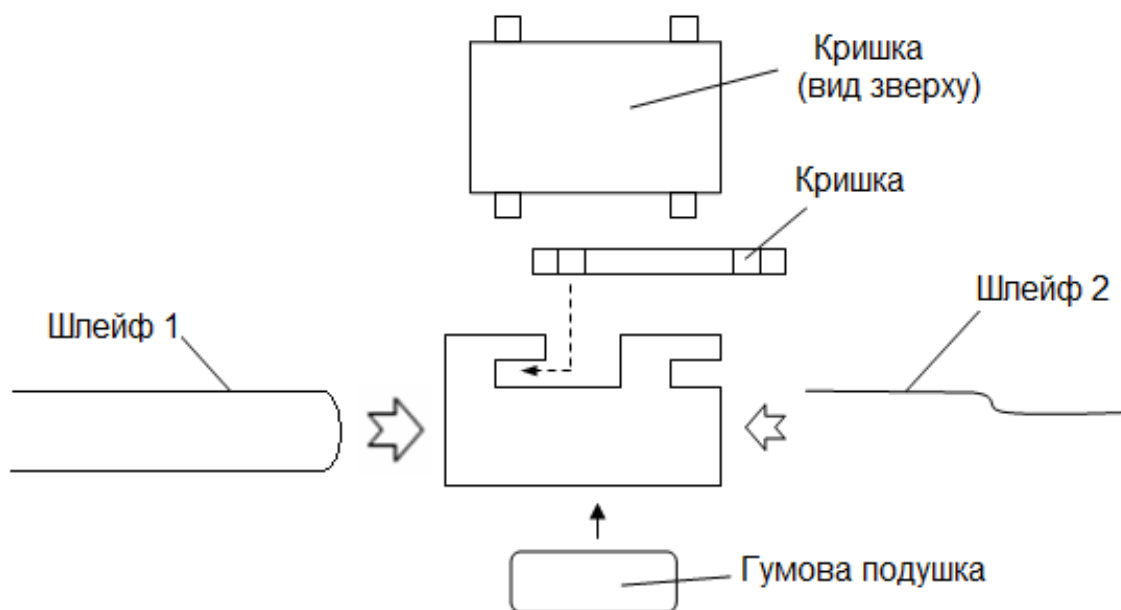


Рисунок 4.3 – Схема складання з'єднувача

На рисунку 4.4 показані різні види верхньої кришки з'єднувача.

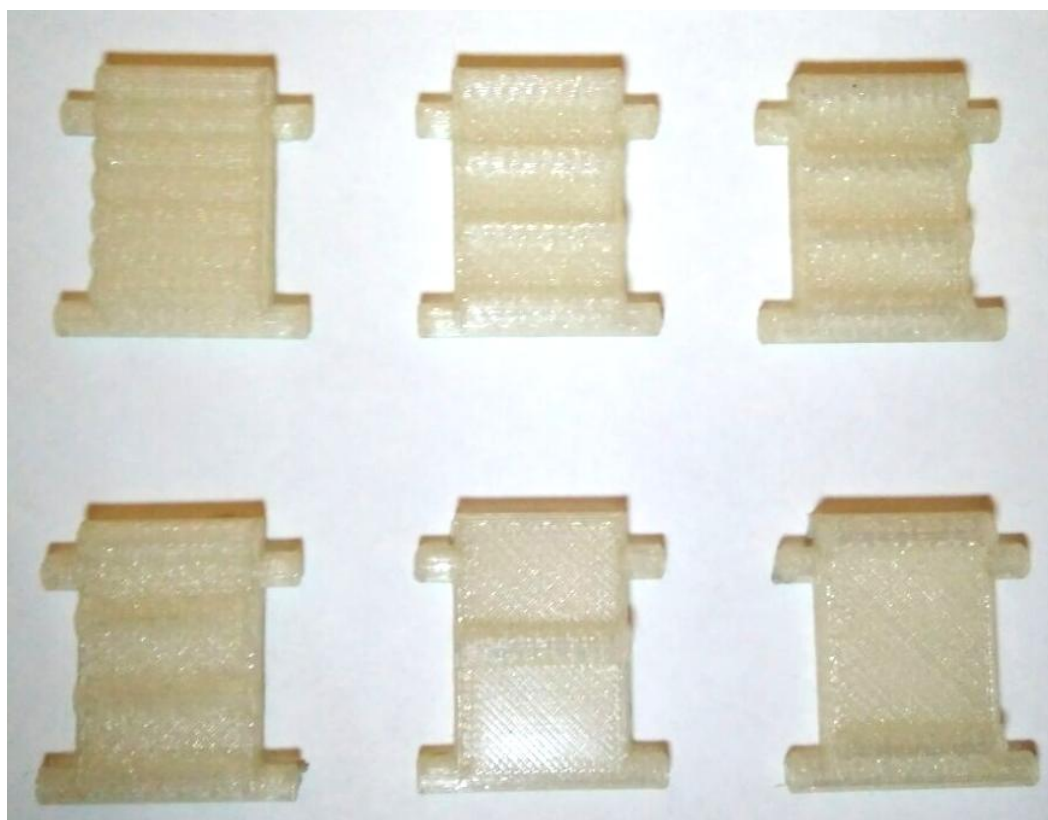
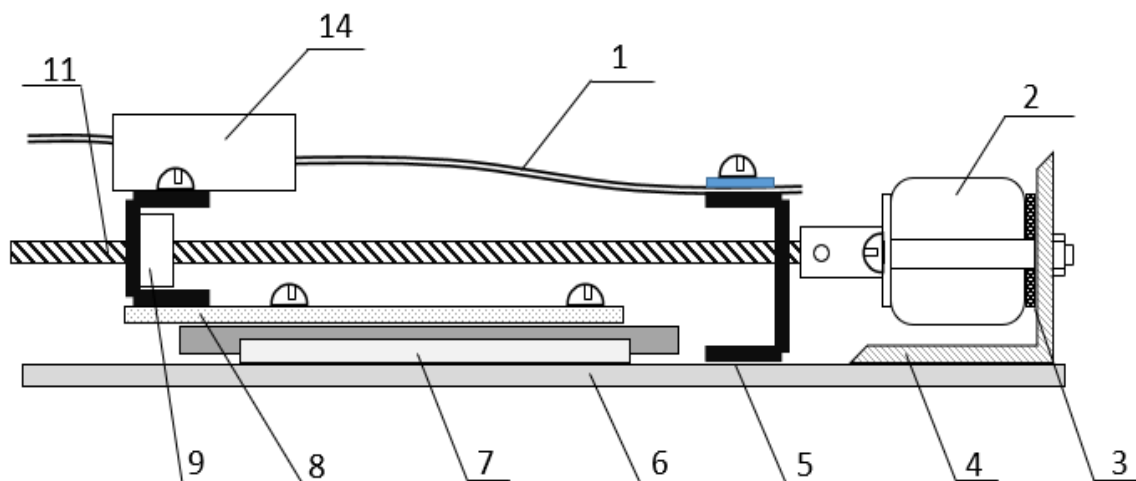


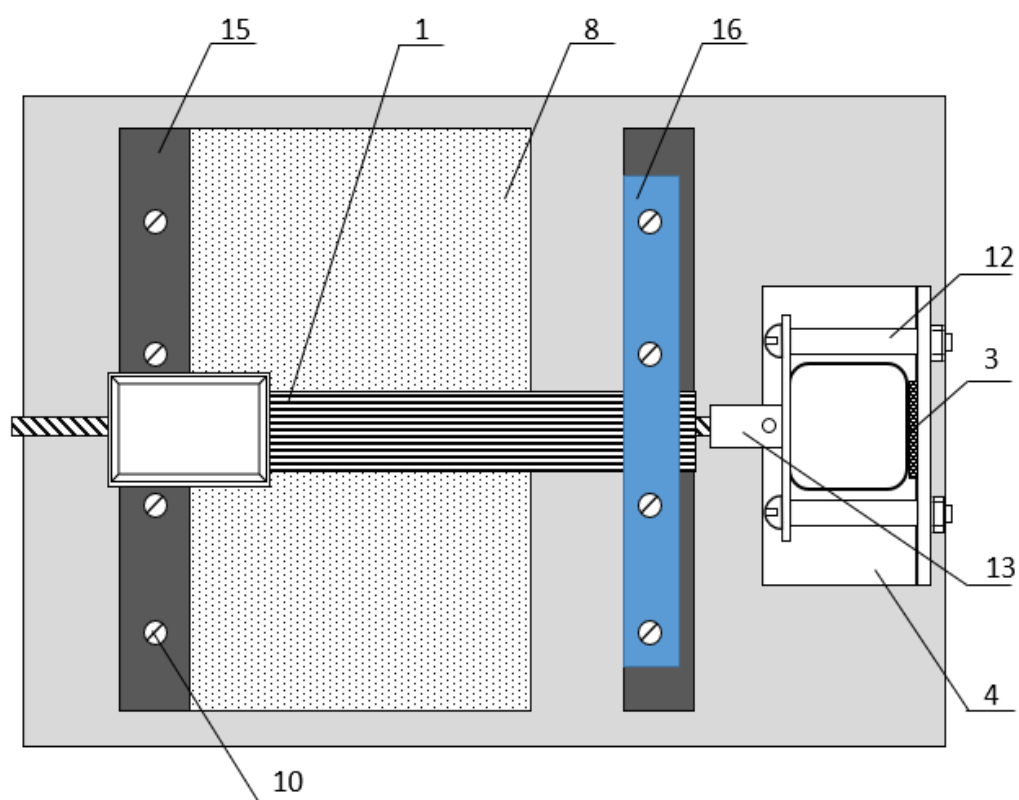
Рисунок 4.4 – Різні види верхньої кришки з'єднувача

4.2 Опис експериментального стенда

Для проведення експерименту було зібрано експериментальний стенд. На рисунках 4.5 показано схему стенда (вид збоку та зверху відповідно) [77].



а)



б)

Рисунок 4.5 – Схема експериментального стенда: а – вид збоку,
б – вид зверху

На рисунку 4.5 введені такі позначення: 1 – гнучкий шлейф; 2 – кроковий двигун; 3 – датчик тиску; 4 – кріпильний куточок; 5 – нерухомий кріпильний профіль; 6 – основа макету; 7 – телескопічна напрямна; 8 – рухлива основа; 9 – гайка; 10 – кріпильні гвинти; 11 – черв'ячна гвинтова передача; 12 – стійкі кріплення крокового двигуна; 13 – муфта; 14 – роз'ємне з'єднання; 15 – рухливий кріпильний профіль з гайкою; 16 – притискна пластина.

Як видно з рисунку 4.5, гнучкий шлейф правим краєм закріплений на жорсткій нерухомій основі за допомогою притискної пластини. Другий (лівий) край шлейфу закріплений у роз'ємному з'єднувачі на рухливій частині механізму натягнення [82]. Кріплення шлейфа в роз'ємі виконується за рахунок його притискної конструкції. Кроковий електродвигун створює натягнення шлейфа за допомогою гвинтової передачі, зміщуючи рухливу пластину.

Датчик тиску механічно пов'язаний із системою регулювання натягнення гнучкого шлейфу. Зміна опору, а, отже, і зміна сили, з якою натягається гнучкий шлейф, фіксується блоком збору даних. Також на блок збору даних надходять дані про перехідний опір, який знімається за допомогою чотирьох зондів.

Таким чином, блок збору даних, проаналізувавши отриману інформацію, проводить внутрішній розрахунок сили натягнення та передає її на вимірювальну станцію, виконану на базі ПК.

На рисунку 4.6 показана структурна схема електричної частини випробувального стенда.

Для вимірювання зусилля, що необхідне для руйнування з'єднання, використовується тензодатчик резистивного типу марки CZN-CP42. Діапазон спрацьовування датчика: 0,2...100 Н, Габаритні розміри: 27×63,75×0,34 мм, робоча температура: -40...75 °С, 1 мА.

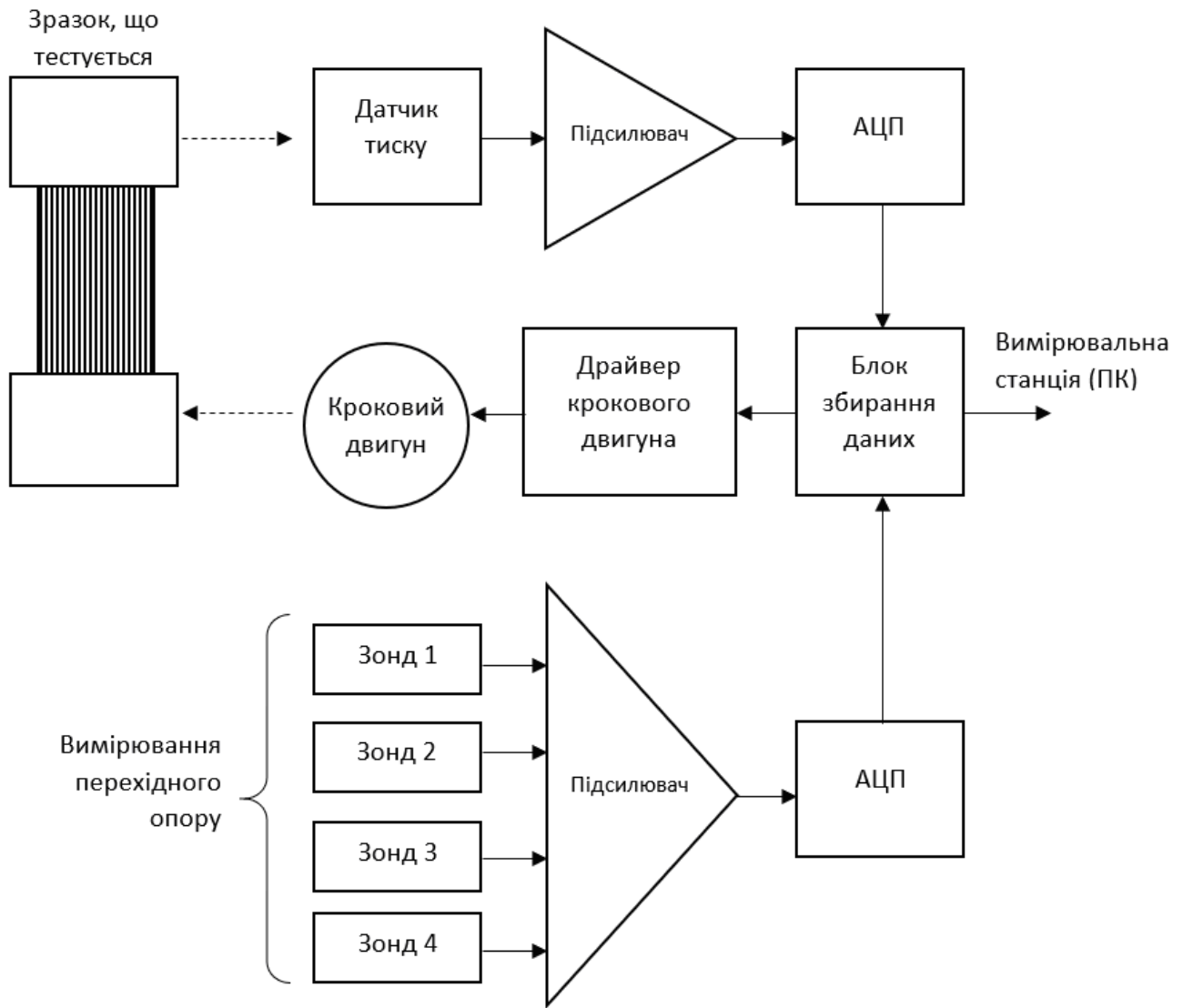


Рисунок 4.6 – Структурна схема електричної частини випробувального стенда

На рисунку 4.7 показані габаритні розміри та особливості конструкції датчика тиску. Конструктивно датчик тиску складається з підкладки 1, металізованих провідників 2, контактів 5, технологічного шару 3 та резистивного чутливого елементу 4. Під час натискання на чутливий шар у залежності від прикладеного зусилля змінюється опір резистивного елементу.

На рисунку 4.8 показано графік зміни опору в залежності від тиску.

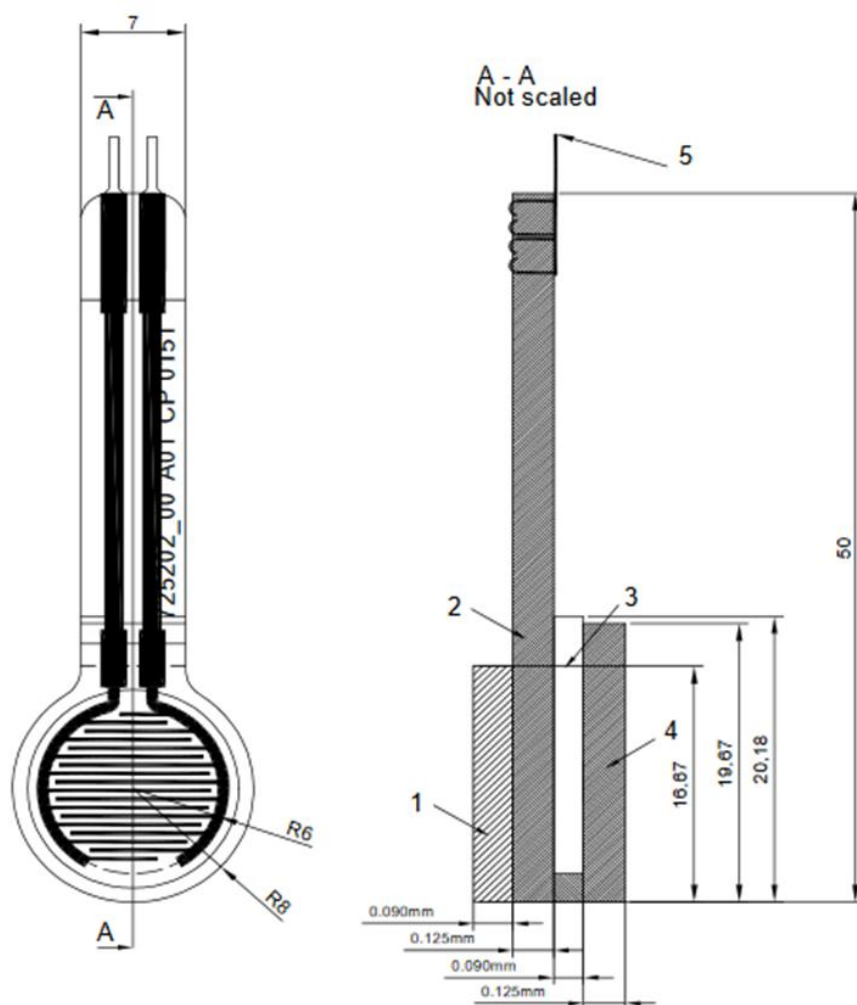


Рисунок 4.7 – Габаритні розміри та особливості конструкції датчика тиску

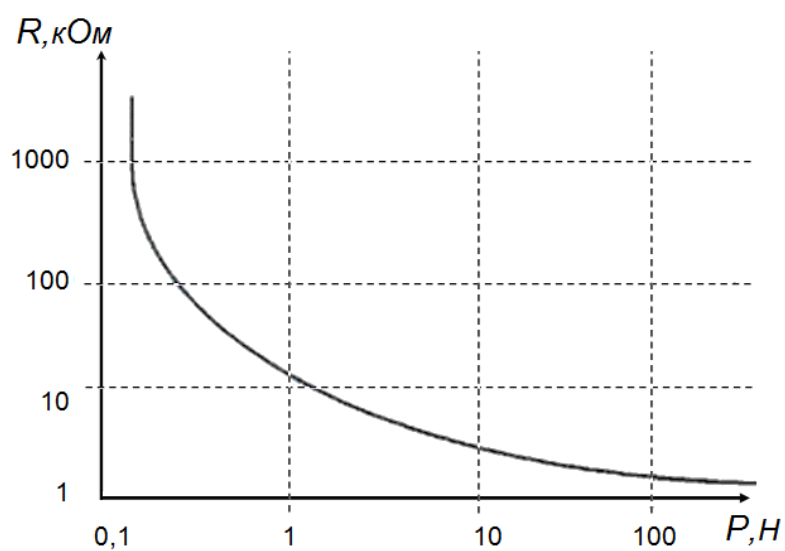


Рисунок 4.8 – Графік зміни опору в залежності від тиску

Для вимірювання тиску та перетворення опору в реальне значення зусилля використовуються програмний код, фрагмент якого наведено нижче:

```
intfsrADC = analogRead(FSR_PIN);
// If the FSR has no pressure, the resistance will be
// near infinite. So the voltage should be near 0.
if (fsrADC != 0) // If the analog reading is non-zero {
    // Use ADC reading to calculate voltage:
    float fsrV = fsrADC * VCC / 1023.0;
    // Use voltage and static resistor value to
    // calculate FSR resistance:
    float fsrR = R_DIV * (VCC / fsrV - 1.0);
    Serial.println("Resistance: " + String(fsrR) + " ohms");
    // Guesstimate force based on slopes in figure 3 of
    // FSR datasheet:
    float force;
    float fsrG = 1.0 / fsrR; // Calculate conductance
    // Break parabolic curve down into two linear slopes:
    if (fsrR <= 600)
        force = (fsrG - 0.00075) / 0.00000032639;
    else
        force = fsrG / 0.000000642857;
    Serial.println("Force: " + String(force) + " g");
    Serial.println();
}
```

У результаті роботи даної підпрограми будемо отримувати статистичні дані, необхідні для виконання дослідження.

На рисунку 4.9 наведено двопровідну схему вимірювання перехідного опору контактів.

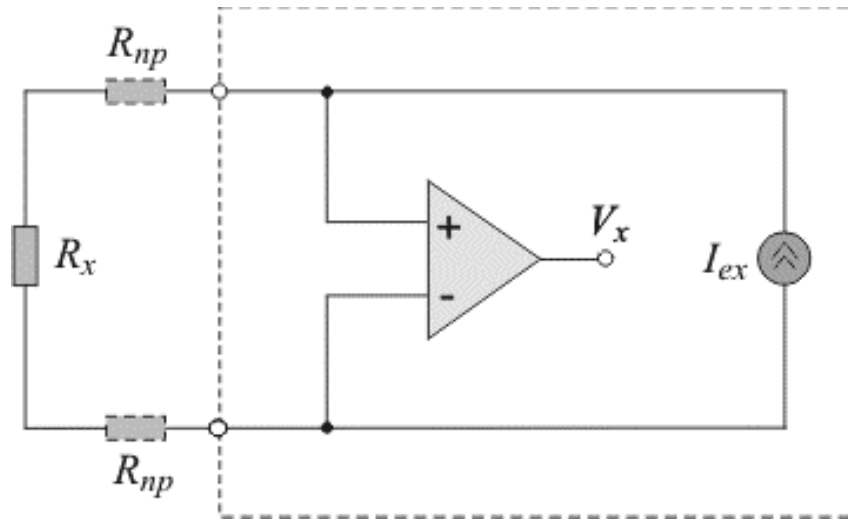


Рисунок 4.9 – Двопровідна схема вимірювання перехідного опору контактів

Вимірювання перехідного опору контактів шлейфу виконуються за двопровідною схемою. Двопровідна схема вимірювання використовує непрямий метод вимірювання, за якого вимірюється напруга на резисторі R_x , викликана протікаючим струмом збудження I_x , що калібрується. Рідше задається напруга V_x , що калібрується, і вимірюється струм I_x . Можливий також варіант, коли одночасно вимірюються як струм, так і напруга за умови використанні джерел вимірювальних сигналів, що не калібруються. В усіх випадках величину опору R_x розраховують за формулою (4.1):

$$R_x = \frac{V_x}{I_{ex}}. \quad (4.1)$$

У зв'язку з тим, що опір металевих контактів малий, велику похибку у результат вимірювання вносять опори дротів R_{dp} . Тому двопровідна схема вимірювань використовується, коли опори R_{dp} малі, наприклад, не перевищують 0,1% від опору контакту. Під час використання дротів перерізом $0,35 \text{ мм}^2$ з погонним опором $0,049 \text{ Ом/м}$ довжина пари провідників для цього випадку не має перевищувати $0,5 \text{ м}$.

Виходячи з того, що перехідний опір є доволі малим, то у процесі вимірюванні його величини будемо використовувати операційний підсилювач. На рисунку 4.10 наведено схему підсилювача, що не інвертує.

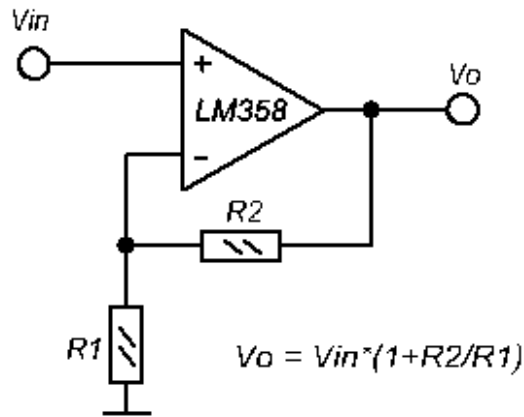


Рисунок 4.10 – Схема підсилювача, що не інвертує

На рисунку 4.11 зображено схему джерела опорної напруги.

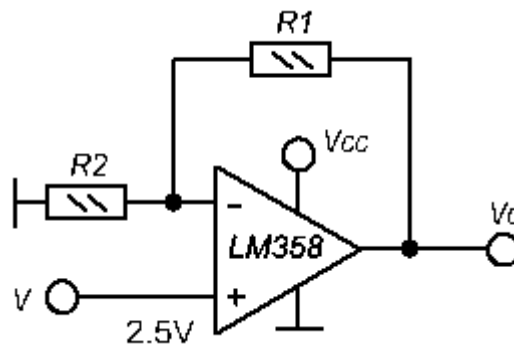


Рисунок 4.11 – Схема джерела опорної напруги

Вихідна напруга розраховується за формулою:

$$V_0 = 2,5V \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (4.2)$$

Джерело опорної напруги – один з основних вузлів електронних пристроїв, який забезпечує на своєму виході стабільне значення постійної напруги. Джерело опорної напруги використовується для встановлення

значення вихідної напруги у стабілізаторах, блоках живлення та застосовується в аналого-цифрових перетворювачах, у схемах вимірювання різних фізичних величин, таких як температура, освітленість, вологість тощо.

На рисунку 4.12 наведено схему компаратора з гістерезисом.

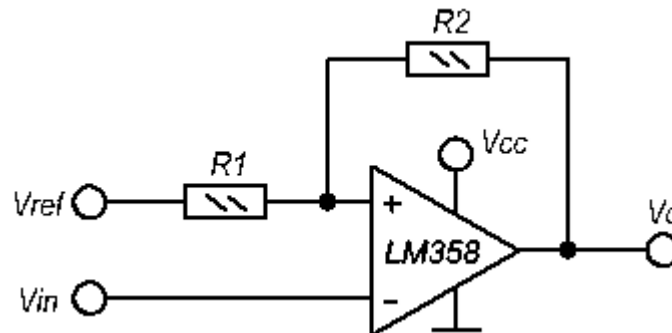


Рисунок 4.12– Схема компаратора з гістерезисом

Припустимо, що потенціал, який надходить на вхід, що інвертується, плавно зростає. Після досягнення його рівня трохи вище опорного ($V_H - V_{ref}$), на виході компаратора виникне високий логічний рівень. Якщо після цього вхідний потенціал почне повільно знижуватися, то вихід компаратора переключиться на низький логічний рівень за значення трохи нижче опорного ($V_{ref} - V_L$). У даному прикладі різниця між ($V_H - V_{ref}$) і ($V_{ref} - V_L$) буде значення гістерезису.

У розроблюваному макеті будемо застосовувати схему підсилювача, що не інвертує (рис. 4.10). На рисунку 4.13 наведено схему електричну принципову модуля вимірювання перехідного опору контактів. У модулі використовуються чотири однакових блоків вимірювання опору, виконані за однаковою схемою. Зонд підключається до контактів роз'єму X1. Проходячи через вхідний фільтр сигнал поступає на прямий вхід операційного підсилювача.

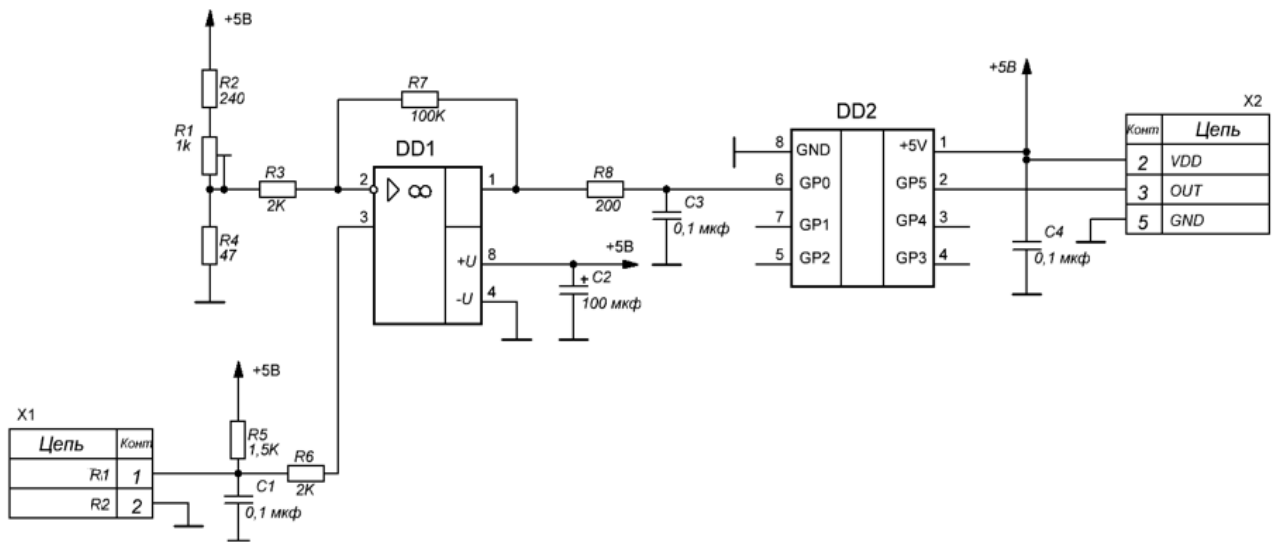


Рисунок 4.13 – Схема електрична принципова модуля вимірювання перехідного опору контактів

Для регулювання коефіцієнта підсилення зібрана схема на елементах R2-R4, R6, R7. На резисторах R2-R4 зібраний дільник напруги. За допомогою підрядкового резистора R1 задається коефіцієнт підсилення. На резисторі R7 зібраний ланцюг зворотного зв'язку. На вихід операційного підсилювача підключений конденсатор C3 для фільтрації вихідного сигналу. Дані з підсилювача DD1 надходять на вхід мікроконтролера DD2, виконаного на основі пристрою PIC12F683. Після перетворення напруги з виходу підсилювача отримане значення перехідного опору передається на вхід модуля збору даних через послідовний інтерфейс. Модуль збору даних підключається до роз'єму X2. Через даний роз'єм подається напруга живлення на цю схему.

На рисунку 4.14 приведено зовнішній вигляд друкованої плати модуля вимірювання перехідного опору контактів.

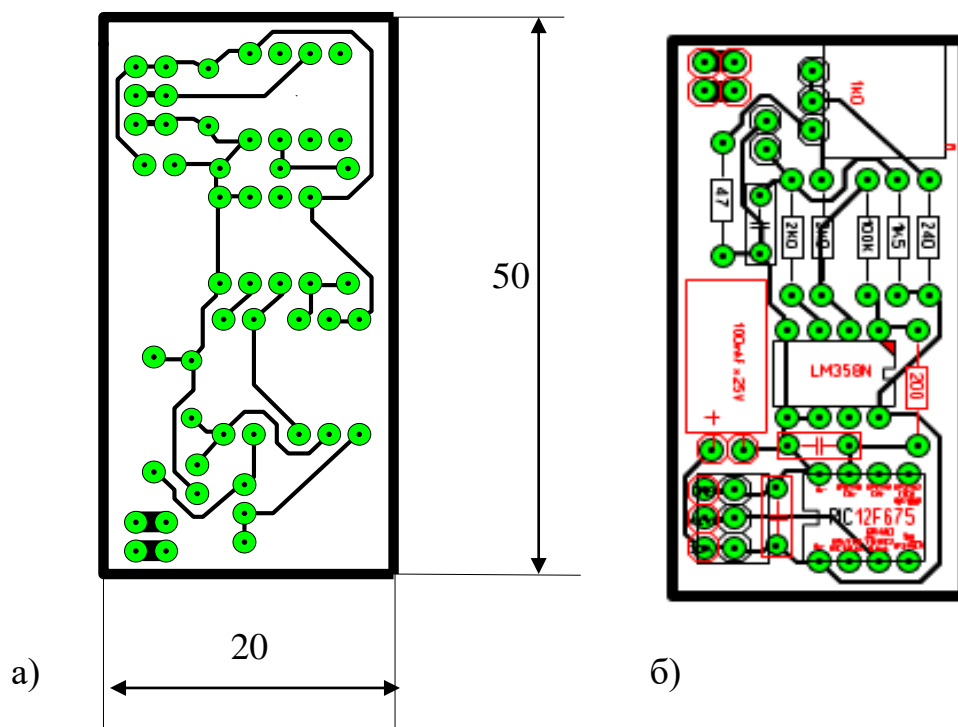


Рисунок 4.14 – Зовнішній вигляд друкованої плати модуля вимірювання перехідного опору контактів (а) та розташування елементів на друкованій платі (б)

Зовнішній вигляд дослідного стенда наведено на рисунку 4.15.



Рисунок 4.15 – Зовнішній вигляд дослідного стенда

На рисунку 4.16 показано розміщення з'єднувача гнучких шлейфів.

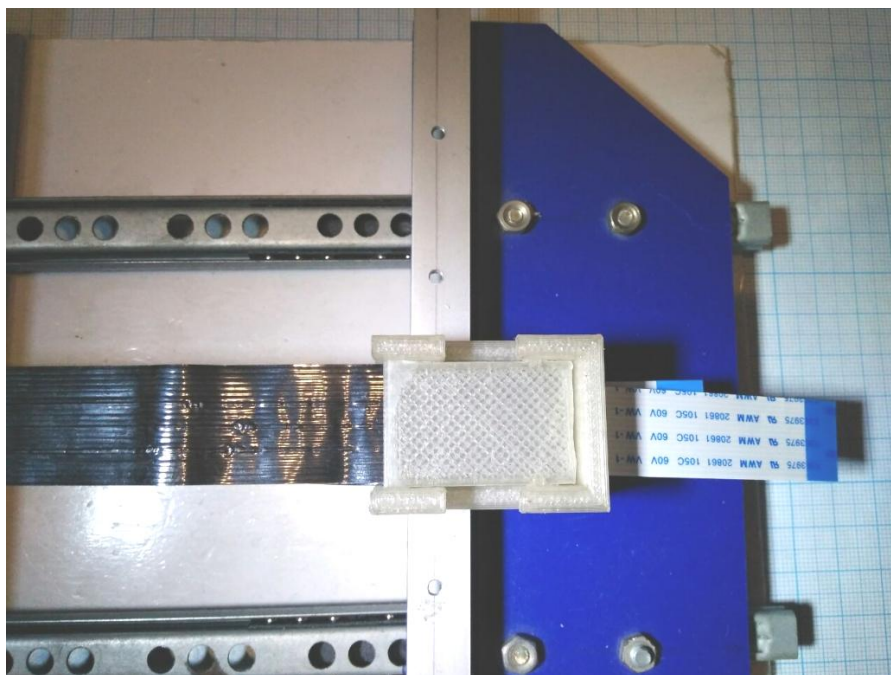


Рисунок 4.16 – Розміщення з'єднувача гнучких шлейфів

З'єднувач розташовано на рухомій платформі, яка зсувається під впливом різьбової передачі. На рисунку 4.17 показано кроковий двигун з датчиком натискання.

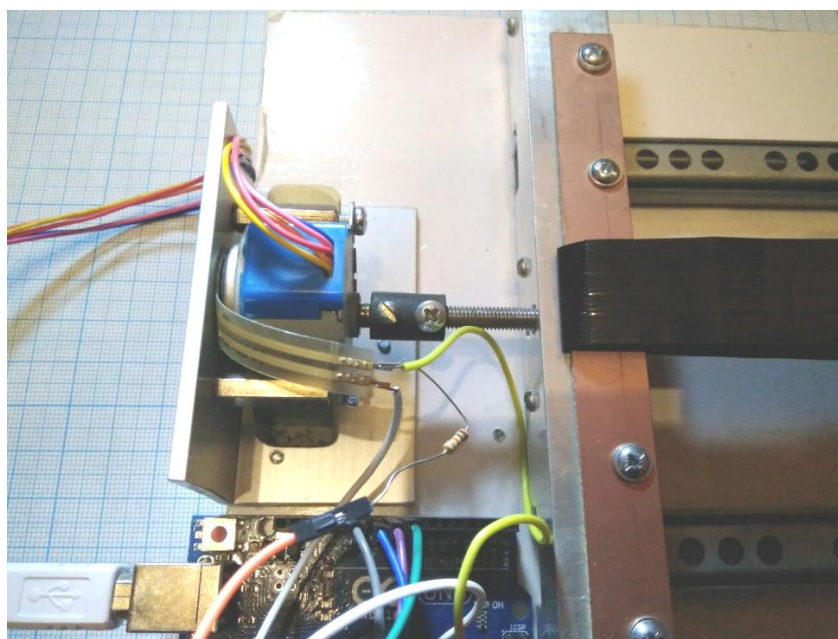


Рисунок 4.17 – Кроковий двигун з датчиком натискання

Як модуль керування та збору даних використовується плата Arduino Uno. На рисунку 4.18 показано розміщення модуля керування та збору даних на дослідному макеті.

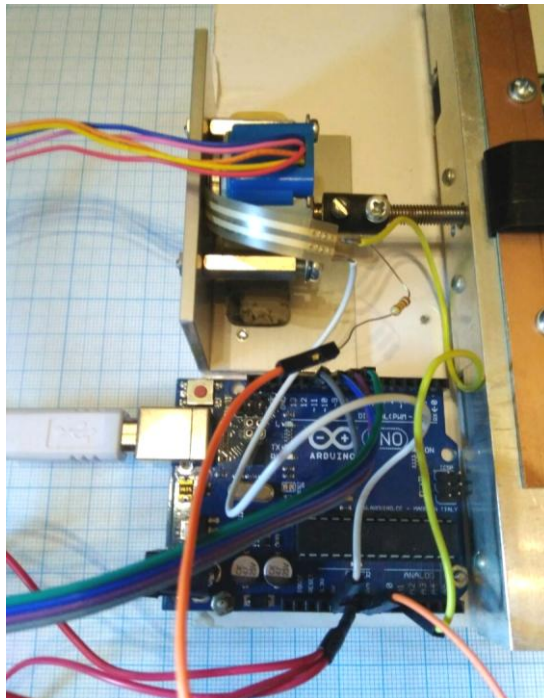


Рисунок 4.18 – Розміщення модуля керування та збору даних на дослідному макеті

На рисунку 4.19 показано модуль керування кроковим двигуном.

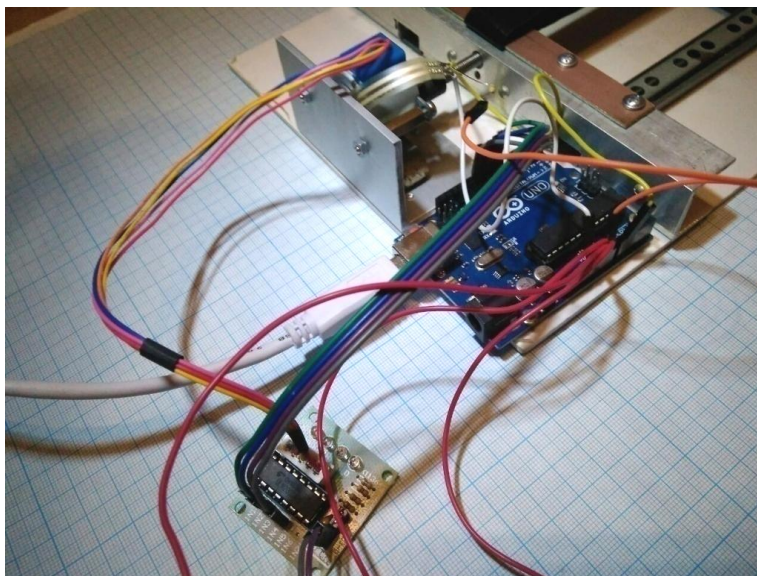


Рисунок 4.19 – Модуль керування кроковим двигуном

Повністю зібраний дослідний макет показано на рисунку 4.20.

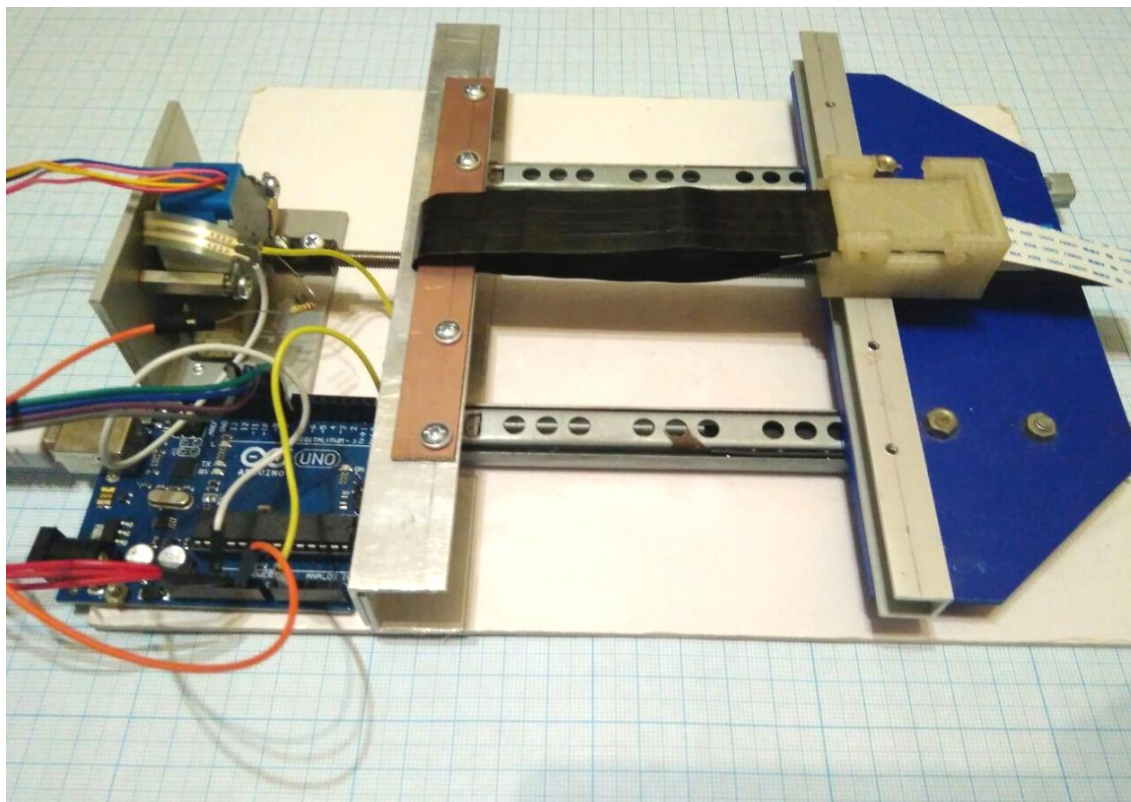


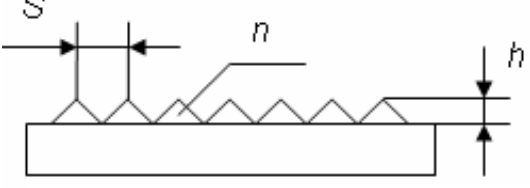
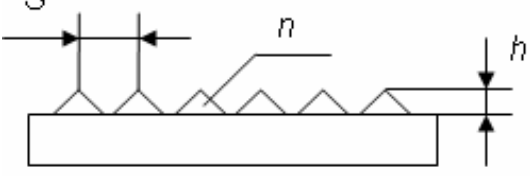
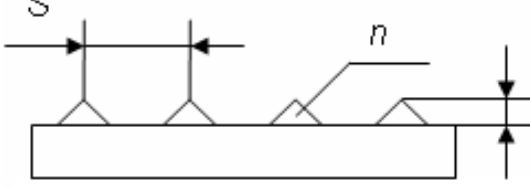
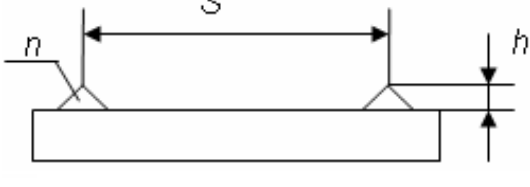
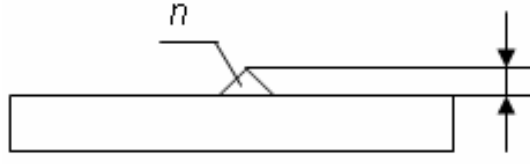
Рисунок 4.20 – Дослідний макет із закріпленим зразком гнучкого шлейфа та з'єднувачем

4.3 Аналіз отриманих результатів

Під час проведення експерименту було використано п'ять різновидів кришки плоского з'єднувача гнучких структур [82]. Кожна кришка має свій рисунок поверхні, яка притискає шлейф до контактної поверхні.

У таблиці 4.1 наведено зведені характеристики кожної з дослідних кришок. Прийняті наступні позначення: S – відстань між зубцями, мм; n – кількість зубців на кришці, шт; h – висота зубця, мм.

Таблиця 4.1 – Зведені характеристики дослідних кришок з'єднувача

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

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

На рисунку 4.21 показано графік з результатами експериментальних досліджень для кришки № 1.

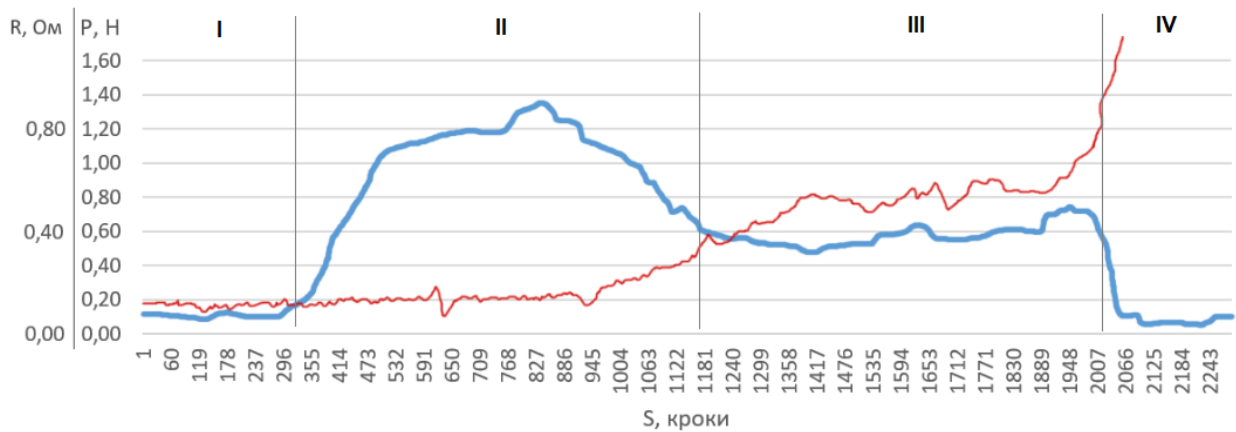


Рисунок 4.21 – Залежність тиску та перехідного опору від поступового зміщення шлейфа для кришки № 1

На графіку з рисунку 4.21 можна бачити чотири виражені зони «роботи» з'єднувача.

Зона I – на тяжіння гнучкого шлейфа. У даній зоні зусилля у з'єднувачі дорівнює майже нулю. Поступово шлейф вирівнюється та в конструкції починає зростати тиск на притискний елемент.

Зона II – зростання тиску на датчик до максимального значення завдяки пружній деформації основи шлейфу та провідників.

Зона III – шлейф зривається та починає «ковзати» відносно нерухомого елементу конструкції. На даній стадії визначається зростання перехідного опору завдяки непостійному контакту між оголеними частинами двох шлейфів.

Зона IV – рухомий шлейф виходить зі зчеплення і тиск на датчик зменшується до мінімального значення. Контакт руйнується та перехідний опір зростає.

На рисунку 4.22 показано результат експерименту для кришки № 2.

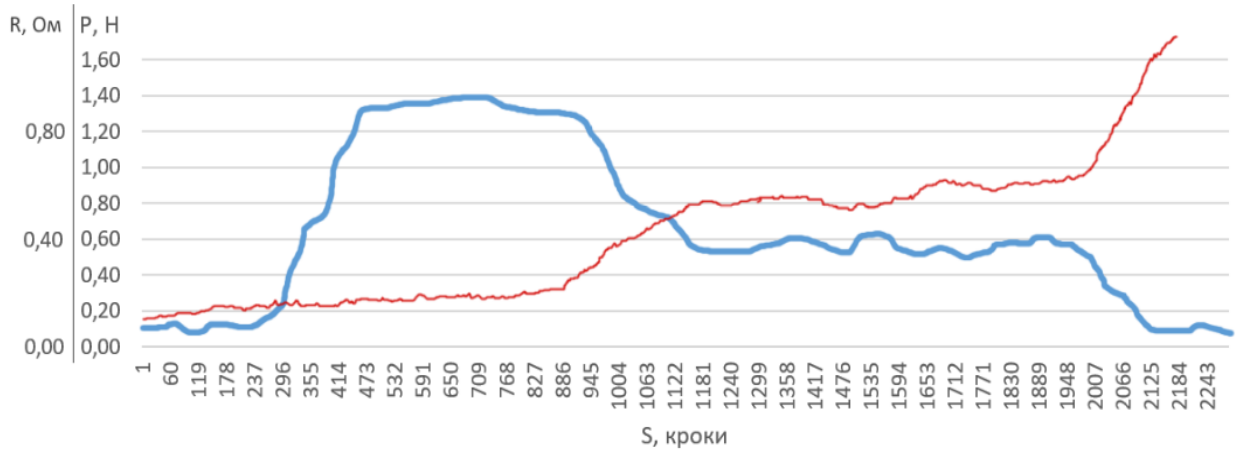


Рисунок 4.22 – Залежність тиску та перехідного опору від поступового зміщення шлейфа для кришки № 2

Кришка має шість зубців, і перехідна характеристика схожа з характеристикою для попереднього зразка.

На рисунку 4.23 показано результат експерименту для кришки № 3.

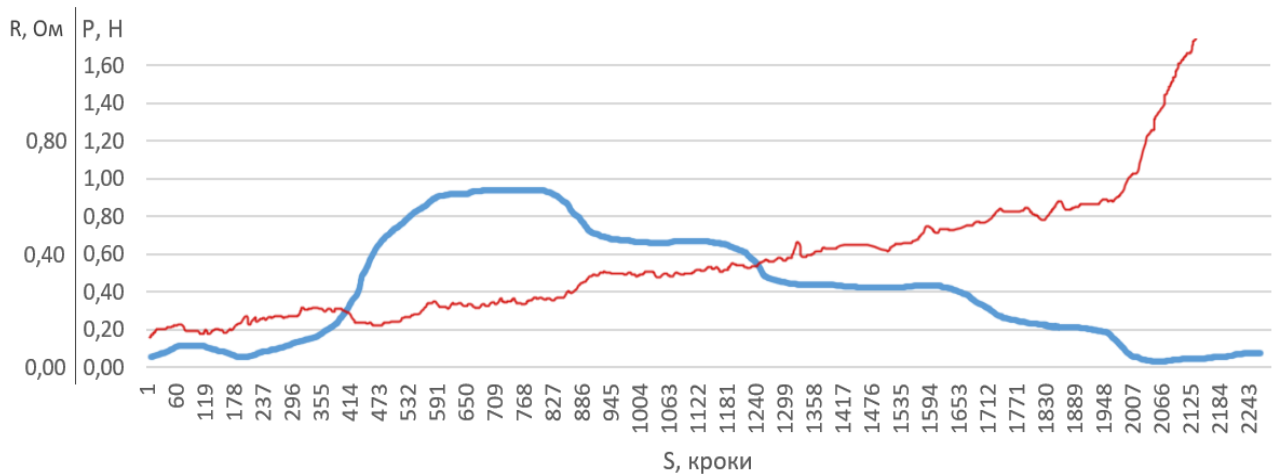


Рисунок 4.23 – Залежність тиску та перехідного опору від поступового зміщення шлейфа для кришки № 3

Кришка має чотири зубці та на перехідній характеристиці можна бачити так звані сходинки. Вони зумовлені послідовним зменшенням тиску на шлейф з боку кришки під час зміщення шлейфу відносно зубців. Максимальний тиск не перевищує 1 Н. Перехідний опір постійно збільшується та можна зробити

висновок, що він є нестабільним [83-85]. Порівняно з попередніми зразками, така конструкція з'єднувача є менш надійною.

На рисунку 4.24 показано результат експерименту для кришки № 4.

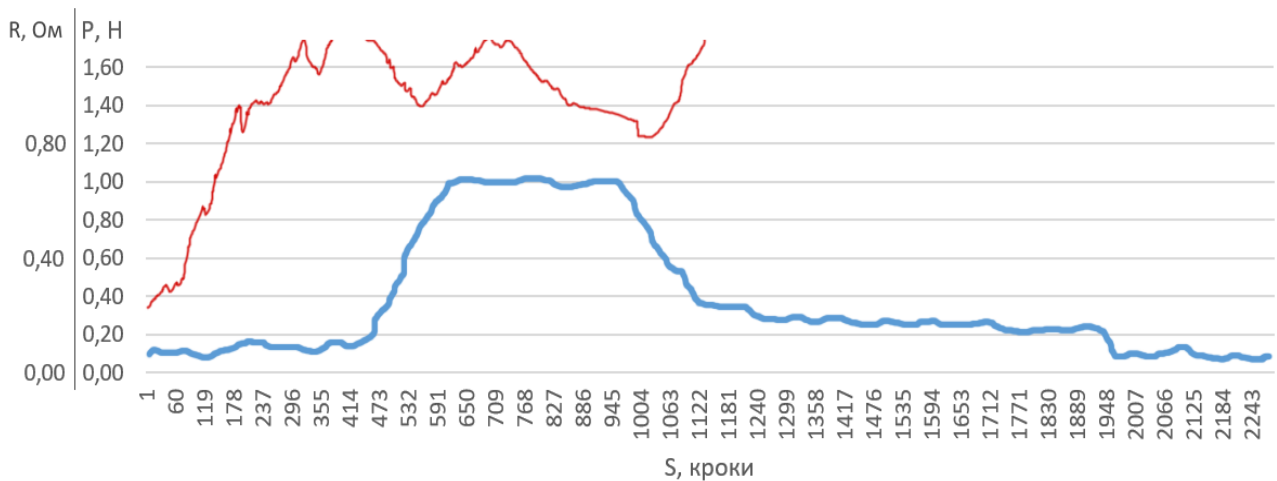


Рисунок 4.24 – Залежність тиску та переходного опору від поступового зміщення шлейфа для кришки № 4

Відповідно до таблиці 4.1, кришка має два зубці. Як можна бачити з наведеного графіку, максимальний тиск не перевищує 1 Н. Стадія поступового зсуву шлейфа виражена дуже слабо. Перехідний опір є дуже нестабільним і перевищує 1 Ом навіть у нерухомій стадії з'єднання. Це обумовлено тим, що зубці розташовані тільки по краях кришки та не притискають надійно шлейфи один до одного. Надійність такої конструкції є мінімальна, тому вона не рекомендується для практичного застосування.

На рисунку 4.25 показано результат експерименту для кришки № 5.

Відповідно до таблиці 4.1, кришка має один зубець. Максимальний тиск не перевищує 0,8 Н. Стадія натягіння – мінімальна, а тиск на стадії зміщення ледве перевищує 0,2 Н. Перехідний опір різко зростає під час зміщення шлейфу відносно центрального зубця. Надійність конструкції є кращою, ніж у попереднього зразка, але вона також не рекомендується для практичного застосування.

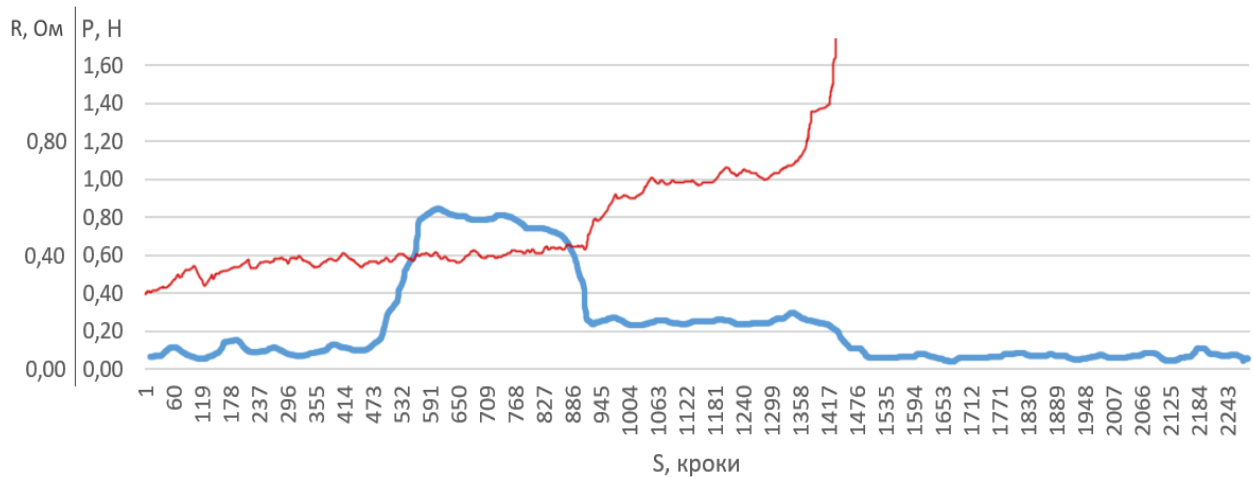


Рисунок 4.25 – Залежність тиску та переходного опору від поступового зміщення шлейфа для кришки № 5

4.4 Висновки до розділу 4

Таким чином, у процесі проведення досліджень розроблено стенд для дослідження якості електричних міжз'єднань гнучких структур і методику проведення експериментальних досліджень дозволили експериментально довести якість запропонованої конструкції плаского з'єднувача гнучких шлейфів.

Виходячи з отриманих результатів була визначена форма притискаючої кришки з'єднувача. Відповідно до таблиці 4.1, кришка повинна мати шість або сім зубців. Як можна бачити з графіків, наведених на рис. 4.21 та рис. 4.22, максимальне зусилля, яке витримує з'єднувач, становить 1,3...1,4 Н. Також показано, що перехідний опір у контактах з'єднувача становить максимум 0,2...0,3 Ом. Експеримент показав надійність і стабільність параметрів під час прикладення механічних впливів і їх збереження протягом всієї другої стадії роботи з'єднувача, поки шлейф не зривається та не починає «ковзати» відносно нерухомого елемента конструкції.

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

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

розроблений стенд для дослідження якості електричних міжз'єднань гнучких структур та методика проведення експериментальних досліджень дозволили експериментально довести якість запропонованої конструкції плаского з'єднувача гнучких шлейфів.

Виходячи з отриманих результатів була визначена форма притискаючої кришки з'єднувача. Відповідно до результатів експерименту, кришка повинна мати шість або сім зубців.

Встановлено, що максимальне зусилля яке витримує з'єднувач становить 1,3 – 1,4 Н. Також показано, що перехідний опір в контактах з'єднувача становить максимум 0,2 – 0,3 Ом.

Експеримент показав надійність та стабільність параметрів при прикладенні механічних впливів, та збереження протягом всієї другої стадії роботи з'єднувача поки шлейф не зривається та не починає «ковзати» відносно нерухомого елемента конструкції.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах автора [6-7, 13-14] (Додаток Г).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [3-6, 8, 11, 27-28, 64, 73, 77-85].

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ МІКРОЗ'ЄДНАНЬ МОДУЛІВ ЕТ

5.1 Дослідження особливостей технології формування монтажних з'єднань у модулях ЕТ

При розробці електричних між'єднань модулів ЕТ надзвичайно важливим є вибір найбільш оптимального методу створення електричних між'єднань між компонентами модуля, а саме технології складання.

Порівняльна характеристика параметрів електричних з'єднань, виконаних різними методами, наведена в табл. 5.1 [65].

Таблиця 5.1 – Методи виконання електричних з'єднань

Вид з'єднання	Перехідний опір, Ом	Міцність, МПа	Інтенсивність відмов, $1 \cdot 10^{-9}$ год ⁻¹	Тепловий опір, °C/Вт
Зварювання	0,01 – 1	100 – 500	0,1 – 3,0	0,001
Накручування	1 – 2	60 – 80	0,2 – 0,5	0,0005
Паяння	2 – 5	40 – 50	1 – 10	0,002
Обжимання	1 – 10	20 – 50	2 – 5	0,001
Струмопровідним клеєм	1 – 10	5 – 10	50	5,0

Дуже важливим фактором при розробці та створенні електричних між'єднань, є вибір оптимального методу створення електричних між'єднань компонентів для забезпечення відповідності досить жорстким вимогам при гарантуванні високої довгострокової надійності.

Паяні електричні з'єднання знайшли найширше застосування завдяки

наступним перевагам: низькому і стабільному електричному опору, широкій номенклатурі металів, що сполучаються, легкості автоматизації, контролю та ремонту. Недоліки паяних з'єднань пов'язані з високою вартістю використовуваних кольорових металів, необхідністю видалення залишків флюсу, низькою термостійкістю. Зварні електричні з'єднання в порівнянні з паяними сполуками мають наступні переваги: більш висока механічна міцність, відсутність присадочного матеріалу, менша площа контакту. До недоліків слід віднести: критичність при виборі поєднань матеріалів, збільшення перехідного опору через утворення інтерметалідів, складність групового контактування і ремонту.

У відповідності до вищенаведеного на сьогоднішній день найбільш перспективним методом одержання електричних мікроз'єднань [86-87] у модулях ЕТ є ультразвукове зварювання. У порівнянні з іншими методами формування міжз'єднань метод зварювання за допомогою ультразвуку має низку переваг:

- простота використання;
- технологічність;
- широкі можливості для автоматизації технологічного процесу монтажу;
- міцність зварного мікроз'єднання є близькою до міцності вихідних елементів, що з'єднуються (наприклад, виводи елемента та контактної площинки);
- зварене з'єднання має мінімальний омичний опір [88];
- основні параметри процесу з'єднання (температура нагрівання, питомий тиск і тривалість витримки) є мінімальними, що дозволяє виключити пошкодження елементів схеми;
- ультразвукове зварювання дозволяє виконувати з'єднання матеріалів різноманітних комбінацій і типорозмірів [89];
- після з'єднання не залишається матеріалів, що викликають корозію.

Однак вплив конструктивно-технологічних факторів на процес утворення зварних міжз'єднань [90] може призвести до відхилення їх параметрів від

очікуваних.

Тому метою даного розділу дисертаційної роботи є детальний розгляд впливу конструктивно-технологічних факторів на кінетику формування міжз'єднань у модулях ЕТ методом ультразвукового зварювання.

5.2 Дослідження фізико-хімічних процесів під час формування та руйнування зварних мікроз'єднань

Основою моделювання процесів руйнування зварного мікроз'єднання може слугувати теорія руйнування твердих тіл [91], основні положення якої передбачають розгляд процесу руйнування як дії явищ повзучості та крихкого руйнування, які виникають за умови дії зовнішнього силового навантаження, при цьому виникають умови для перевищення припустимої межі міцності [92-95].

Багато з властивостей матеріалів, зокрема, механічні та діелектричні властивості виявляють своєрідні особливості, обумовлені частково вповільненою реакцією матеріалу на зовнішні впливи [96]. Будь-яка деформація матеріалу під дією зовнішньої сили не супроводжується миттєвою перебудовою внутрішньої структури до стану рівноваги, що відповідає новим умовам [97]. Для цього потрібен деякий проміжок часу, поки всі частки відповідно до цих умов прийдуть до рівноваги. Так, якщо швидко деформувати матеріал і підтримувати ступінь деформації постійною, то необхідне для цього напруження поступово зменшується (релаксація напруження). Якщо ж швидко деформувавши матеріал, підтримувати постійним напруження, то якийсь час буде збільшуватися деформація (релаксація деформації). Таким чином, процес переходу часток до нового стану рівноваги, що пояснює повзучість, супроводжується релаксацією. У розглянутому випадку мається на увазі ослаблення напруження, створеної зовнішнім впливом [93].

Процес руйнування твердого тіла протікає більш-менш поступово і для свого завершення вимагає певного часу t_p . Цей час, необхідний для розвитку

процесу руйнування від моменту навантаження тіла до моменту його розриву, називається часовою міцністю або довговічністю матеріалу [95, 98].

Довговічність матеріалу, що руйнується, t_p , напруження розтягування σ і абсолютна T температура пов'язані наступним співвідношенням:

$$t_p = t_{p0} \exp[(U_0 - \gamma\sigma) / kT], \quad (5.1)$$

де t_{p0} , U_0 , γ – постійні, які залежать від природи та структури матеріалу;
 k – постійна Больцмана.

Логарифмуючи (5.1), одержуємо залежність:

$$\ln t_p = \ln t_{p0} + (U_0 - \gamma\sigma) / kT = \ln t_{p0} + U_a / kT, \quad (5.2)$$

де $U_a = U_0 - \gamma\sigma$ – енергія активації процесу руйнування.

Ці залежності перевірялися на великій кількості різноманітних матеріалів (метали, скло, полімери, кристали та ін.) за умови зміни t_p на 10 порядків і зміни T у широких межах [98]. Як показали досліди, t_{p0} у всіх матеріалів є приблизно однаковим і дорівнює $10^{-12} \dots 10^{-13}$ с, тобто є близьким до періоду коливань атомів біля положення рівноваги. Побудувавши залежність $\ln t_p$ від $1/T$ для даного σ можна експериментально визначити U_a . Встановлено, що для металів U_a добре збігається з енергією сублімації, для полімерів – з енергією термічної деструкції, тобто з енергією розриву хімічних зв'язків.

Універсальність отриманих закономірностей дозволяє зробити висновок, що процес руйнування твердого тіла завжди має кінетичний характер (тобто протікає в часі) і природа його для всіх тіл є однаковою.

Фізичний механізм цього процесу представляється в наш час у такий спосіб [91]. Атоми твердого тіла здійснюють теплові коливання з періодами $t_{p0} \approx 10^{-12} \dots 10^{-13}$ с. Під дією теплових флуктуацій час від часу відбувається розрив хімічних зв'язків. Імовірність цієї події, що дорівнює $\exp(-U_a/kT)$, залежить від

висоти активаційного бар'єру U_a і температури T , зменшуючись зі зростанням U_a і зниженням T . Під час відсутності зовнішнього напруження (за умови $\sigma = 0$) енергія, необхідна для розривання зв'язку дорівнює для металів $U_o = Q_{\text{субл}}$. Напруження σ , створене в тілі, зменшує енергію активації процесу руйнування з U_o до $U_o = U_o - \gamma\sigma$ і тим самим збільшує ймовірність розриву зв'язків, а отже і число розірваних зв'язків в одиниці об'єму.

Утворення субмікроскопічних областей з розірваними зв'язками та злиття їх один з одним призводить до того, що тіло під дією прикладеного напруження руйнується [99-100]. Чим вище σ , тим сильніше знижується енергія активації, тим швидше і у більшій кількості виникають розірвані зв'язки, тому тим менше потрібно часу для розвитку процесу руйнування.

Таким чином, для забезпечення режиму руйнування під час відсутності помітної повзучості необхідно лише короткочасне незначне збільшення напруження над межею міцності.

Теоретична міцність твердих тіл σ_0 , розрахована за тією чи іншою атомістичною моделлю, у багато разів перевищує реальну міцність σ_p .

Прийнято вважати, що така відмінність між σ_p і σ_0 пояснюється наявністю в реальних твердих тілах (металевих провідниках, кристалі мікросхеми) різного роду дефектів, зокрема мікротріщин, котрі знижують їхню міцність [92]. Поява тріщини довжиною l призводить до концентрації напружень у її краях, якщо до зразка прикладене розтяжне зусилля $F_{\text{вн}}$.

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

$$\sigma_k = \sigma(1 + 2\sqrt{l/a}), \quad (5.3)$$

де σ_k – напруження в краю тріщини;

σ – середнє напруження в поперечному перерізі зразка.

Руйнування зразка настає за такого значення $\sigma = \sigma_p$, за якого

напруження σ_k досягає теоретичної міцності матеріалу σ_0 :

$$\sigma_k = \sigma_p (1 + 2\sqrt{l/a}) = \sigma_0. \quad (5.4)$$

Звідси можна визначити реальну міцність матеріалу σ_p :

$$\sigma_p = \frac{\sigma_0}{1 + 2\sqrt{l/a}} \approx \frac{\sigma_0}{2\sqrt{l/a}}. \quad (5.5)$$

Зі співвідношення (5.5) видно, що реальна міцність тіла тем нижче, чим довшою є тріщина в ньому та чим меншим є радіус кривизни її краю.

Для того, щоб σ_p становила $0,01 \sigma_0$, досить виникнення в тілі тріщин розміром $l = 1$ мкм із радіусом закруглення країв, що дорівнює параметру решітки. Таким чином, механізм руйнування монтажного з'єднання заснований на зародженні та розвитку тріщин і мікротріщин у середовищі, що сформувався під час утворення з'єднання мікроструктури, що включає дефекти [98]. Значна концентрація напружень біля країв тріщини призводить до умов, коли час руйнування матеріалу стає значно меншим за час релаксації, тобто до забезпечення мінімального впливу процесу руйнування на перебудову структури матеріалу в прилягаючих до поверхні розриву областях. Практично такі умови можуть бути реалізовані за такого режиму випробування мікроз'єднання на міцність, коли значні деформації досягаються протягом декількох секунд, що призводить до короткочасної повзучості, і процес характеризується крихким руйнуванням [99-100].

У процесі УЗ-зварювання мікропровідників модулів ЕТ на основі алюмінієвих ГКС [101] створюються достатні умови для реалізації такого механізму руйнування. Можна зробити припущення про наявність двох джерел формування середовища, що містить дефекти структури: по-перше, частки сторонніх речовин; по-друге, продукти фізико-хімічних реакцій на поверхні та

в об'ємі вихідних матеріалів, утворюючих зварне з'єднання (ЗЗ). Ці джерела мають велику інтенсивність на етапі активації ЗЗ під час мікро монтажу [102-104], особливо у разі відсутності захисного середовища.

Видалення сторонніх речовин з поверхні алюмінієвих мікропровідників (тонкої оксидної та жирової плівок) є принципово неможливим у реальних умовах монтажу, оскільки навіть за умови ідеального очищення поверхні від мінеральних і органічних забруднень поверхня металу має настільки високу активність, що практично миттєво покривається тонким оксидним шаром, який утворюють на ній адсорбовані плівки.

Таким чином, можна припустити, що підготовлені для з'єднання поверхні є досить потужним джерелом концентрації сторонніх часток, які послабляють міцність матеріалу та визначають механізми початку процесу руйнування, виникнення та розвитку тріщин. Значне збільшення напруження на кінцях тріщини, що розвивається, обумовлює ослаблення процесів повзучості у бік крихкого руйнування. Розвиток мікротріщин відбувається в шарі матеріалу, структура та властивості якого можуть визначатися характером фізико-хімічної взаємодії, у котрій беруть участь з'єднані поверхні, за участі зовнішніх факторів, які обумовлюють значний внесок у недосконалість структури та склад зварного мікроз'єднання.

5.3 Дослідження впливу конструктивно-технологічних факторів на кінетику формування зварних міжз'єднань

Якість і надійність з'єднань металевих мікровиводів електронних компонентів модулів ЕТ на основі алюмінієвих ГКС багато в чому визначається правильним вибором конструктивно-технологічних параметрів зварних вузлів, забезпеченням металургійної сумісності, високої електропровідності, механічної міцності та мінімізацією напружено-деформованого стану [105].

Фізичні основи процесу утворення нероз'ємних зварних з'єднань алюмінієвого провідникового шару у виробництві модулів ЕТ досить повно вивчені [94-95, 104-106].

Більшість дослідників [104] констатують факт, що міцність і надійність з'єднання типу Al-Al [107] характеризуються високими показниками внаслідок відсутності гетерогенних дифузійних процесів під час зварювання та протягом наступного температурного старіння. Так, під час прискорених випробувань (витримка за 300 °С протягом 150 годин) цілісність зварних з'єднань типу Al-Al зберігається, а в результаті відриву дроту відбувається розрив у місці переходу виводу у зварне з'єднання. Металографічний аналіз косих мікрошліфів показав, що зона взаємодії типу Al-Al має металевий блиск і незначні включення окислів алюмінію [106, 108].

Однак за надмірної деформації виводів (більшої за 60 %) і за непаралельності поверхні виводу відносно торця інструмента має місце гранично низьке (до 4 %) зусилля на відрив – $9 \cdot 10^{-2}$ Н.

В умовах використання автоматизованого ультразвукового зварювального устаткування застосування мікродроту з великим розкидом по перерізу призводить до нестабільності міцності контактів [103-104]. Зміна перетину провідників у процесі зварювання за заданих технологічних режимів впливає на міцність з'єднань тому, що питомий тиск на зварювані елементи змінюється внаслідок зміни ступеня деформації. За заданих режимів мікрозварювання існує певна межа деформації мікродроту, коли питомий тиск дорівнюватиме питомому опору пластичної деформації.

У той же час використання плоских стрічкових виводів у конструкції модулів ЕТ замість дроту дозволяє багато в чому уникнути проблем, пов'язаних зі змінним перетином дроту (діаметр 30 мкм), тому що ширина стрічкового виводу (фольги) становить 100 – 200 мкм і фактор різної товщини згладжується за рахунок інтегральної картини зварного з'єднання. До того ж стрічковий вивід гнучкого носія надходить на зварювальний монтажний стіл у готовому

вигляді та не зазнає зовнішніх впливів протяжних механізмів, як у випадку подачі дроту.

У теперішній час алюмінієві сплави характеризуються високою технологічністю за обробки тиском, легко прокочуються у вигляді фольги товщиною 20 – 30 мкм. Відомо [109], що надійність з'єднання, отриманого за допомогою ультразвукового зварювання, багато в чому визначається хімічним складом алюмінієвої фольги (рис. 5.1 та рис. 5.2).

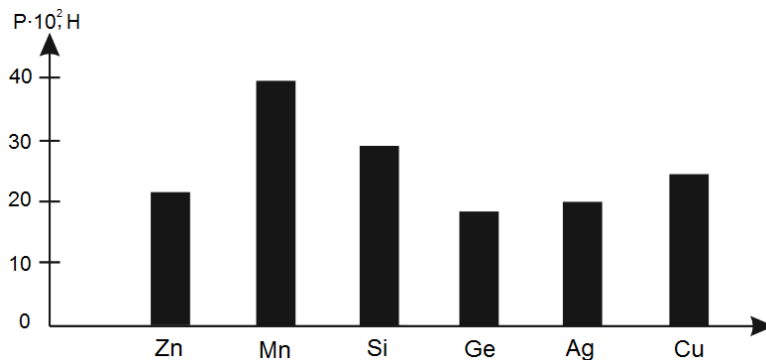


Рисунок 5.1 – Залежність зусилля відриву зварного з'єднання алюмінієвої фольги зі стрічковим виводом від виду легуючого елемента фольги

При цьому змінюються і механічні властивості самої фольги (рис. 5.2).

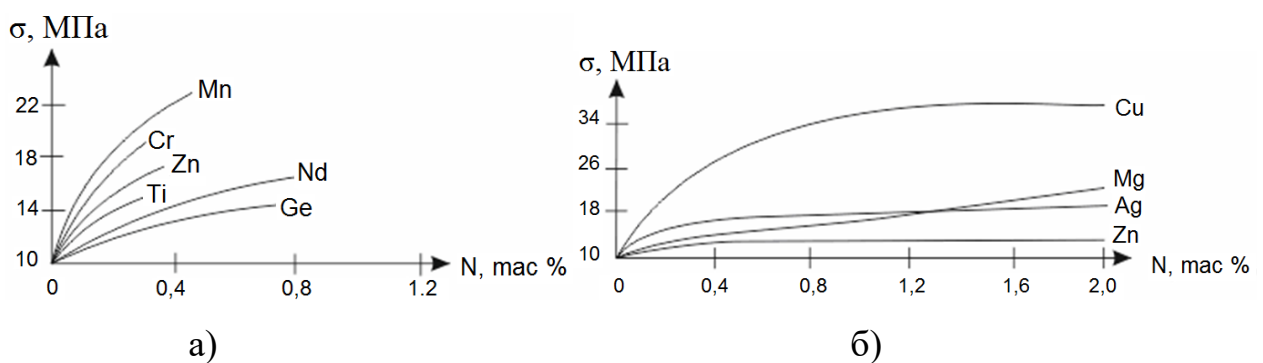


Рисунок 5.2 – Залежність межі міцності алюмінієвої фольги від концентрації легуючих елементів: а) елементи з розчинністю до 0,8 %; б) елементи з розчинністю до 2 %

Однак найбільш оптимальним є багатокomпонентне легування. Виходячи із міцнісних і економічних параметрів, простоти освоєння в промисловості, у проведених експериментах використано фольгу А5Т за ГОСТ 11069-74, яка одержала найбільше поширення та в композиції з поліімідним покриттям серійно поставляється у вигляді матеріалу ФДІ-А за ТУ БУ0.037.042.

В умовах формування зварного мікроз'єднання плоских алюмінієвих виводів гнучкої комутаційної плати (ГКП) особливих додаткових вимог до матеріалу комутаційної плати (КП) у порівнянні із дротовим способом складання раніше не виявлено [102-103]. Однак, експериментально встановлено, що товщина шару алюмінієвої металізації на ГКП має бути не меншою за 10 мкм. Зменшення товщини призводить до зниження міцності зварного з'єднання мікрровиводів ГКП (рис. 5.3).

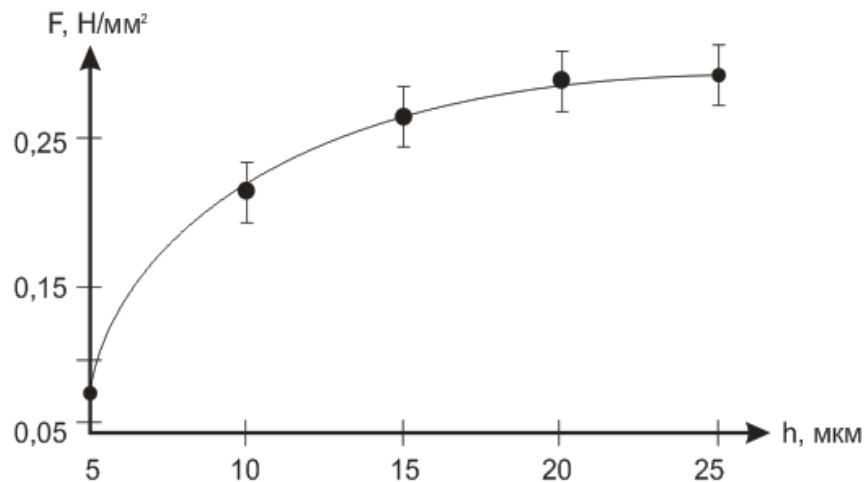


Рисунок 5.3 – Залежність міцності мікроз'єднання від товщини шару алюмінію на поліімідній підкладці

Процес з'єднання дротових виводів з металізованими контактними площинками на поліімідній підкладці вивчено досить повно [102-104, 110]. Для випадку з'єднання стрічкових виводів картину кінетичних закономірностей формування з'єднання, в основному, слід вважати ідентичною за винятком деяких допущень, пов'язаних із геометрією виводу, що приварюється, і профілем торця інструмента.

Кінетика формування з'єднання в реальному масштабі часу раніше докладно вивчалася [102-103] за допомогою реєстрації осцилограм, зміни температури в зоні зварювання, контактної електроопору R_k на границі зварювальний інструмент-провідник або провідник-провідник, запису акустичної емісії (рис. 5.4 і рис. 5.5).

Кінетику формування з'єднання у процесі УЗ-зварювання подібних зразків можна представити у такий спосіб. До ввімкнення ультразвукових коливань (УЗК) під дією статично прикладеного навантаження на інструмент через деформацію провідника створюється деяка первісна площа контактування по границях розділу інструмент-дріт і дріт-контактна площинка.

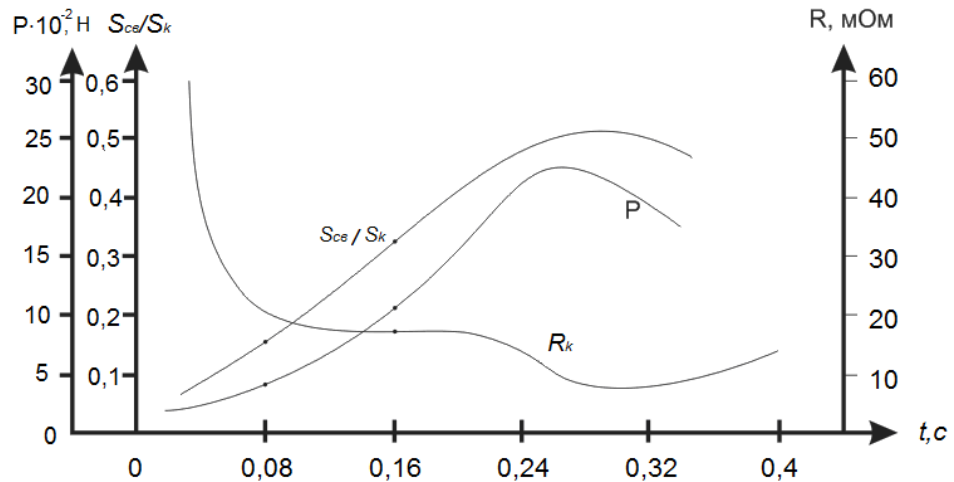


Рисунок 5.4 – Характер зміни міцності (P) та електроопору (R_k) контакту, відношення площі зварного з'єднання ($S_{св}$) до загальної площі контакту S_k від часу (t) для контактних пар Al-Al у процесі УЗ-мікрозварювання

Після ввімкнення УЗК у результаті активуючої дії ультразвуку, що знижує границю текучості алюмінію, полегшується пластична деформація провідника та йде інтенсивне осідання його, про що свідчить різке зростання ширини контакту й інтенсивності акустичної емісії.

При цьому через наявність канавки (канавок) на робочому інструменті процеси тертя спочатку йдуть, в основному, на контактній поверхні дріт-контактна площинка, що і підтверджують експериментальні дані щодо різкого

зростання та наступного спаду R_k (рис. 5.4).

На цій стадії в зоні тертя відбувається значне тепловиділення, яке різко підвищує температуру в зоні зварювання (рис. 5.5), сприяючи прискоренню пластичної деформації провідника.

Таким чином, УЗ-коливання під час монтажу, насамперед, створюють умови для швидкого формування фізичного контакту [87]. Одночасно із цим відбувається активація контактних поверхонь, що призводить до утворення точок взаємодії в умовах пластичної деформації алюмінію та пружної деформації поліімідної підкладки. Під час осадження алюмінієвого провідника окисна плівка на ньому розтріскується і у зону контакту виходить чистий алюміній, розтікання якого по поверхні сприяє видаленню із зони зварювання забруднень і залишків окисних плівок.

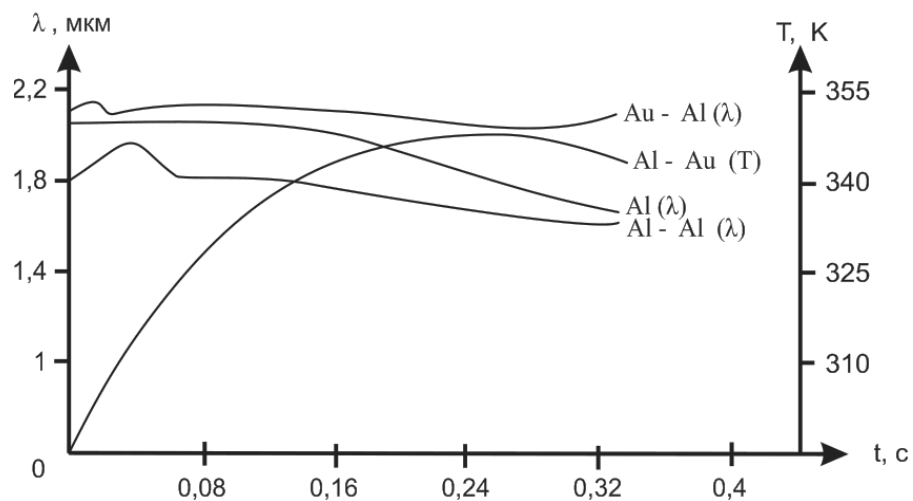


Рисунок 5.5 – Характер зміни температури T і амплітуди коливань (λ) для контактних пар у процесі УЗ-зварювання

За наявності УЗ-коливань у зоні контакту різко зростають дотичні напруження за рахунок інтенсивного переміщення поверхонь, які труться, що призводить до локалізації пластичної деформації в поверхневих шарах і різкого градієнту щільності структурних дефектів у контактній поверхні.

Під дією структурної та термічної активації в зоні тертя утворюються перші дискретні точки взаємодії, які розростаються потім у результаті

протікання дифузійних процесів [99], котрі значно прискорюються в умовах пластичної деформації провідника та тертя його по поверхні контакту з одночасним накладенням ультразвукового поля [103, 109]. Природно припустити, що під час УЗ-зварювання під впливом надзвичайно великих пластичних деформацій у приконтактних шарах і короткочасних температурних спалахів, які виникають у зоні тертя, перші точки взаємодії утворюються за відносно невеликого збільшення температури. Наявність перших точок взаємодії за дуже малих значень часу зварювання підтверджується експериментально за допомогою металографічних досліджень [103, 106], і, крім того, контакти, отримані за такі малі проміжки часу зварювання, мають уже деяку міцність, але сумарна площа точок взаємодії при цьому є малою (рис. 5.5).

Надалі, зі збільшенням площі контактування та щільності точок взаємодії, опір переміщенню мікропровідника верхнього шару щодо мікропровідника нижнього шару зростає настільки, що, в основному, відбувається переміщення інструмента вже щодо верхнього провідника. При цьому різко зростає спадання напруження на границі розділу інструмент-провідник. Ця границя і є тепер джерелом тепла. Слід зазначити, що температура в зоні зварювання під дією обох джерел тепла, які мов би міняються місцями, увесь час зростає до певного моменту (рис. 5.6).

Характерно, що після досягнення максимальної температури в зоні зварювання відбувається вторинне осідання провідника. Це добре підтверджується різким спаданням напруження, а також різким падінням опору R_k у зоні «провідник-поліімід». Крім того, цьому часовому інтервалу відповідає найбільш інтенсивне зростання площі S_{cv} , (S_{cv}/S_k) і, відповідно, міцності зварного з'єднання P (рис. 5.4). Причому максимальний приріст міцності зварного з'єднання відбувається, в основному, за час активної деформації провідника. Перегини на кривих R_k відповідають затримці по деформації провідника через деформаційне зміцнення алюмінію у процесі первинного осідання та різкого зменшення питомого тиску зварювання через приріст площі

контактування зварюваних матеріалів за постійної величини навантаження на зварювальний інструмент. Зі збільшенням параметрів УЗ-зварювання окремі стадії процесу накладаються одна на одну.

Значний інтерес представляють дослідження з вивчення характеру міцності монтажного мікроз'єднання в часі з одночасною зміною деформації виводів. Проводилися дослідження [109, 111] ультразвукового зварювання алюмінієвого стрічкового виводу з матеріалу марки А-995Д з перетином $242 \times 18 \text{ мкм}^2$ з алюмінієвим провідниковим шаром ГКП. Деформація вимірювалася за зміною ширини стрічкового виводу в зоні зварювання через певні проміжки часу, а потім розраховувалася швидкість деформації. Максимальна швидкість деформації (рис. 5.6) відповідає максимальній міцності мікрозварного з'єднання, при цьому площа активної зони досягає найбільших розмірів.

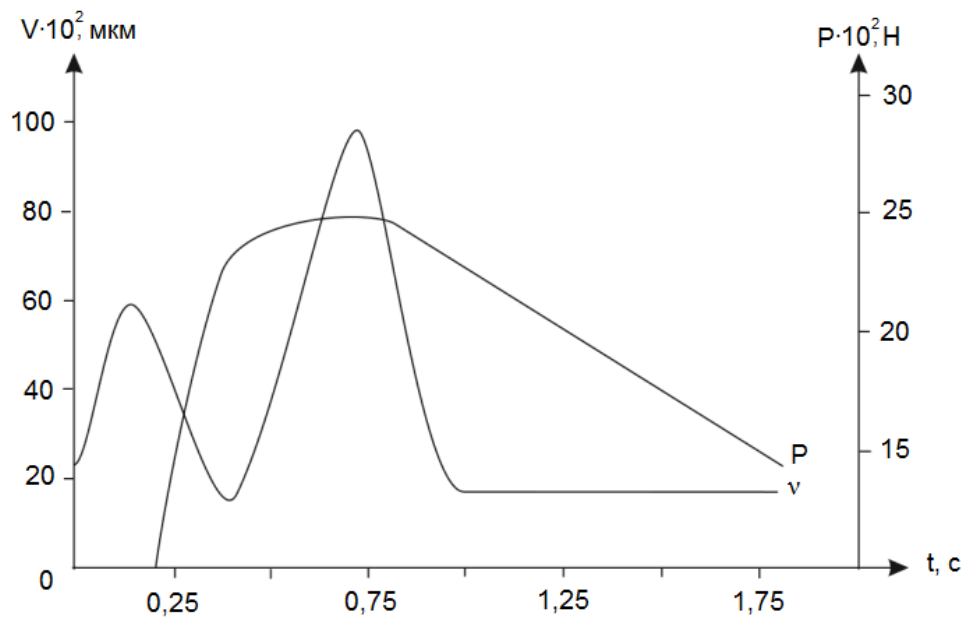


Рисунок 5.6 – Залежність швидкості деформації (v) і міцності зварного з'єднання (P) від часу зварювання [8]

Виходячи з того, що міцність зварного мікроз'єднання визначається швидкістю деформації, то пластичність виводу має бути максимальною. У зв'язку з цим проводилися дослідження режимів відпалення [103, 109, 112], які забезпечують максимальну пластичність. Досліджувалися виводи з алюмінію

марки А-995Д, котрі мають круглий і прямокутний перерізи. Температура відпалювання була кратною 100 К. Час відпалювання становив $1,8 \times 10$ с. Середовище відпалювання – повітря та водень. Випробування зразків на розрив і на визначення їх пластичності проводилися на розривній установці за швидкості розтягування 16×10^{-6} м/с.

Встановлено [106], що максимальна пластичність виводів (8 %) досягається за температури відпалювання 573 К, а середовище відпалювання істотного впливу на досліджувані механічні властивості виводів не виявляє. Крім того, слід зазначити, що встановлена температура відпалювання, яка відповідає максимальній пластичності виводів, відповідає температурному інтервалу рекристалізації для алюмінію високої чистоти 563-583 К [109], що відповідає температурному інтервалу імідизації полііміду під час виготовлення поліімідних ГКС.

5.4 Моделювання напружено-деформованого стану отриманих зварних між'єднань

У міру ускладнення конструкцій нових видів модулів ЕТ на основі ГКС може знижуватися ефективність їх проектування, виробництва та експлуатації [113], зокрема за їх широкого впровадження у конструкціях електричних між'єднань модулів ЕТ [29]. Також для багат шарових ГКС слід враховувати взаємодію між матеріалами шарів, використовувати конструкцію, яка забезпечує безскладальне виготовлення, щоб уникнути потенційно можливих проблем із різним ступенем розширення та гнучкості шаруватого матеріалу, зі зміщенням матеріалу, впливом вологості та ін. [114-115].

Найбільш небезпечними поширеними видами впливів [116], за яких відбувається руйнування ГКС, є пружно-пластичні деформації від багаторазових згинань або так звана малоциклова втома матеріалу (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 – Вигин ГКС

Деформації згинання виникають у пересувній мобільній апаратурі, в якій гнучкі шлейфи використовуються для з'єднання двох або більш жорстких модулів, які обертаються або коливаються один відносно іншого, наприклад ноутбуки, датчики, маніпулятори, антени та ін. Така деформація може призвести до відшарування фольгованого провідника від діелектричної основи, виникненню тріщин в провідниках. Визначаючим параметром виникнення дефектів є радіус перегину шлейфу [117-118].

У ході виконання дисертаційної роботи також проводилося дослідження залежності параметрів довговічності поліімідних шлейфів із мідними провідниками від конструктивно-технологічних рішень двошарових структур для розробки рекомендацій зі збільшення довговічності та стійкості ГКС у складі модулів ЕТ і МЕМС.

Проведено дослідження НДС матеріалів гнучкого шлейфа на прикладі вигину плати, що складається з двох різнорідних матеріалів: алюмінієвого провідника та поліімідної плівки (рис. 5.8).

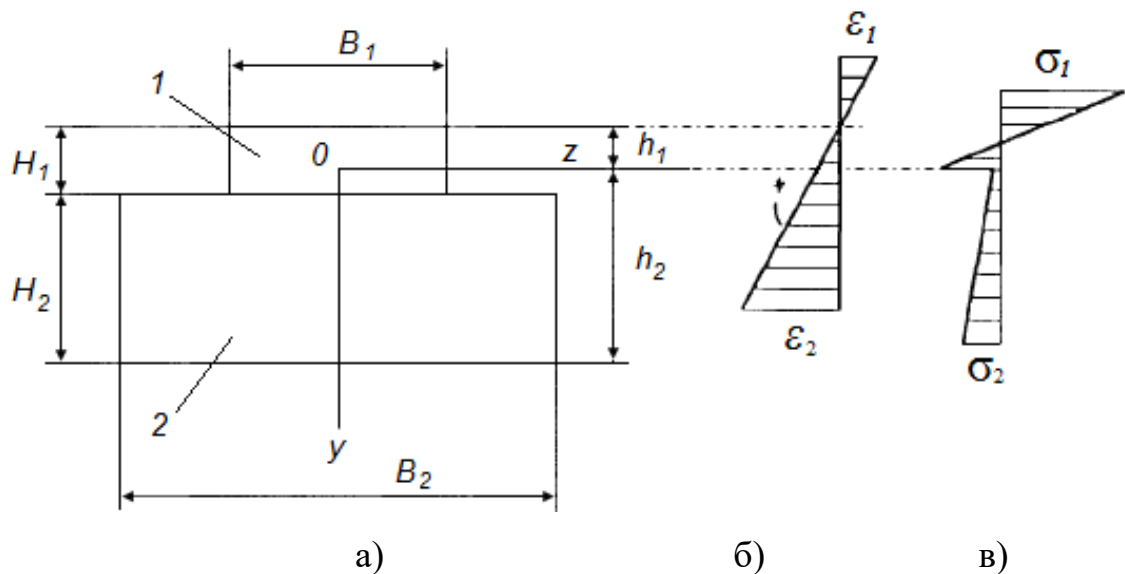


Рисунок 5.8 – Досліджуваний зразок ГКС

Дослідження матеріалів гнучкого шлейфу під час багаторазових перегинів зазнають циклічних пружно-пластичних деформацій і працюють в області малоциклової втоми.

Виділимо з шлейфу типовий елемент у вигляді балки. Поперечний переріз і його основні розміри представлені на рис. 5.9. Під час розрахунку використовуємо теорію вигину композитних балок [14, 119].

Припустимо, що балка знаходиться в стані чистого вигину, стислі волокна вгорі, розтягнуті внизу. Знайдемо положення нейтральної лінії поперечного перерізу, де нормальні напруження дорівнюють нулю $\sigma = 0$.



а – поперечний переріз; б – розподіл деформацій; в – епюра напружень вздовж осі X (довжини); 1 – мідний провідник; 2 – поліімідна плівка

Рисунок 5.9 – Поперечний переріз елемента гнучкого шлейфа й основні розміри

Нормальні напруження, що діють по осі X у алюмінієвому провіднику σ_1 і поліімідній плівці σ_2 під ним визначимо з рівнянь:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \varepsilon_1 E_1 = \frac{y}{\rho} E_1 = \lambda_1 y E_1, \\ \sigma_2 &= \varepsilon_2 E_2 = \frac{y}{\rho} E_2 = \lambda_2 y E_2,\end{aligned}\tag{5.6}$$

де ρ – радіус кривизни балки;

λ – кривизна, $\lambda = 1/\rho$;

y – відстань від нейтральної лінії, що збігається з віссю Z ;

E_1, E_2 – модулі пружності міді та полііміду.

Положення нейтральної лінії визначимо з умови рівності нулю сумарної осьової сили в поперечному перерізі:

$$\int_1 \sigma_1 dF + \int_2 \sigma_2 dF = 0,$$

де $dF = dy \cdot b_i$.

З використанням (5.2) отримаємо:

$$E_1 \int_1 y dF + \int_2 y dF = 0, \quad (5.7)$$

де інтеграли є статичними моментами площі поперечного перерізу алюмінію і полііміду щодо нейтральної лінії.

Згинальний момент балки може бути визначений за формулою:

$$M = \int \sigma y dF = \int_1 \sigma_1 dF + \int_2 \sigma_2 dF = \frac{E_1 J_1 + E_2 J_2}{\rho}, \quad (5.8)$$

де J_1, J_2 – моменти інерції площі 1 і 2 щодо нейтральної лінії.

Спільне рішення рівнянь (5.6) і (5.8) дозволяє знайти закон розподілу напружень в балці в залежності від моменту вигину:

$$\sigma_1 = \frac{MyE_1}{E_1 J_1 + E_2 J_2}, \quad \sigma_2 = \frac{MyE_2}{E_1 J_1 + E_2 J_2}.$$

Розглянемо приклад визначення нейтральної лінії для базового варіанту гнучкого шлейфа, що має наступні розміри: товщина алюмінію $H_1 = 15$ мкм і полііміду $H_2 = 50$ мкм; ширина міді $B_1 = 70$ мкм і полііміду $B_2 = 140$ мкм.

Фізико-механічні властивості матеріалів представлені в табл. 5.2, де α – коефіцієнт температурного лінійного розширення (КТЛР), E – модуль пружності, μ – коефіцієнт Пуассона, $[\sigma]$ – допустимі напруження.

Таблиця 5.2 – Фізико-механічні властивості матеріалів гнучкого поліімідного шлейфа

Матеріал	$\alpha \cdot 10^6, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$E \cdot 10^{-5}, \text{ МПа}$	μ	$[\sigma], \text{ МПа}$
Алюміній	17	1,0	0,33	
Поліімід	20	0,03	0,3	170

Оскільки $E_1 \gg E_2$ ($E_1 = 10 \text{ МПа}$, $E_2 = 3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$), припустимо, що нейтральна лінія розташована в частині 1. Позначимо відстань від нейтральної лінії (oz) до верхньої і нижньої поверхні балки h_1 і h_2 відповідно.

При записі компоненту рівняння (5.7) в якості одиниць виміру використовуємо Ньютони і мікрометри, тоді:

$$E_1 \int_1 y dF = 10^{-1} \left[\left(\frac{h_1}{2} \right) h_1 B_1 + \left(\frac{H_1 - h_1}{2} \right) (H_1 - h_1) B_1 \right] = 3,5(225 - 30h_1),$$

$$E_2 \int_2 y dF = 13 \cdot 10^{-3} \left[\left(H_1 - h_1 \frac{H_2}{2} \right) H_2 B_2 \right] = 21(40 - h_1).$$

Підставимо ці величини в рівняння (5.7) і знайдемо координату нейтральної лінії – $h_1 = 13$ мкм. Вище нейтральної лінії волокна шлейфу стиснуті, нижче – розтягнуті. Аналогічно знайдемо положення нейтральної лінії для шлейфа з товщиною мідного провідника $H_1 = 35$ мкм – $h_1 = 21$ мкм.

З формул (5.6-5.8) видно, що напруження в матеріалах шлейфу прямо пропорційні кривизні балки і модулю пружності. Епюра деформацій по висоті

перерізу лінійна (рис. 5.9, б), а еюра напружень пилоподібна (рис. 5.9, в), оскільки модулі пружності алюмінію і поліімиду різні. Причому, градієнт зміни напружень σ_1 істотно вище, тому що $E_1 > E_2$.

Руйнування гнучких шлейфів обумовлено низьким показником циклової втоми міді, яка супроводжується пружно-пластичною деформацією, появою і поширенням ушкоджень. Число циклів навантаження не перевищує 104...105.

З літературних джерел відомо, що довговічність гнучких шлейфів при радіусі перегину 1...10 мм становить 200...104 циклів.

Тому для оцінки довговічності матеріалів використовують критерії Коффіна-Менсона у вигляді:

$$N = 0,25(\varepsilon_B / \varepsilon_{II})^2, \quad (5.9)$$

де ε_B – залишкова відносна деформація матеріалу при розриві;

ε_{II} – розмах відносної циклічної пластичної деформації.

$$\varepsilon_{II} = \Delta\varepsilon - \varepsilon_y = \frac{2\sigma}{E^*} - \frac{2\delta_T}{E},$$

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

ε_y – пружна відносна деформація;

σ – максимальне напруження;

δ_T – межа текучості матеріалу;

E^* – модуль пружності матеріалу за межами пружності, для алюмінію $E^* = (0,05...1) E$.

З формули (5.9) видно, що при підвищенні ε_{II} у 10 разів, довговічність матеріалу знижується у 100 разів.

Для підвищення довговічності необхідно зниження напружень і деформацій, що досягається обмеженням радіусу перегину шлейфа (5.6).

Величину відносної деформації при вигині обчислюють за формулою $\varepsilon = y/\rho$. Для алюмінію допустима відносна деформація (коли деформації залишаються пружними) становить $\varepsilon_y = 0,002$. Тоді допустимий радіус перегину для провідників знайдемо з формули:

$$[\rho] = \frac{Y_{\max}}{\varepsilon_y} = \frac{h_1}{\varepsilon_y}. \quad (5.10)$$

На рис. 5.10 представлена залежність допустимого радіусу перегину від товщини провідників, отримана за допомогою формули (5.10).

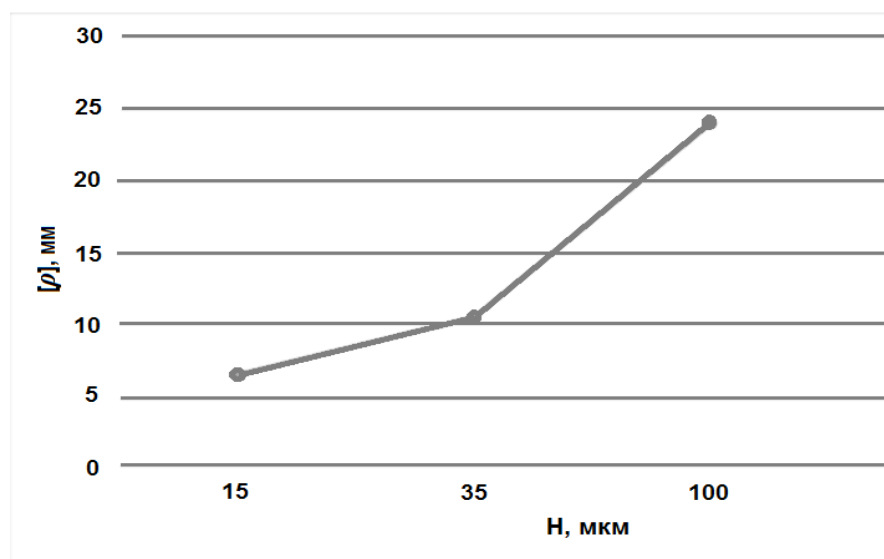


Рисунок 5.10 – Залежність допустимого радіусу перегину від товщини провідника шлейфу

При дослідженні впливу конструктивно-технологічних факторів на міцність шлейфів використовували програмний комплекс SolidWorks.

Моделювання та аналіз характеристик міцності проводили за допомогою програмного комплексу Simulation, інтегрованого в CAD-систему SolidWorks (рис. 5.11). Програмний комплекс заснований на методі кінцевого елемента.

Метод кінцевого елемента дозволяє апроксимувати суцільну середу з нескінченним числом ступенів свободи сукупністю простих елементів, що

мають кінцеве число ступенів свободи і пов'язаних між собою в вузлових точках. Розбиття конструкції на кінцеві елементи малих розмірів дозволяє врахувати неоднорідність матеріалу і конструкції, її конструктивні і технологічні особливості [105].

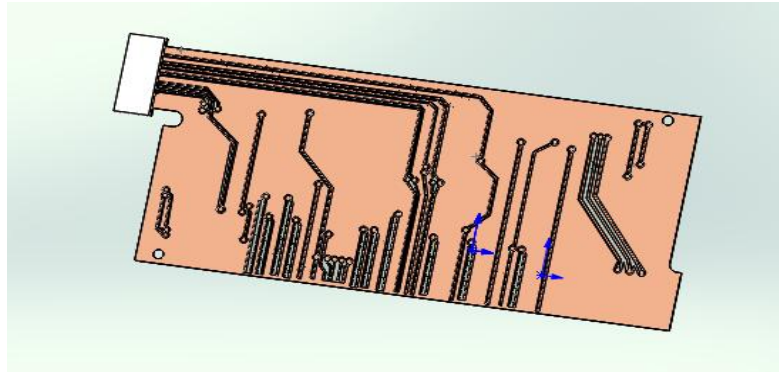


Рисунок 5.11 – 3D-модель досліджуваного зразку у CAD-системі SolidWorks

Базова кінцева елементна модель зразку мала радіус перегину 5 мм (геометричні параметри поперечного перерізу – $H_1 = 15$ мкм, $H_2 = 50$ мкм, $B_1 = 70$ мкм, $B_2 = 140$ мкм). Перегин шлейфу здійснювали навколо жорсткого ролика ($\rho = 5$ мм). Розглядали НДС матеріалів шлейфу при переміщенні кінця шлейфа на 5 мм.

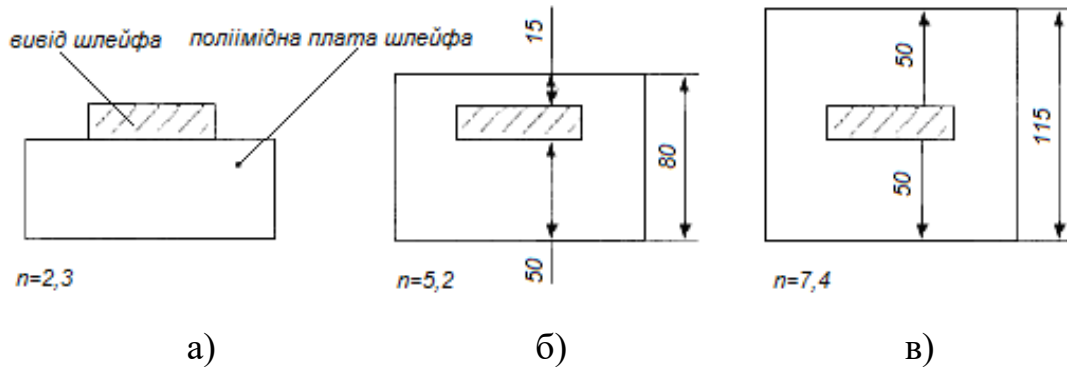
На рис. 5.12 представлені різні форми шлейфів: а – базовий варіант, провідник на плівці; б – провідник в плівці розташований несиметрично; в – провідник в плівці розташований симетрично. На рис. 5.12 представлені також розрахункові коефіцієнти запасу міцності для міді, визначені за формулою:

$$m = [\sigma] / \sigma_{\text{екв}},$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження (табл. 5.2);

$\sigma_{\text{екв}}$ – еквівалентне максимальне напруження, визначене з використанням кінцево-елементних моделей.

НДС матеріалів базової моделі «а» показано на рис. 5.12. Максимальні напруження в мідному провіднику на його поверхні складають 53 МПа, що відповідає запасу міцності $n = 2,8$.



без захисного покриття (а), з товщиною покриття рівній товщині виводу (б) і з товщиною покриття рівній товщині поліімідної плати (в)

Рисунок 5.12 – Залежність запасу міцності n виводів шлейфа від конструкції шлейфа

Розподіл напружень по висоті перерізу лінійне. У моделі «б» максимальні напруження склали 29 МПа, запас міцності $n = 5,2$. У моделі «в» $\sigma_{max} = 20,2$ МПа, $n = 7,4$.

Видно, що використання поліімідних захисних покриттів (варіант б і в) дозволяє істотно підвищити міцність провідників – запас міцності зростає в 1,8 ... 2,55 рази.

Еквівалентні напруження (Von Mises, Па) розраховані за гіпотезою енергії зміни форми:

$$\sigma = \sqrt{\left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]},$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

Діаграми розподілу еквівалентних напружень представлені на рис. 5.13–5.15 у вигляді ізоліній на тлі деформованої моделі шлейфу.

Аналіз НДС матеріалів шлейфа з товщиною мідних провідників 35 мкм вказує, що несуча здатність шлейфу істотно підвищується в порівнянні з базовою товщиною провідників.

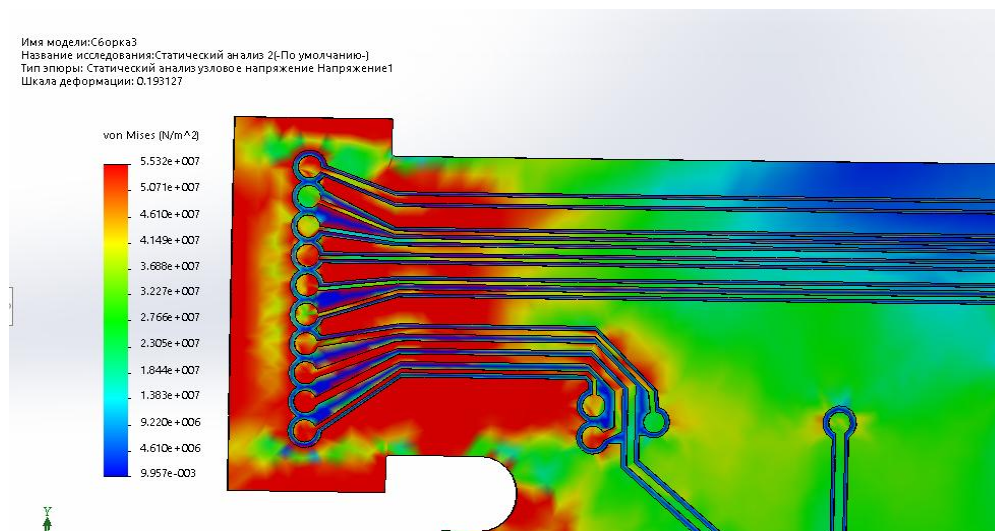


Рисунок 5.13 – Напружено-деформований стан у матеріалах шлейфу базової моделі

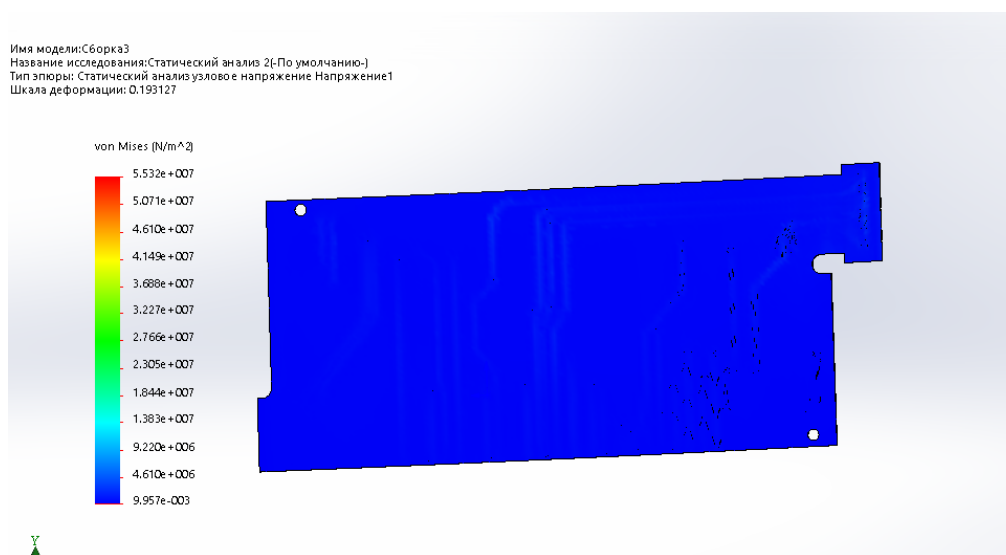


Рисунок 5.14 – Напружено-деформований стан у шарі поліімідної плівки

Для оцінки впливу товщини провідників на міцність шлейфу розроблена модель, де перегин здійснювали при постійному навантаженні (рис. 5.15) – згинальний момент дорівнює 21 Н·мкм. За умови збільшення товщини

провідника з 15 до 35 мкм (у 2,33 рази) напруження в міді знизилися з 391 МПа до 194 МПа, міцність підвищилася в 2,04 рази [105, 120].

Великий інтерес представляє завдання термопружності шлейфу. Була розроблена модель із зовнішнім навантаженням у вигляді нагрівання шлейфу на 100 °С (рис. 5.16).

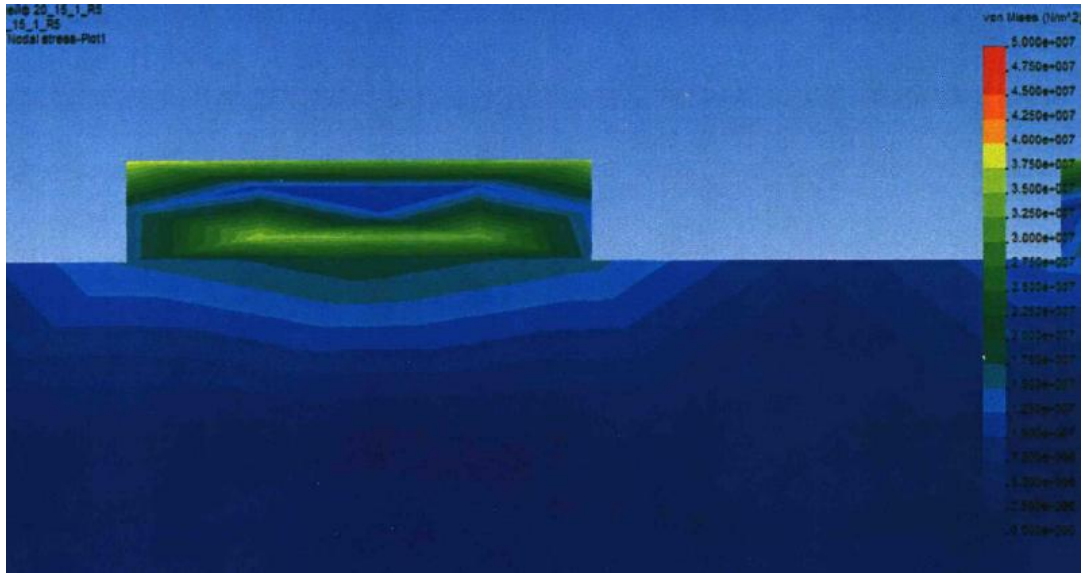


Рисунок 5.15 – Термо-пружні напруження в перетині шлейфу під час нагрівання до 373 К

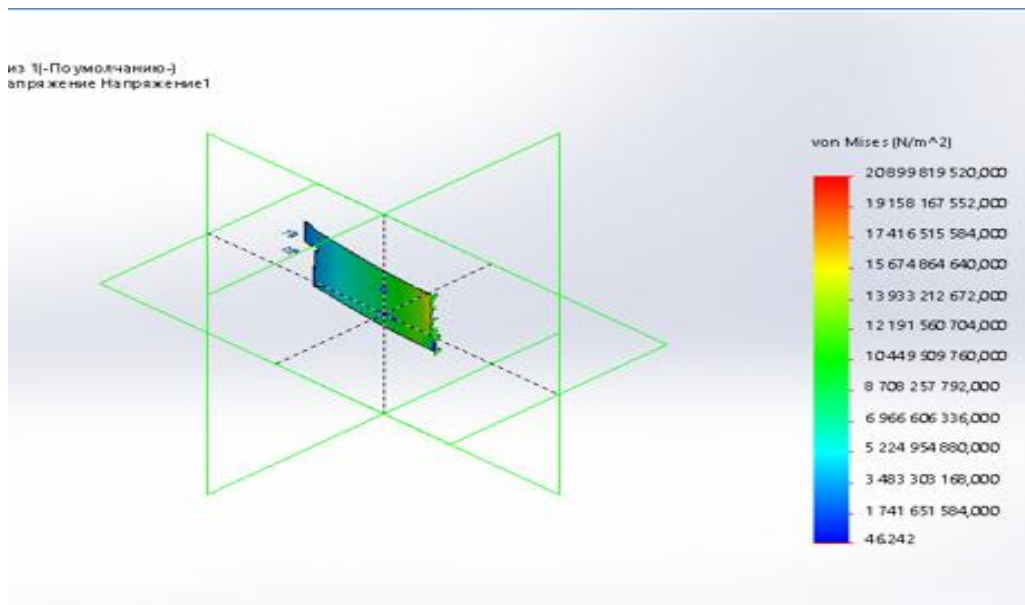


Рисунок 5.16 – Напружено-деформований стан шлейфу за постійного силового навантаження з провідниками товщиною 35 мкм

Під час нагрівання шлейф згинається в бік елемента з меншим КТЛР – мідь знаходиться у стиснутому стані. Нейтральний шар має складну просторову форму. Характер розподілу напружень відповідає фізичній природі взаємодії різнорідних матеріалів. Концентрація напружень локалізується на поверхні мідних провідників, у місцях зміни форми з'єднуються [118].

У місцях концентрації напружень кольорові ізолінії розподілу еквівалентних напружень викривляються з підвищенням їх щільності [105].

Максимальні напруження в міді склали 50 МПа, що відповідає запасу міцності $n = 3$.

5.5 Висновки до розділу 5

Виходячи з загальних завдань дослідження, були проаналізовані фізико-хімічні процеси, які спостерігаються під час формування та руйнування монтажних з'єднань, і проведений аналіз впливу конструктивно-технологічних факторів (технологічних режимів) процесу монтажу на якість і надійність одержуваних з'єднань.

Для дослідження фізико-хімічних процесів, котрі спостерігаються під час формування та руйнування зварних мікроз'єднань, застосовані положення теорії руйнування твердих тіл. Запропоновано розглядати процес руйнування як дію явищ повзучості та крихкого руйнування, за умови перевищення припустимої межі міцності напруженнями, котрі виникають у результаті дії зовнішніх сил.

В ході досліджень встановлено, що якість і надійність монтажних з'єднань, отриманих за допомогою УЗ-зварювання, багато в чому визначається правильним вибором конструктивно-технологічних параметрів зварних вузлів, забезпеченням металургійної сумісності, високої електропровідності, механічної міцності та мінімізацією напружено-деформованого стану матеріалів, які утворюють монтажне з'єднання.

Встановлено, що відтворюваність міцності зварних мікроз'єднань у

модулях ЕТ на заданому в технічній документації рівні забезпечується оптимізацією значень наступних основних технологічних параметрів (факторів): зусилля навантаження, потужності імпульсу та часу зварювання, а також правильним добором зварюваних матеріалів з відповідними фізико-хімічними властивостями та складу технологічного оснащення.

У ході дослідження НДС поліїмідної ГКС також було зроблено наступні висновки:

– величина механічного напруження та розмах пружно-пластичної деформації є прямо-пропорційними до кривизни перегину шлейфа. Встановлено залежність допустимого радіуса перегину шлейфа від товщини мідних провідників;

– оцінювати довговічність гнучких шлейфів доцільно за допомогою критерію Коффіна-Менсона з використанням величини циклічної пластичної деформації міді;

– за умови збільшення товщини мідного провідника з 15 мкм до 35 мкм запас міцності гнучких шлейфів зростає у 2,04 рази;

– використання захисних покриттів дозволяє істотно підвищити міцність мідних провідників – запас міцності зростає у 1,8... 2,55 рази;

– концентрація термомеханічних напружень під час нагрівання локалізується на поверхні мідних провідників, у місцях зміни форми з'єднуються. Встановлено, що під час нагрівання шлейфа на 100 °С запас міцності становить $n = 3$.

Як виявлено на основі аналізу технічної літератури, висока роздільна здатність (мінімальний крок) монтажних виводів (балок) шлейфу може бути досягнута за рахунок нових конструктивно-технологічних рішень для монтажної зони шлейфа.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах автора [13-24] (Додаток Г).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [8, 65, 86-120].

РОЗДІЛ 6

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ МОДУЛІВ ЕТ ІЗ ПОЛІМІДНИМИ ГКС У ЇХ СКЛАДІ ЗІ ЗВАРНИМИ МІЖЗ'ЄДНАННЯМИ

6.1 Дослідження технологічних характеристик зварних мікроз'єднань

У виробництві ГКС широко використовуються технологічні процеси складання і монтажу. УЗ-мікрозварювання є одним з основних методів формування міжз'єднань металевих провідників завдяки цілому ряду цінних технологічних властивостей [102, 104].

Вищевказана технологія має істотні переваги, основними з яких є [64]:

- використання цієї технології для безпосереднього з'єднання шарів багат шарових гнучких комутаційних плат між собою і з контактними площинками (відсутність необхідності використання дротяних перемичок);
- ультразвукове зварювання алюмінієвих виводів гнучких комутаційних плат до алюмінієвих контактних площинок забезпечує однорідність, високонадійне та механічно стабільне з'єднання;
- відсутність важких металів (Au, Sn), присутніх при пайці;
- відсутність необхідності обслуговування контактних площинок напівпровідникових приладів, що дозволяє зменшити витрати на їх виготовлення;
- можливість використання стандартного промислового автоматизованого обладнання для основних процесів складання (зварювання, приклеювання і інкапсуляція) [64].

Для ультразвукового зварювання розроблено багато різних за призначенням установок. Установки типів МТУ-0,4, КТУ-0,1 (0,63), КТУ-1,5, ММУ-0,63, АСУ-1,5 дозволяють здійснювати зварювання великої кількості виробів. Для зварювання елементів мікросхем розроблені установки ЭМ-417,

ЭМ-404, УЗСКН-1, напівавтомати МС41П2-1, МС4ПЗ-2, «Контакт-4». Машини марок ЭМ-417, УЗСКН-1, МС4ПЗ-2 призначені для ультразвукового зварювання з підгрівом. Для зварювальних установок використовують генератори з вихідними потужностями від 0,01 до 10,0 кВт. Найчастіше частота струму складає 18, 22, 44 і 66 кГц [89].

В умовах мікромініатюризації модулів ЕТ процеси зварювання повинні бути адаптовані для застосування промислових автоматизованих зварювальних установок типу FK Delvotec-6400, Kulicke & Soffa 8090 і ін [65, 101], які дозволяють забезпечити точність позиціонування при зварюванні $\pm 3 \dots 5$ мкм.

Крім того, формування ультразвукового зварюванням міжз'єднання гнучких плат за допомогою алюмінієвих плоских комутуючих елементів замість дроту дозволяє зменшити габаритні розміри і обсяг електронних модулів і не вимагає підвищеної точності та обережності при проведенні процесів складання виробів, щоб не допустити деформації і закороток між ними. Таким чином, плоскі і гнучкі комутуючі елементи на основі алюміній-поліамідних лакофольгових діелектриків дозволяють ще більш мінімізувати масу речовини і робочий об'єм виробів [89].

Однак, для забезпечення якості ГКС, особливо в мікроелектронному виконанні, існує потреба в відтворюваності необхідних конструктивно-технологічних характеристик зварних мікроз'єднань, так як процес утворення монтажного з'єднання характеризується складною взаємодією технологічних факторів (потужності ультразвукового генератора, зварювального зусилля і часу зварювання) [101].

Оптимізація технологічної операції УЗ-мікрозварювання, за рахунок вибору певного поєднання технологічних параметрів процесу мікромонтажу, є ефективним методом підвищення міцності і надійності [87, 117] зварних мікроз'єднань [103].

Загалом ТП складання гнучких алюміній-поліамідних комутаційних структур зі зварними міжз'єднаннями, за винятком етапів виготовлення

мікрокабелів включає наступні основні етапи: 1) підготовка гнучкої плати до встановлення компонентів; 2) встановлення компонентів та їх позиціонування; 3) монтаж навісних компонентів УЗ-мікрозварюванням; 4) електричний контроль з'єднань; 5) захист зварних з'єднань від зовнішніх впливів; 6) вихідний контроль.

Розроблений типовий технологічний процес складання гнучких алюміній-поліімідних комутаційних структур зі зварними міжз'єднаннями, виконаними за допомогою УЗ-зварювання наведено на рис. 6.1. Маршрутну карту на вказаний ТП наведено в Додатку Б.

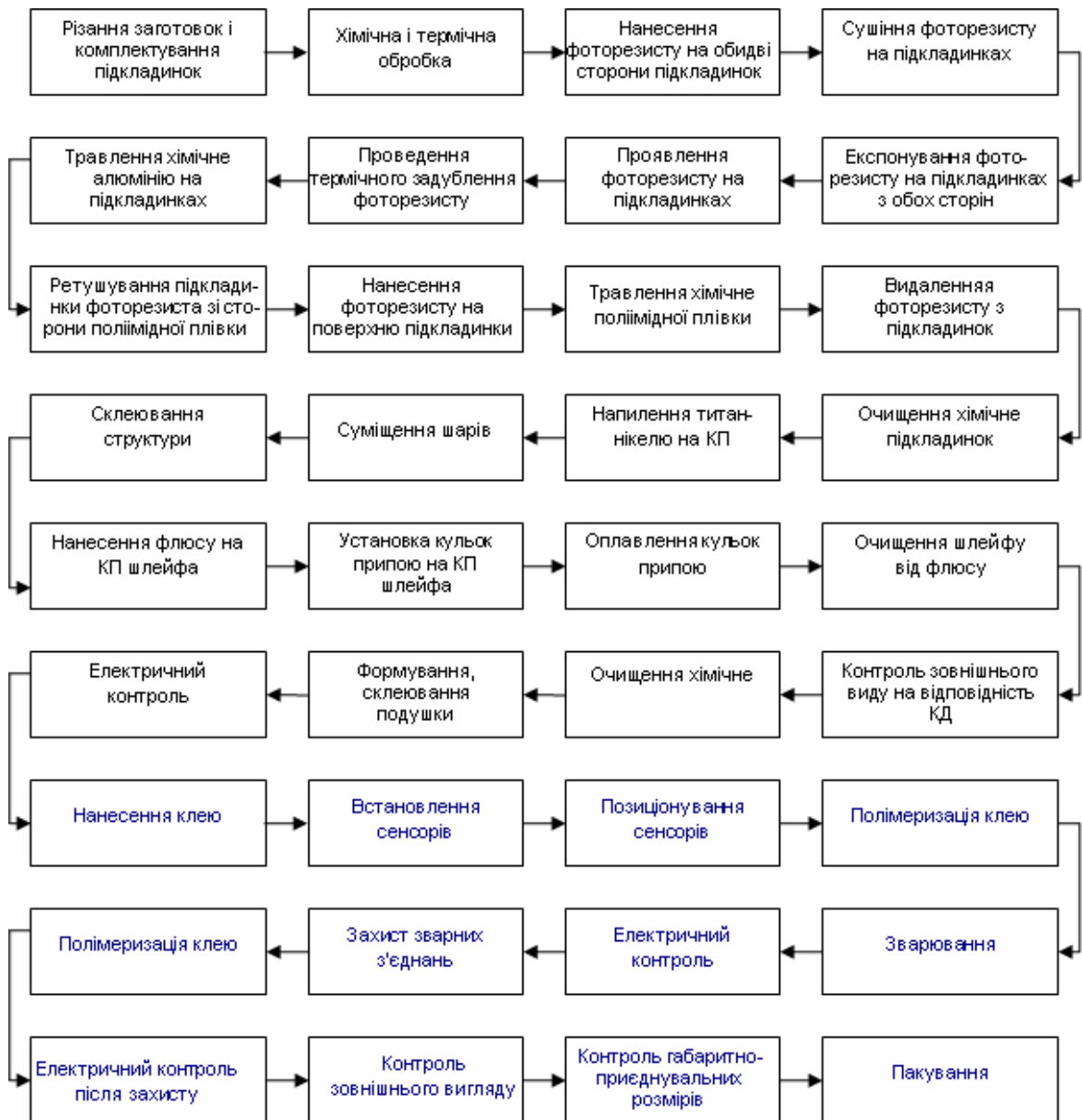


Рисунок 6.1 – Розроблений ТП складання

В наступному підрозділі параметри функціонування розробленого ТП буде проаналізовано за допомогою математичної моделі функціонування технологічного процесу складання модулів ЕТ, створеної за допомогою програмних засобів системи GPSS World.

6.2 Побудова імітаційної моделі ТП складання модулів ЕТ на основі поліїмідних гнучких структур

Метою даного етапу дисертаційних досліджень є побудова імітаційної моделі [121-123] технологічного процесу складання модуля ЕТ на алюміній-поліїмідній основі з використанням математичного апарату та засобів моделювання GPSS World на основі теорії масового обслуговування – для визначення відсотка виходу придатних виробів, виготовлених на технологічній лінії складання за встановлений проміжок часу.

Під час моделювання технологічного процесу складання модулів ЕТ із використанням математичного апарату та спеціальних інструментальних засобів (GPSS World) теорії масового обслуговування, в загальному випадку, вирішуються дві задачі: назвемо їх прямою та зворотною [124-128].

Пряма задача полягає у визначенні оцінки математичного очікування якого-небудь показника модельованої технологічної системи при заданому часі її функціонування.

Зворотна задачі полягає у визначенні оцінки математичного очікування часу функціонування системи, протягом якого який-небудь її показник досягає заданого значення.

Розв'язання цих задач, особливо зворотної задачі, має свої особливості. Розглянемо ці особливості далі на прикладі моделювання технологічного процесу складання зразка-типопредставника модулів ЕТ на алюміній-поліїмідній основі, основні технічні характеристики якого наведено в [125].

Одними з основних конструктивних елементів аналізованих модулів ЕТ є кристали ІС або гібридні мікрозбірки, змонтовані на поверхні гнучкої

алюміній-поліімідної плати-носія [129-130].

Складання електронного модуля починається через випадковий час t_n . Виконанню операцій передуює підготовка конструктивного елемента (КЕ), що включає в себе вхідний контроль. Тривалість підготовки залежить від ступеня підготовленості до складання вихідної елементної бази, з елементів якої буде зібрано кінцевий виріб. Усього різних видів конструктивних елементів електронного виробу (КЕ) – n_1 (гібридна мікрозбірка, три кремнієві сенсори (№ 1, № 2, №3), сполучні кабелі № 1 і № 2). Частота появи різних КЕ та середні значення часу їх підготовки (у хвилинах) задані у табл. 6.1 дискретного розподілу.

Таблиця 6.1 – Частота появи КЕ та середні значення часу їх підготовки

Значення параметру	Конструктивний елемент					
	Сполучний кабель № 1	Сполучний кабель № 2	Сенсор № 1	Сенсор № 2	Сенсор № 3	Мікро-складання
Частота, хв	0,05	0,13	0,16	0,15	0,22	0,29
Середній час підготовки КЕ, хв	10	14	21	25	22	28

Для складання модулів ЕТ послідовно виконуються n операцій (розміщення КЕ на монтажному столику, позиціонування КЕ відносно один одного, монтаж КЕ за допомогою УЗ-мікрозварювання) із середнім часом t_1, t_2 і t_3 відповідно. Після кожної операції протягом часу $t_{k1}, t_{k2}, \dots, t_{kn}$ виконується міжопераційний контроль. Час виконання операцій і контролю – випадковий. Контроль не проходять (відбраковуюються) q_1, q_2, \dots, q_n виробів відповідно.

Забраковані вироби надходять на пункт остаточного контролю (приймальний контроль) і проходять на ньому перевірку.

У результаті із загальної кількості виробів, які не пройшли контроль, $q_{n+1}\%$ ідуть у брак, а ті $1-q_{n+1}\%$ модулів ЕТ, що залишилися, підлягають повторному виконанню тих операцій, після яких вони не пройшли контроль.

Якщо електронний виріб вдруге не проходить контроль – він остаточно відбраковується.

Для цього визначимо наступні вхідні дані з використанням експоненціального закону ймовірнісного розподілу:

$$n_1 = 6; \text{Exponential } t_{II} = \text{Exponential } 30; q_1 = 12\%, q_2 = 15\%;$$

$$n = 6; \text{Exponential } (t_1) = \text{Exponential } (30); q_3 = 10\%, q_4 = 80\%;$$

$$\text{Exponential } (t_2) = \text{Exponential } (25); \text{Exponential } (t_3) = \text{Exponential } (35);$$

$$\text{Exponential } (tk_1) = \text{Exponential } (4); \text{Exponential } (tk_2) = \text{Exponential } (5);$$

$$\text{Exponential } (tk_3) = \text{Exponential } (15); \text{Exponential } (t_k) = \text{Exponential } (8).$$

В остаточному підсумку одержимо імітаційну математичну модель ТП складання виробів – модулів ЕТ – для визначення оцінки математичного очікування кількості виробів, виготовлених на виробничій лінії складання протягом 8 годин. Модель дозволяє виконати узагальнену оцінку надійності та стабільності ТП – визначати відносну кількість придатних і забракованих електронних модулів, середній час виготовлення одного виробу.

Процес складання модулів ЕТ являє собою процес, що протікає у багатофазній розімкнутій системі масового обслуговування з очікуванням (рис. 6.2). Є також ознаки замкненої системи – потоки браку для повторного складання, після усунення дефектів [125-126].

Припустимо, що підготовка КЕ та операції складання 1, 2 і 3 (розміщення КЕ на монтажному столику, позиціонування КЕ відносно один одного, монтаж КЕ за допомогою УЗ-мікрозварювання) проводяться на установках – одноканальних пристроях (ОКП) 1, 2, 3 і 4 відповідно (на технологічних установках контролю, розміщення та позиціонування, установці УЗ-мікрозварювання).

Пункт остаточного контролю (приймання) можна також представити як ОКП. Необхідні для їх імітації засоби GPSS наведено на рис. 6.2.

На базі типового ТП [125-126] складання моделей ЕТ (рис. 6.2, а), в даній дисертаційній роботі запропонований удосконалений ТП (рис. 6.2, б).

Його удосконалення полягає в реалізації поділів потоків в окремі блоки

«Контроль n » і «Операції n ». Дане рішення дозволить враховувати процес ймовірності створення черг по q_1, q_2, q_3 , які на пряму можуть впливати на результати моделювання, а отже на завантаження блоку «Пункт залишкового контролю».

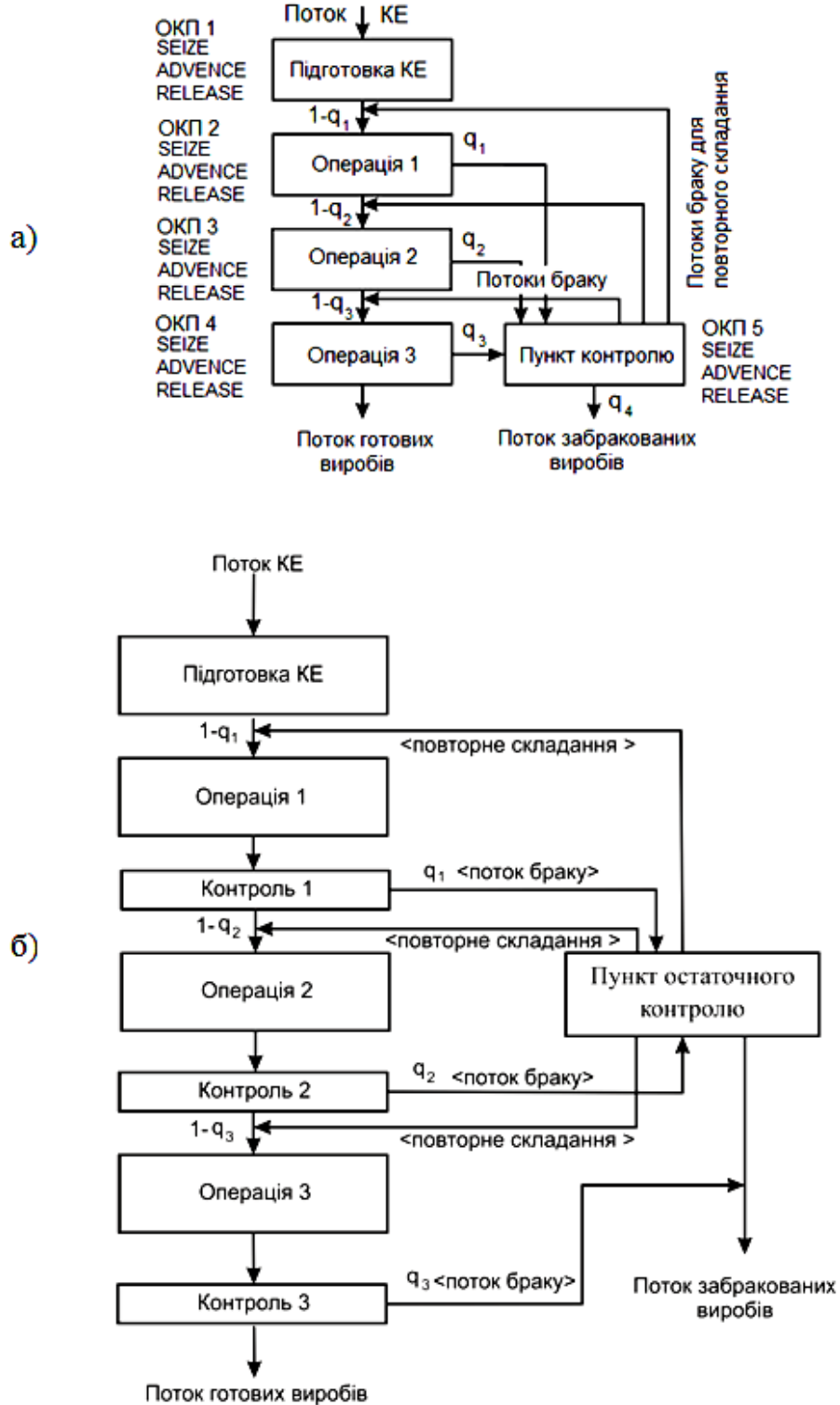


Рисунок 6.2 – ТП складання модулів ЕТ як система масового обслуговування

Час підготовки КЕ і час виконання операцій задано у хвилинах. Прийmemo 1 од. мод. часу = 1 хв.

Розрахуємо кількість прогонів N , які потрібно виконати в кожному спостереженні, тобто проведемо так зване тактичне планування експерименту. Нехай результати моделювання (імовірність обробки запитів) потрібно одержати з довірчою ймовірністю $\alpha=0,95$ і точністю $\varepsilon=0,01$ [125-126]. Розрахунки проведемо для гіршого випадку, тобто за ймовірності $p=0,5$, тому що до експерименту p є невідомим. За таких параметрів кількість прогонів дорівнюватиме: $N \approx 16642$.

6.3 Побудова моделі прямої задачі

Грунтуючись на вхідних даних представлених вище, і розробленої структури ТП складання модулів ЕТ (рис. 6.2) проведемо моделювання процесу виготовлення деталей модулів ЕТ на базі принципів розв'язання прямої задачі. Програмний код моделювання для мови GPSS World представлений нижче. При цьому визначимо умова що 1 одиниця модельного часу дорівнюватиме 1 хвилині.

Для початку роботи необхідно ввести вихідні дані:

Time EQU 480;

tn_ EQU 35	; між надходженнями КЕ
t1 EQU 30	; виконання 1-ї операції, хв
t2 EQU 25	; виконання 2-ї операції, хв
t3 EQU 35	; виконання 3-ї операції, хв
tk1 EQU 4	; контроль після 1-ї операції, хв
tk2 EQU 5	; контроль після 2-ї операції, хв
tk3 EQU 15	; контроль після 3-ї операції, хв
tk EQU 8	; остаточний контроль, хв
q1_ EQU .12	; частка браку після 1-ї операції
q2 EQU .15	; частка браку після 2-ї операції
q3 EQU .10	; частка браку після 3-ї операції

q4_ EQU .80 ; частка остаточного браку

Після завершення дії задаємо опис функції часу підготовки заготовок:

training FUNCTION RN10, D6
 .05,10/. 18,14/. 34,21/. 56,22/. 85,28/1,25

Далі описуємо сегмент імітації складання модулів ET:

GENERATE (Exponential (23, 0, tn_))

Команди підготовки елементів для модулів електронної техніки:

QUEUE training
 SEIZE training
 DEPART training
 ADVANCE (Exponential (34, 0, FN\$ training))
 RELEASE training

Далі проводимо імітацію виконання 1-ї операції (проходження виробу, встановлення в чергу її покидання та контроль):

Dcount ASSIGN 1,1
 ASSIGN 2,1
 Op1 QUEUE P2
 SEIZE Kon1
 DEPART P2
 ADVANCE (Exponential (23,0,tl))
 RELEASE Kon1
 ADVANCE (Exponential (23,0,tkl))
 TRANSFER q 1_.,Sboi

Аналогічно проводимо імітацію виконання 2-ї операції:

ASSIGN 2,2
 Op2 QUEUE P2
 SEIZE Kon2
 DEPART P2

```

ADVANCE (Exponential (23,0,t2))
RELEASE Kon2
ADVANCE (Exponential (23,0,tk2))
TRANSFER q2_., Sboi

```

Проводимо імітацію виконання 3-ї операції (додатково включено підрахунок готових виробів)

```

ASSIGN 2,3
Op3 QUEUE P2
SEIZE Kon3
DEPART P2
ADVANCE (Exponential (23,0,t3))
RELEASE Kon3
ADVANCE (Exponential (23,0,tk3))
TRANSFER q3_., Sboi
Endoper1 TERMINATE

```

Після завершення імітації виконання 3-х операцій опишемо сегмент імітації роботи пункту контролю (черга у пункті контролю, остаточний контроль, відправлення на повторні операції, підрахунок браку):

```

Sboi TEST E Pl, l, Endoper
QUEUE Kont
SEIZE Kontr
DEPART Kont
ADVANCE (Exponential (23,0,tk))
RELEASE Kontr
TRANSFER q4_., Endoper
ASSIGN 1,2
Met1 TRANSFER,(Met1+P2)
TRANSFER,Op1
TRANSFER,Op2
TRANSFER,Op3
Endoper TERMINATE

```

Описуємо сегмент завдання часу моделювання та розрахунків результатів моделювання (середній час складання одного виробу, хв., час моделювання, Кількість готових виробів (ціла), шт., кількість забракованих виробів (ціла), шт., число прогонів):

```

GENERATE Time
TEST L X$Prog,Tgl,Met1 1
SAVEVALUE Prog,Tgl
Met 11 TEST E Tgl,I,Met12
SAVEVALUE Ndet,(N$Endoper1/X$Prog)
SAVEVALUE Brak, m(N$Endoper/X$Prog)
SAVEVALUE Doljabrak,(X$Brak/(X$Brak+X$Ndet))
SAVEVALUE Doljadet,(X$Ndet/(X$Brak+X$Ndet))
SAVEVALUE Ndet,(INT(X$Ndet))
SAVEVALUE Brak,(INT(X$Brak))
SAVEVALUE Sdet,((Acl-x$AC2)/N$Endoper1)
SAVEVALUE AC2,AC1
Met 12 TERMINATE 1
START 1000,NP
RESET
START 16641

```

Розглянемо деякі особливості наведеної вище програмної реалізації моделі ТП складання модулів ЕТ.

Для завдання вихідних даних – часу підготовки КЕ – використана дискретна функція *training*. Це дозволяє скоротити програму в порівнянні з тим, якщо застосовувати команду *EQU* [125]. Крім того, спрощується подієва частина моделі, тому що у блоці імітації підготовки ЕРЕ

```
ADVANCE(Exponential(23,0,FN$ training));
```

досить вказати тільки посилання *FN\$ training* на функцію.

Коди 1 і 2, записувані в параметр 1 транзакта, слугують ознаками непроходження виробом контролю перший і другий раз відповідно. Ознака 2 є

підставою відправлення виробу в брак і виключення його із процесу складання.

Для підрахунку кількості готових і забракованих виробів введені мітки *EndOper1* і *EndOper* відповідно. Оскільки ці кількості накопичуються за всі прогони, то для одержання середніх значень вони діляться на число прогонів *X\$Prog*, округляються до цілого процедурою *INT* і заносяться в гнізда, що зберігаються, *Idet* і *Brak* відповідно. Далі ці середні значення використовуються для обчислення відносних часток готових *Doljadet* і забракованих *Doljabrak* виробів.

Середній час *Sdet* складання одного виробу визначається як відношення абсолютного модельного часу *AC1* до кількості зібраних виробів за всі прогони, тобто до *N\$Endoper1*.

Це було б правильно, якби не було попередніх прогонів моделі. Модельний час цих прогонів не повинен враховуватися під час визначення середнього часу складання виробу.

Його потрібно запам'ятати після завершення попередніх прогонів.

Для цього введено команду

```
SAVEVALUE AC2, AC1
```

Після закінчення основних прогонів проводяться розрахунки:

```
SAVEVALUE Sdet, ((AC1-X$AC2)/N$Endoper1)
```

За допомогою програмного комплексу GPSS World здійснене моделювання процесу складання модуля ЕТ-типопредставника. Фрагмент звіту наведено нижче.

SAVEVALUE	RETRY	VALUE
PROG	0	16641.000
NDET	0	9.000
BRAK	0	3.000
DOLJABRAK	0	0.279
DOLJADET	0	0.721
SDET	0	48.735
AC2	0	8467680.000

У результаті розв'язання прямої задачі імітаційного моделювання одержимо, що за 8 годин на технологічній лінії буде зібрано $N_{det} = 9$ електронних модулів, відносна частка готових виробів складе $Doljadet = 0,721$, а середній час складання одного виробу $S_{det} = 48,559$ хв. При цьому буде забраковано $Brak = 3$ вироби, відносна частка яких складе $Doljabrak = 0,279$.

6.4 Побудова моделі зворотної задачі

Метою побудови моделі зворотної задачі є визначення середнього часу на виготовлення певної кількості модулів ЕТ [125-126]. Для перевірки працездатності моделі візьмемо кількість виробів, отриманих у результаті розв'язання прямої задачі, тобто $Det = 9$. Код мовою моделювання CPSS World для розв'язання зворотної задачі наведено нижче.

Проводимо імітацію виконання 3-ї операції (проходження виробу, встановлення в чергу її покидання та контроль):

```

ASSIGN 2,3
Op3QUEUE P2
SEIZE Kon3
DEPART P3
ADVANCE (Exponential (23,0,T3))
RELEASE Kon3
ADVANCE (Exponential (23,0,T3))
TRANSFER q3_.,Sboi
TRANSFER,Met2

```

Далі описуємо сегмент імітації роботи пункту контролю (відправка деталі в остаточний брак, повтор 1-ї, 2-ї та 3-ї операцій, підрахунок браку):

```

Sboi QUEUE Kont
SEIZE Kontr
DEPART Kont
ADVANCE (Exponential (23,0,Tk))
RELEASE Kontr

```

```

TRANSFER q4_,Endoper
TEST E PI,I,Endoper
ASSIGN 1,2
Met1 TRANSFER,(Met1+P2)
TRANSFER,Op1
TRANSFER,Op2
TRANSFER,Op3
Endoper TERMINATE

```

Сегмент завершення моделювання та розрахунків результатів містить: підрахунок кількості готових виробів, розрахунки результатів моделювання, кількість забракованих виробів, шт., загальна частка браку, частка готових виробів, число основних прогонів моделі та інш.:

```

Met2 TEST L X$Prog,Tgl,Met3
SAVEVALUE Prog,Tgl
Met3 SAVEVALUE Ndet+
TEST E X$Ndet,Det,Ter1
TEST E Tgl,I,Met4
SAVEVALUE Brak,(N$Endoper/X$Prog)
SAVEVALUE Doljabrak,(X$Brak/(X$Brak+Det))
SAVEVALUE Doljadet,( Det/(X$Brak+Det))
SAVEVALUE Brak,(INT(X$Brak))
SAVEVALUE Tdet,(((Acl-x$AC2)/X$Prog)/60)
SAVEVALUE Sdet,((X$Tdet/Det)#60)
SAVEVALUE AC2,AC1
SAVEVALUE X$Prog,0
Met4 SAVEVALUE Ndet,0
TERMINATE 1
Ter1 TERMINATE
START 1000,NP
RESET
START 16641

```

У наведеній програмній реалізації моделі ТП для розв'язання зворотної задачі з метою скорочення виключено текст до частини, що імітує виконання 3-ї операції, тому що він такий же, як і у програмі моделі для розв'язання прямої задачі. Єдина відмінність полягає у тому, що у вихідні дані слід додати команду для завдання кількості виробів, які потрібно виготовити:

Det. EQU 9

Округлення до цілої кількості забракованих виробів проводиться після розрахунків частки готових і забракованих виробів. Якщо інакше, то розрахунок часток буде некоректним.

У програмі моделі прямої задачі придатні вироби після виконання 3-ї операції підраховувалися. Транзакти, що імітують їх, знищувалися:

Endoper1 TERMINATE

У програмі моделі зворотної задачі придатні вироби потрібно відправити до сегменту організації завершення моделювання. Для цього наведений вище блок підрахунку готових виробів замінений:

TRANSFER, Met2

Сегмент імітації роботи пункту контролю залишається незмінним. Зупинимося на сегменті завершення моделювання та розрахунку результатів.

Гніздо $Ndet$, що зберігається, слугує для підрахунку поточної кількості виготовлених виробів. Як тільки виконується умова $X\$Ndet = Det$, фіксується один прогін моделі. Det – змінна користувача, якою задається кількість виробів, час підготовки яких потрібно визначити.

Модельний час попередніх прогонів не має враховуватися під час розрахунків середнього часу виготовлення 9 модулів ET. Тому він

запам'ятовується у гнізді, що зберігається, $X\$AC2$, а під час розрахунків віднімається з $AC1$:

SAVE VALUE Tdet,(((Acl-x\$AC2)/X\$Prog)/60)

За допомогою програмного комплексу GPSS World здійснене моделювання процесу складання модуля ET (рис. 6.3-6.5). Фрагмент звіту наведено нижче:

SAVEVALUE	RETRY	VALUE
PROG	0	16641.000
BRAK	0	3.000
DOLJABRAK	0	0.279
DOLJADET	0	0.721
SDET	0	48.735
TDET	0	7.266
AC2	0	8467680.000

The screenshot shows a report window with the following content:

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
POD	227237	0.640	22.484	1	258507	0	0	0	4
KONVEER1	232774	0.874	29.989	1	258502	0	0	0	4
KONVEER2	210906	0.660	25.007	1	258500	0	0	0	3
KONVEER3	182206	0.799	35.045	1	0	0	0	0	0
KONTR	74700	0.074	7.957	1	0	0	0	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
1	58	4	232777	28422	6.358	218.156	248.498	0
2	28	3	210908	71344	1.296	49.066	74.148	0
3	48	0	182206	36286	3.310	145.116	181.202	0
POD	29	4	227241	82084	1.221	42.922	67.194	0
KONT	4	0	74700	69142	0.006	0.637	8.567	0

SAVEVALUE	RETRY	VALUE
PROG	0	16641.000
NDET	0	9.000
BRAK	0	3.000
DOLJABRAK	0	0.279
DOLJADET	0	0.721
SDET	0	48.735
AC2	0	8467680.000

FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
258507	0	8467685.612	258507	5	6		
258512	0	8467695.814	258512	0	1		
258500	0	8467697.541	258500	20	21	1	1.000
						2	2.000
258502	0	8467698.546	258502	12	13	1	1.000
						2	1.000
258513	0	8468160.000	258513	0	46		

Рисунок 6.3 – Фрагмент звіту результатів моделювання зі збереженими значеннями в SAVEVALUE

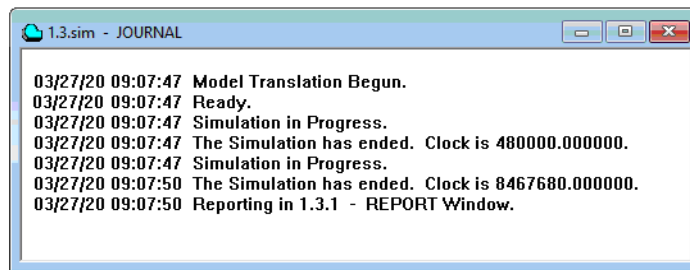


Рисунок 6.4 – Журнал успішної компіляції без помилок і попереджень

```

TimeMod EQU 480
Tn_ EQU 35
T1 EQU 30
T2 EQU 25
T3 EQU 35
Tk1 EQU 4
Tk2 EQU 5
Tk3 EQU 15
Tk EQU 8
q1_ EQU .12
q2_ EQU .15
q3_ EQU .10
q4_ EQU .80

Pod FUNCTION RN10,D6
.05,10/.18,14/.34,21/.56,22/.85,28/1,25

GENERATE (Exponential(23,0,Tn_))

QUEUE Pod
SEIZE Pod
DEPART Pod
ADVANCE (Exponential(34,0,Fn$Pod))
RELEASE Pod

DCount ASSIGN 1,1
ASSIGN 2,1

Oper1 QUEUE P2
SEIZE Konveer1
DEPART P2
ADVANCE (Exponential(23,0,T1))
RELEASE Konveer1
ADVANCE (Exponential(23,0,Tk1))
TRANSFER q1_,Sboi

Oper2 ASSIGN 2,2
QUEUE P2
SEIZE Konveer2
DEPART P2
ADVANCE (Exponential(23,0,T2))
RELEASE Konveer2
ADVANCE (Exponential(23,0,Tk2))
TRANSFER q2_,Sboi

Oper3 QUEUE P2
SEIZE Konveer3
DEPART P2
ADVANCE (Exponential(23,0,T3))
RELEASE Konveer3
ADVANCE (Exponential(23,0,Tk3))
TRANSFER q3_,Sboi

EndOper1 TERMINATE
Sboi TEST E P1,1,EndOper
QUEUE Kont
SEIZE Kontr
DEPART Kont
ADVANCE (Exponential(23,0,Tk))
RELEASE Kontr

```

Рисунок 6.5 – Код програми моделювання CPPS Word

У результаті розв'язання зворотної задачі [125] одержимо, що 9 виробів, відносна частка яких складе $Doljadet = 0,721$, буде виготовлено за $Tdet = 7,266$ годин, а середній час складання одного виробу $Sdet = 48,443$ хв. При цьому буде забраковано $Brak = 3$ вироби, відносна частка яких складе $Doljabrak = 0,279$.

6.5 Аналіз результатів моделювання ТП складання модулів ЕТ

Для удосконаленої моделі імітаційного моделювання та доказу правильності прийнятих рішень проведемо дослідження впливу якості виконання операцій на час виконання ТП за допомогою дисперсійного аналізу після завершення контролю після кожної операції. Грунтуючись на факторах (q_1, q_2, q_3, q_4) які описані в розділі 6.2, визначимо наступні значення кількості браку, які представлені в таблиці 6.2

Таблиця 6.2 – Вплив якості виконання операцій на час виконання ТП

Кількість браку (%)			
q_1	q_2	q_3	q_4
12	15	10	80

Для створення імітаційної моделі ведемо поняття рівні факторів які можуть належати q_1, q_2, q_3, q_4 , як деякий фіксований допуск $q_n = +/- m$, де m – значення нижнього і верхнього відхилення при цьому $m \leq 1$ і $-m \neq +m$. Визначимо такі рівні факторів, які представлені в таблиці 6.3

Поставимо такі обмеження на вимоги до отримуваних результатами моделювання: точність $\zeta = 1$ хв і довірча ймовірність $\alpha = 0,99$. Кількість прогонів залишаємо рівній 16641.

Таблиця 6.3 – Рівні факторів які можуть належати q_1, q_2, q_3, q_4

Рівні факторів	Фактори			
	q_1	q_2	q_3	q_4
Нижній ($q_n = -m$)	0,1	0,15	0,10	0,60
Верхній ($q_n = +m$)	0,25	0,35	0,20	0,90

Для успішної побудови сегмента організації завершення моделювання введемо такі позначення:

- очікування часу $TDet$ виготовлення Det деталей, то в її обчисленні використовується абсолютний модельний час $AC1$ (системний числовий

атрибут);

- при проведенні дисперсійного аналізу вбудований генератор експерименту, тому AC1 буде сумою абсолютного модельного часу попередніх прогонів до усталеного режиму AC2;

- позначимо через AC3 час основних прогонів, в ході яких збирається статистика для аналізу розробленої моделі.

Для реалізації збору даних статистики в програмний код моделювання представлений в підрозділі 6.4 введемо коригування у відповідності з вище введеними позначеннями.

```
SAVEVALUE AC3,(AC1-X$AC2)
SAVEVALUE X$Prog,0
```

Для проведення експерименту скористаємося модулем відсіючого експерименту «Screening Experiment Generator» з пакету CPPS World і внесемо в нього дані з таблиці 6.4. Приклад заповнення представлений на рис. 6.6.

Factors	Name (User Variable)	Value 1	Value 2
A	q1_	.10	.25
B	q2_	.15	.35
C	q2_	.10	.20
D	q4_	.60	.90
E			
F			

Рисунок 6.6 – Приклад заповнення модуля «Screening Experiment Generator»

Змінимо умови стандартної процедури запуску моделювання, під вимоги кількості проходів $n=16641$, представлений на рис. 6.7.

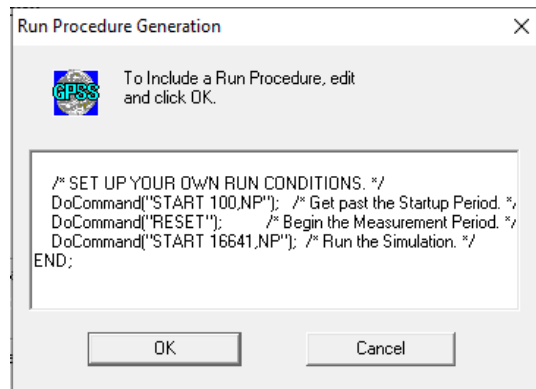


Рисунок 6.7 –Зміна параметру «Кількість проходів»

В результаті отримуємо автоматично згенеровану матрицю експерименту з процесом моделювання ТП:

```
*****
* *
* TDet *
* Factorial Screening Experiment *
* *
*****
TDet_Results MATRIX ,2,2,2,2
INITIAL TDet_Results,UNSPECIFIED
TDet_NextRunNumber EQU 0
EXPERIMENT TDet() BEGIN

/* Run 1 */
q1_ = .10;
q2_ = .15;
q2_ = .10;
q4_ = .60;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[1,1,1,1]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Set the Run Number Variable at the beginning. */
TDet_NextRunNumber = 1;
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[1,1,1,1] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 2 */
q1_ = .10;
q2_ = .15;
q2_ = .10;
q4_ = .90;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[1,1,1,2]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[1,1,1,2] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 3 */
q1_ = .10;
q2_ = .15;
q2_ = .20;
q4_ = .60;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[1,1,2,1]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[1,1,2,1] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
```

```

/* Run 4 */
q1_ = .10;
q2_ = .15;
q2_ = .20;
q4_ = .90;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[1,1,2,2]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[1,1,2,2] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 5 */
q1_ = .10;
q2_ = .35;
q2_ = .10;
q4_ = .60;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[1,2,1,1]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[1,2,1,1] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;

/* Run 6 */
q1_ = .10;
q2_ = .35;
q2_ = .10;
q4_ = .90;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[1,2,1,2]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[1,2,1,2] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 7 */
q1_ = .10;
q2_ = .35;
q2_ = .20;
q4_ = .60;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[1,2,2,1]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[1,2,2,1] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 8 */
q1_ = .10;
q2_ = .35;
q2_ = .20;
q4_ = .90;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[1,2,2,2]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[1,2,2,2] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 9 */
q1_ = .25;
q2_ = .15;
q2_ = .10;
q4_ = .60;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[2,1,1,1]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[2,1,1,1] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 10 */
q1_ = .25;
q2_ = .15;

```

```

q2_ = .10;
q4_ = .90;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[2,1,1,2]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[2,1,1,2] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 11 */
q1_ = .25;

q2_ = .15;
q2_ = .20;
q4_ = .60;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[2,1,2,1]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[2,1,2,1] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 12 */
q1_ = .25;
q2_ = .15;
q2_ = .20;
q4_ = .90;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[2,1,2,2]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[2,1,2,2] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 13 */
q1_ = .25;
q2_ = .35;
q2_ = .10;
q4_ = .60;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[2,2,1,1]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[2,2,1,1] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 14 */
q1_ = .25;
q2_ = .35;
q2_ = .10;
q4_ = .90;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[2,2,1,2]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[2,2,1,2] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 15 */
q1_ = .25;
q2_ = .35;
q2_ = .20;
q4_ = .60;
IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[2,2,2,1]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[2,2,2,1] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Run 16 */
q1_ = .25;
q2_ = .35;
q2_ = .20;
q4_ = .90;

```

```

IF (StringCompare(DataType(TDet_Results[2,2,2]),&quot;UNSPECIFIED&quot;)&#39;E&#39;0)
THEN BEGIN
/* Log the Run and Execute the Simulation */
TDet_GetResult();
TDet_Results[2,2,2] = (X$AC3/X$Prog)60;
END;
/* Aliased Effects in Fractional Factorial Experiment */
SE_Effects(TDet_Results,&quot;I&quot;);

END;

*****
* The Run Execution Procedure *
*****
PROCEDURE TDet_GetResult() BEGIN
/* Run Simulation and Log Results. */
/* Treatments have already been set for this run. */
TEMPORARY CurrentYield,ShowString,CommandString;
/* Run Procedure Call */
TDetRun(TDet_NextRunNumber);
CurrentYield = (X$AC3/X$Prog)60;
ShowString = PolyCatenate(&quot;Run &quot;,String(TDet_NextRunNumber),&quot;, &quot;, &quot;);
ShowString = PolyCatenate(ShowString,&quot; Yield=&quot;,String(CurrentYield),&quot;, &quot;);
ShowString = PolyCatenate(ShowString,&quot; q1_=&quot;,String(q1_), &quot;);
ShowString = PolyCatenate(ShowString,&quot; q2_=&quot;,String(q2_), &quot;);
ShowString = PolyCatenate(ShowString,&quot; q3_=&quot;,String(q3_), &quot;);
ShowString = PolyCatenate(ShowString,&quot; q4_=&quot;,String(q4_), &quot;);
CommandString = PolyCatenate(&quot;SHOW &quot;,ShowString,&quot;,&quot;);
&quot;);
DoCommand(CommandString);
TDet_NextRunNumber = TDet_NextRunNumber + 1;
RETURN CurrentYield;
END;
*****
* Run Procedure *
*****
PROCEDURE (Run_Number) BEGIN
DoCommand(&quot;CLEAR OFF&quot;); /* Must use OFF to preserve results. */
/* EXPAND THIS RMULT IF YOU HAVE MORE RNGs. */
/* All Random Number Streams must have new seeds. */
TEMPORARY CommandString;
/* Evaluate before passing to DoCommand. */
CommandString = Catenate(&quot;RMULT &quot;,Run_Number#111);
/* DoCommand compiles the string in Global Context. */
DoCommand(CommandString);
/* SET UP YOUR OWN RUN CONDITIONS. */
DoCommand(&quot;START 100,NP&quot;); /* Get past the Startup Period. */
DoCommand(&quot;RESET&quot;); /* Begin the Measurement Period. */
DoCommand(&quot;START 16641,NP&quot;); /* Run the Simulation. */
END;
*****

```

У такий спосіб у рамках даного розділу розроблено за допомогою математичного апарата теорії масового обслуговування стохастичну модель ТП складання модулів ЕТ (рис. 6.8), за допомогою програмних засобів системи GPSS World проведено імітаційне моделювання функціонування ТП складання.

03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	Alias Group	Effect	Sum of Squares	Degrees of Freedom	F-for Only Main Effects	Critical Value of F(p=.05)
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	A	1.373	7.540	1	78.503	4.84
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	B	2.026	16.420	1	170.953	4.84
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	AB	0.140				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	C	0.885	3.135	1	32.635	4.84
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	AC	0.077				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	BC	0.107				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	ABC	0.002				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	D	1.400	7.839	1	81.611	4.84
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	AD	0.265				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	BD	0.358				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	ABD	0.046				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	CD	0.161				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	ACD	0.019				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	BCD	0.006				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	ABCD	-0.009				
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	Error		1.057	11		
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	Total		35.989	15		
03/27/20 10:17:10	03/27/20 10:17:10	Grand Mean		9.017			

Рисунок 6.8 – Модель ТП складання модулів ЕТ

У системі GPSS World виконано 16641 прогонів моделі. Початкові значення генератора випадкових чисел встановлювалися послідовно такі: 23, 731, 9722, 72685 (табл. 6.4).

Крім того, моделювання проводилося спочатку за часу роботи лінії складання 8 годин (480 хв), а потім 48 годин (2880 хв).

Отримані показники, наведені у табл. 6.4, свідчать про адекватність результатів моделювання в системі GPSS World.

Таблиця 6.4 – Результати моделювання ТП складання виробу ЕТ у середовищі GPSS World

Показники	Початкові числа генератора випадкових чисел			
	23	731	9722	72685
Час роботи технологічної лінії складання 8 годин (480 хв)				
готВироби	9,885	9,909	9,884	9,905
часткаГотВир	0,721	0,721	0,721	0,722
бракВиробів	3,821	3,833	3,823	3,821
часткаБрВир	0,279	0,279	0,279	0,278
срЧасПідгВир	48,559	48,440	48,563	48,460
Δ часткаГотВир	$\Delta_1 = 0,721 - 0,722 = 0,001$			
Δ срЧасПідгВир	$\Delta_2 = 48,563 - 48,440 = 0,123$			

Продовження таблиці 6.4

Показники	Початкові числа генератора випадкових чисел			
	23	731	9722	72685
Час роботи технологічної лінії складання 48 годин (2880 хв)				
готВироби	59,496	59,405	59,432	59,496
часткаГотВир	0,722	0,722	0,722	0,722
бракВиробу	22,890	22,855	22,850	22,890
часткаБрВир	0,278	0,278	0,278	0,278
срЧасПідгВир	48,406	48,481	48,459	48,406
Δ часткаГотВир	$\Delta_3 = 0,722 - 0,722 = 0$			
Δ срЧасПідгВир	$\Delta_4 = 48,481 - 48,406 = 0,075$			

У табл. 6.4 використано такі позначення: готВироби – кількість готових виробів; часткаГотВир – відносна частка готових виробів; бракВиробу – кількість бракованих виробів; часткаБрВир – відносна частка бракованих виробів; срЧасПідгВир – середній час складання одного виробу. ТП складання модуля ЕТ, структурна схема якого представлена на рис. 6.2, б, включає в себе наступні операції: вхідний контроль і підготовку конструктивних елементів (КЕ) до складання (блок «Підготовка КЕ»); розміщення КЕ на монтажному полі (блок «Операція 1»); позиціонування КЕ відносно один одного (блок «Операція 2»); монтаж КЕ за допомогою УЗ-мікрозварювання (блок «Операція 3»); міжопераційний і вихідний контроль виробу, що виготовляється (блок «Пункт контролю»).

Такий показник, як відносна частка готових деталей (1 і 3), відрізняється на 0...0,001, а середній час виготовлення однієї деталі (2 і 4) – на 0,075...0,123 хв.

За умови зміни початкового числа генератора випадкових чисел ці показники змінюються не суттєво.

6.6 Висновки до розділу 6

Таким чином, у даному розділі проведено аналіз розробленого ТП складання гнучких алюміній-поліімідних комутаційних структур зі зварними між'єднаннями та його основні етапи.

Параметри функціонування розробленого ТП було проаналізовано за допомогою математичної моделі функціонування технологічного процесу складання модулів ЕТ, яку представлено у вигляді імітаційної моделі ТП складання модулів ЕТ на алюміній-поліімідній основі з використанням засобів моделювання GPSS World та теорії масового обслуговування, що дало можливість одержати математичну модель ТП складання виробів для визначення відсотка виходу придатних електронних модулів, виготовлених на технологічній лінії складання за встановлений проміжок часу.

Для часу роботи лінії складання 8 годин (480 хв) відносна частка готових деталей (1 і 3) відрізняється на 0,001, а середній час виготовлення однієї деталі (2 і 4) – на 0,123 хв, для часу роботи лінії складання 48 годин (2880 хв) відносна частка готових деталей (1 і 3) є однаковою, а середній час виготовлення однієї деталі (2 і 4) – відрізняється на 0,075 хв. Отримані показники свідчать про адекватність результатів моделювання в системі GPSS World.

Запропонована математична модель функціонування ТП складання електронного модуля-типопредставника дозволяє виконувати прогнозування стабільності ТП – визначати відносну кількість придатних виробів, середній час виготовлення одного виробу, середню кількість виготовлених за зміну модулів електронної техніки.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах автора [2, 13, 17, 26] (Додаток Г).

Список джерел, які використано у даному розділі, наведено у повному списку використаних джерел [64-65, 87, 89, 117, 102-104, 121-130].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі отриманих результатів вирішено актуальне науково-прикладне завдання забезпечення якості високощільних рознімних і нерознімних електричних між'єднань у багат шарових ГКС для модулів електронної техніки шляхом розробки технології формування цих з'єднань на основі досліджень фізико-технологічних параметрів ГКС.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Із використанням матричного функціонального аналізу побудовано матрицю жорсткості, яка дозволяє забезпечити розрахунок деформації елементів гнучких електронних між'єднань за відомого вектора зовнішніх сил.

2. Проведено розрахунок переміщень і деформацій елементів конструкції пристроїв на основі використання методу скінчених елементів і розрахунку деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осьових сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі.

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

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

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

6. Експериментально визначене максимальне зусилля, яке витримує з'єднувач, становить 1,3...1,4 Н. Показано, що перехідний опір у контактах з'єднувача становить максимум 0,2...0,3 Ом. Отримані результати свідчать про придатність конструкції з'єднувача для практичного застосування у складі сучасних модулів ЕТ.

Виходячи з отриманих результатів була визначена форма притискаючої кришки з'єднувача. Відповідно до результатів експерименту, кришка повинна мати 6 або 7 зубців.

7. Розроблено математичну модель функціонування технологічного процесу складання модулів ЕТ, що дозволяє за допомогою програмних засобів системи GPSS World здійснювати оцінку надійності та стабільності технологічного процесу – визначати відносну кількість придатних виробів, середній час виготовлення одного виробу, враховувати вплив технологічних режимів.

8. Проаналізовано фізико-хімічні процеси, які спостерігаються під час формування та руйнування монтажних з'єднань, і виявлено, що товщина шару алюмінієвої металізації на поліімідній гнучкій комутаційній платі має бути не меншою за 10 мкм, зменшення товщини призводить до зниження міцності зварного з'єднання мікрровиводів плати.

9. Визначено, що максимальна пластичність алюмінієвого стрічкового виводу з матеріалу марки А-995Д з перетином $242 \times 18 \text{ мкм}^2$ (8 %) досягається за температури відпалювання близько 573 К, а середовище відпалювання істотного впливу на досліджувані механічні властивості виводів не виявляє.

Визначено оптимальні режими УЗ-зварювання для гнучких комутаційних структур з шириною провідників нижнього шару 210 мкм і верхнього шару 100 мкм та відстанню між провідниками нижнього шару 300 мкм і верхнього шару – 200 мкм, за яких забезпечується максимальна міцність ($27 \cdot 10^{-2}$ Н) мікроз'єднань: потужність УЗ-генератора – 2,5 Вт; час зварювання – 380 мс, навантаження робочого інструмента – $76 \cdot 10^{-2}$ Н.

10. За результатами виконаних досліджень було розроблено та відпрацьовано технологічний процес складання гнучких алюміній-поліімідних комутаційних структур зі зварними міжз'єднаннями, виконаними за допомогою УЗ-зварювання.

11. Результати дисертаційних досліджень впроваджені на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування»; на підприємстві ТОВ «НВП «Укрінтех», на підприємстві ТОВ «НВП «ЛТУ», а також у навчальному процесі на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету, на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського та на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Gong N. W. Design and applications of inkjet-printed flexible sensate surfaces : дис. Massachusetts Institute of Technology, 2013. <http://hdl.handle.net/1721.1/91434>
2. Святний В. А. Сучасні тенденції в автоматизації промислових комплексів / В. А. Святний, Д. Ю. Бровкіна // Системні дослідження та інформаційні технології. 2016. № 1. С. 32-39.
3. Wong W. S., Salleo A. (ed.). Flexible electronics: materials and applications. Springer Science & Business Media, 2009. Т. 11. 461 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74363-9>
4. 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.; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. 3 с.
5. Reboun, J., Pretl, S., Navratil, J., & Hlina, J. (2016). Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates. Paper presented at the Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, 2016 – September 184-188. doi:10.1109/ISSE.2016.7563185 Retrieved from www.scopus.com
6. Демська Н. П. Гнучкі комутаційні структури: аналіз технологій та галузі застосування // Технологія приборостроення, 2019. №1. С. 38–42.
7. Davydovskyi, Y., Reva, O., Artiukh, O. and Kosenko, V. (2019) “Simulation of computer network load parameters over a given period of time”, Innovative technologies and scientific solutions for industries, (3 (9), pp. 72–80. doi: 10.30837/2522-9818.2019.9.072.
8. Семенец В. В. Технология межсоединений электронной аппаратуры / В. В. Семенец, Дж. Кратц, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин. – Харьков: СМІТ, 2005. 32 с. ISBN 966-8530-28-4
9. Hamby B. L. Flexible printed circuits and methods of fabricating and forming plated thru-holes therein : пат. 4715928 США. – 1987.

10. Овчаренко В. Е. Перспективы использования гибких и гибко-жестких конструкций в электронной технике / В. Е. Овчаренко, А. А. Ефименко, Е. В. Токарева, Е. А. Чалая // Технология приборостроения. 2016. №3. С. 22-24.

11. Ефименко А. А. Проектирование межблочных электрических соединений электронных средств в базовых несущих конструкциях: Монография / А. А. Ефименко. – Одесса: Политехпериодика, 2013. 280 с.

12. Винников В. В. Основы проектирования электронных средств: учебное пособие: в 2 кн. Кн. 1 / В. В. Винников. – СПб. : Изд-во СЗТУ, 2009. 194 с.

13. Невлюдов І. Ш. Основи виробництва електронних апаратів: Підручник. – Харків: Компанія СМІТ, 2005. 592 с. ISBN 966-8530-24-1

14. Невлюдов І. Ш. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології: Підручник / І. Ш. Невлюдов, В. В. Семенець, В. А. Палагін. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2011. 416 с. ISBN 978-966-2028-73-7

15. Воробьев А. В. Гибкие фольгированные диэлектрики: классификация и анализ направлений применения и совершенствования / А. В. Воробьев, В. Д. Жора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 4. С. 56-61.

16. Медведев А. Гибкие печатные платы. Преимущества и применение / А. Медведев, Г. Мылов, Ю. Набатов, В. Люлина // Компоненты и технологии. 2007. №. 9. С. 202-208.

17. Wang, X., Dong, L., Zhang, H., Yu, R., Pan, C., et al. Recent progress in electronic skin // Advanced Science. 2015. Т. 2. №. 10. С. 1500169.

18. Sundar, V. C., Zaumseil, J., et al Elastomeric transistor stamps: reversible probing of charge transport in organic crystals // Science. 2004. Т. 303. №. 5664. p.p. 1644-1646.

19. Haas, Daniel P. "Flexible printed circuits." U.S. Patent No. 5,121,297. 9 Jun. 1992.

20. Глушкова А. В. Гибкая электроника: настоящее и будущее [Электронный ресурс]: режим доступа: [https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2017/04\(126\)-2017/25457/](https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2017/04(126)-2017/25457/)

21. Botsman, N. Demska and V. Nevliudova, "Research of Mechanical Influences on Flexible Printed Circuits Parameters," *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-4, doi:10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047522. Retrieved from www.scopus.com

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

23. Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А., Демська Н.П., Гуріна Д.В. Аналіз впливу механічних напружень на можливість мініатюризації гнучких структур електронної техніки на прикладі ZIF з'єднувача // Проблеми тертя та зношування. 2017, №3 (76). С. 74-80. DOI: 10.18372/0370-2197.3(76).11953

24. Гуськов, Г. Я. Монтаж микроселектронной аппаратуры: учеб. пособие / Г.Я. Гуськов, Г.А. Блинов, А.А. Газаров. М. : Радио и связь, 1986. 175 с.

25. Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій : пат. на винахід 97538 Україна / Борщов В. М., Кошій Л. Д., Лістратенко О. М., Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., та інш. ; ХНУРЕ. 2012.

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

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

28. Разумов-Фризюк Є.А., Невлюдова В.В., Демська Н.П. Плоский роз'єм для електронних пристроїв з нульовою силою вставки // 27-я Международная конференции «Новые технологии в машиностроении», (Коблево-Харьков,

3-8 сентября 2017 г.). С. 77-78.

29. Connector for FPC / FFC: patent of Korea № KR 20020083891 A / Hayasi Naoki, Sato Tomoyuki. 27.04.2001.

30. Невлюдов И. Ш. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии: Монографія / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагін. К. : НАУ, 2017. 528 с. ISBN 980-969-578-256-8

31. Palagin, V., Razumov-Fryziuk, I., Botsman, I., & Nevliudova, V. (2018). Development of multi-probe connecting devices on flexible polyimide base for MEMS components testing. Paper presented at the 2018 14th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2018 – Proceedings, 232–235. doi:10.1109/MEMSTECH.2018.8365740 Retrieved from www.scopus.com.

32. Nevliudov I., Omarov M., Botsman I., Demaska N., Nevliudova V., Starodubcev M. Research of factors influencing the process of formation of welded microconnections in electronic modules. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering , 2019 , 181-187 . DOI: 10.18038/estubtda.651032

33. Nevliudov, I. S., Borshchov, V. M., Palagin, V. A., Razumov-Fryziuk, I. A., Tymchuk, I. T., et al (2019). Mathematical model of bending two-layer film aluminium-polyimide structure due to temperature changes. Functional Materials, 26(2), 342–346. doi:10.15407/fm26.02.342.

34. Ю. М. Поплавко Нанофізика. наноматеріали, наноелектроніка: навч. носіб. / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, Ю. І. Якименко. К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.

35. Palagin, V., Razumov-Fryziuk, I., Botsman, I., & Nevliudova, V. (2018). Development of multi-probe connecting devices on flexible polyimide base for MEMS components testing. Paper presented at the 2018 14th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2018 - Proceedings, 232–235. doi:10.1109/MEMSTECH.2018.8365740 Retrieved from www.scopus.com

36. MEMS and MOEMS Technology and Applications / by P. Rai-Choudhury edition. SPIE Press, 2000. 528 p. ISBN 0-8194-3716-6

37. 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. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22016.10-19>

38. Dechev, Nikolai, Mills, James K., and Cleghorn, William L. "Mechanical Fastener Designs for Use in the Microassembly of 3D Microstructures." *Proceedings of the ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Microelectromechanical Systems*. Anaheim, California, USA. November 13–19, 2004. pp. 447-456. ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-62212>

39. Eggertsen, P-A., and Kjell Mattiasson. "On constitutive modeling for springback analysis." *International Journal of Mechanical Sciences* 52.6 (2010): 804-818. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.01.008>

40. Esat, Volkan, Haluk Darendeliler, and Mustafa Ilhan Gokler. "Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets." *Materials & design* 23.2 (2002): 223-229. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00062-0)

41. Panthi, S. K., et al. "Finite element analysis of sheet metal bending process to predict the springback." *Materials & Design* 31.2 (2010): 657-662. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.022>

42. Cho, J. R., et al. "Finite element investigation on spring-back characteristics in sheet metal U-bending process." *Journal of Materials Processing Technology* 141.1 (2003): 109-116. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00163-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00163-8)

43. Расчет упругих элементов в конструкциях электрических соединителей на основе гибких печатных кабелей / А. А. Ефименко, С. В. Мерлян // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2016. № 2-3. С. 8-14.

44. Kaajakari, V. *Practical MEMS: Analysis and Design of Microsystems, MEMS Sensors, Electronics, Actuators, RF MEMS, Optical MEMS, and Microfluidic Systems* / V. Kaajakari // Small Gear Publishing, Las Vegas,

2009. 484 p.

45. Матрично-структурний аналіз напружено-деформованого стану гнучких міжз'єднань і компонентів МЕМС / І. Ш. Невлюдов, Н. П. Демська, В. А. Палагін, І. В. Боцман // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2020. № 1 (11). С. 122-133. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.122>.

46. Nevliudov I., Demska N., Palagin V., Nevlyudova V., Botsman I., and Kolesnyk K. Stiffness Matrix of MEMS on the Stress-Strain Method Basis // 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, Ukraine, 2020, pp. 142-145, doi: 10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109509. Retrieved from www.scopus.com

47. Палагін, В. А. Методологічні основи проектування технологій компонентів мікроелектромеханічних систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.27.06 "Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки" / В. А. Палагін ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2016. 43 с.

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

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

50. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Физматлит, 2001. 264 с.

51. Павловский М. А. Теоретическая механика / М. А. Павловский, Т. В. Путята. – Киев : Вища школа, 1985. 478 с.

52. Przemieniecki, Janusz S., and Przemieniecki. Theory of matrix structural

analysis. Vol. 1. New York: McGraw-Hill, 1968. 501 p.

53. Бобало Ю. Я. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: Монографія / Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 300 с. ISBN 978-617-607-468-7

54. Nevlyudov I. An Application of the Finite Element Method for Flexible PCB Components Tense-Deformed State Simulation / I. Nevlyudov, I. Khatnyuk // Materials of the XI International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science”. Collection of the scientific papers. Lviv-Slavske. IEEE. 2012. P. 537.

55. Hancq D. A., Walters A. J., Beuth J. L. Development of an object-oriented fatigue tool // Engineering with computers. 2000. Т. 16. №. 2. PP. 131-144. <https://doi.org/10.1007/s003660070016>

56. Nevlyudov, I., Palagin, V., & Botsman, I. (2017). The general principles of electromagnetic compatibility improving with microsystem technology using. Paper presented at the 2016 3rd International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2016 - Proceedings, PP. 237-238. doi:10.1109/INFOCOMMST.2016.7905393 Retrieved from www.scopus.com.

57. Балан Н. Н. Определение упругих свойств подвижных элементов MEMS-структур // Нано-и микросистемная техника. 2004. №. 2. С. 14–19.

58. Теслюк В М. Автоматизація проектування МЕМС на компонентному рівні: монографія / В. М. Теслюк. Львів : Видавництво «Львівська політехніка», 2011. 192 с.

59. Теслюк В.М., Зелінський А. Я., Каркульовський В.І., Василюк Я.Р. Advanced design for microsystems devices: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2016. 200с.

60. Яворський Н.Б., Теслюк В.М., Литвинова Є.І. Комп'ютерні методи в інженерії мікроелектромеханічних систем: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2015. 280 с.

61. Woinowsky-Krieger, S. (1956). Über die verwendung von

bipolarkoordinaten zur lösung einiger probleme der plattenbiegung. Ingenieur-Archiv, 24(1), PP. 47-52. doi:10.1007/BF00536955.

62. Igor, Nevliudov, Ievgenii, Razumov-Fryziuk & Victor, Palagin (2017), Improved reliability of interconnects of electronics components. Paper presented at the 2nd International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2017 - Proceedings, P. 1–5. doi:10.1109/UkrMiCo.2017.8095396 Retrieved from www.scopus.com.

63. Шидловський М. С., Бабенко А. Є., Боронко О. О., Заховайко О. П., Трубачев С. І. Нові матеріали: частина 2 - Експериментальні методи досліджень механічних властивостей конструкційних полімерів та пластмас. [Текст]: Навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» спеціалізації «Динаміка і міцність машин» К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 265 с.

64. Новітні конструктивно-технологічні рішення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів / [І. Ш. Невлюдов, В. М. Борщов, Н. П. Демська та ін.]. // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. № 5 (3). – С. 67-78. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.5.067>.

65. Sivkov, Alexander, Saigash Anastasiya, and Yu L. Kolganova. "The influence of the properties of a copper coating deposited on an aluminum contact surface on contact resistance." *Russian electrical engineering* 84.8 (2013): 418-421.

66. Slade, Paul G. (2014). *Electrical Contacts: Principles and Applications* (2nd ed.). CRC Press. p. 408. ISBN 978-1-4398-8130-9.

67. IEC 62326-7(62249). Part 7: Quality and performance specification for flexible printed boards (IPC-6013).

68. Осадчук В. С. Радіовимірювальні перетворювачі для визначення товщини плівок на основі пристроїв з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін. – Вінниця : ВНТУ, 2013. 136 с.

69. Адлер Ю П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер. Е. В. Маркова. Ю. В. Грановский. М.: Наука. 1976. 280 с.

70. Яворский В. А. Планирование научного эксперимента и обработка

экспериментальных данных / В. А. Яворский. М. : МФТИ, 2006. 44 с.

71. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник. Кривий Ріг: КК НАУ, 2017. 444 с. ISBN 980-970-579-259-9

72. Новосядлий С. П., Вивчарук В. М., Вертепний С. М. Моделювання субмікронної та нанотехнологій на основі тестових структур. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 1.7 (37) (2009): 26-38.

73. Єрьоміна О.Ф., Абдурахманов Б. Визначення питомого електричного опору сплавів на основі міді з метою їх сепарації // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, 6/2014. С 87-98.

74. Montgomery, Douglas C. (2013). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). Hoboken, New Jersey: Wiley. ISBN 978-1119320937.

75. Braunovich M., Konchits V., Myshkin N. *Electrical contacts. Fundamentals, applications and technology.* – London New York: CRC Press, 2006. 639 p. ISBN 13:978-1-57444-727-9

76. Яцишин Б. П., Оптимізація фізико-технічних критеріїв зі створення мікрокристалічних матеріалів для чутливих елементів сенсорних пристроїв / Б. П. Яцишин, Н. І. Доманцевич // Вісник Хмельницького національного університету. №5. 2011. С. 135-140.

77. Невлюдов І.Ш., Демська Н.П., Новоселов С.П., Разумов-Фризюк Є.А. Контроль якості електричних міжз'єднань гнучких структур. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2020. (1(63)), 103-112. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.63.14>

78. Michailides, Constantine, Eva Loukogeorgaki, and Demos C. Angelides. "Response analysis and optimum configuration of a modular floating structure with flexible connectors." *Applied Ocean Research* 43 (2013): 112-130. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.07.007>

79. 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.

<https://doi.org/10.20535/2411-2976.22016.10-19>

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

81. Macleod, Peter. A review of flexible circuit technology and its applications. PRIME Faraday Partnership, 2002. ISBN 1-84402-023-1

82. Невлюдов І. Ш. Технологічне забезпечення якості гнучких комутаційних структур: Монографія / І. Ш. Невлюдов, І. В. Боцман, В. В. Невлюдова, Є. А. Разумов-Фризюк. Кривий ріг : КК НАУ, 2018. 256 с.

83. Timoshenkov, S., Kalugin, V., Korobova, N., Shalimov, A., Kalmikov, D., Golovinsky, M., Aung, K.M., Zhora, V., Plis, N. (2017). Providing of MEMS inclinometer operation under external influencing factors. Paper presented at the *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2017 - Proceedings*, 88-91. doi:10.1109/ELNANO.2017.7939721 Retrieved from www.scopus.com

84. Плис Н. И. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе / Н. И. Плис, В. Г. Вербицкий, В. Д. Жора и др. // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2010. № 5-6. С. 43–45.

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

86. Ланин, В. Л. Технология производства электронных средств : учебное пособие / В. Л. Ланин, А. А. Хмыль. – Минск : Вышэйшая школа, 2019. – 455 с.

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

88. Song, Quanfeng, Wenqi Zhang, and Niels Bay. "An experimental study determines the electrical contact resistance in resistance welding." *Welding Journal* 84.5 (2005): 73s-76s.

89. Спеціальні способи зварювання : підручник / І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за загальною редакцією академіка НАН України, доктора технічних наук, професора Б. Є. Патона. Миколаїв : НУК, 2017. 346 с. ISBN 978–966–321–321–7

90. Ланин В.Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В.Л. Ланин, А. П. Достанко, Е.В. Телеш. Минск: Изд. центр БГУ, 2007. 574 с.

91. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. 80 с.

92. Федоров, В. К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. К. Федоров, Н. П. Сергеев. М.: Техносфера, 2005. 504 с.

93. Невлюдов И.Ш. Визуальный мониторинг физико-химических процессов в производстве и эксплуатации электронной аппаратуры: Монография / И.Ш. Невлюдов, А.А. Андрусевич, М.А. Омаров. Харьков : «Коллегиум», 2007. 236 с.

94. Терлецкий, Я. П. Статистическая физика / Я. П. Терлецкий. М.: Высшая школа, 1973. 278 с.

95. Кузнецов, О. А. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры / О. А. Кузнецов, А. И. Погалов, В. С. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1990.– 144 с.

96. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов. Учебн. пособие для университетов. М.: Физматгиз, 1962. 455 с.

97. Макаров П. В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред //Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. №. 3. С. 19-35.

98. Андрусевич, А. А. Технологический мониторинг монтажных соединений в производстве электронной техники: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Андрусевич. - Харьков, 2005. 156 с.

99. Nevliudov I., Demska N., Starodubcev N., Nevliudova V. Modeling of destruction processes of the installation connection of electronic equipment // Information systems and innovative technologies in project and program

management: Collective monograph. Riga: ISMA, 2019. pp. 248-257. ISBN 978-9984-891-08-8

100. Nevliudov I., Starodubcev N., Demska N., Omarov Sh. Visual monitoring of the break surface of the installation connection of electronic equipment // Information systems and innovative technologies in project and program management: Collective monograph. Riga: ISMA, 2019. pp. 258-270. ISBN 978-9984-891-08-8

101. Борщев В. Н. Новые подходы к созданию высокоэффективных приемников излучения для концентраторных солнечных модулей / В.Н. Борщев, Н.И. Слипченко, М.А. Проценко, И.Т. Тымчук, и др. // *Радиотехника*. № 197. 2019. С. 123-136.

102. Борщев В.Н. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов изготовления гибких коммутационных структур для современных микроскопических структур / В.Н. Борщев, И.Ш. Невлюдов, М.А. Проценко, И.С. Хатнюк // Materials of the VII International conference “Strategy of Quality in Industry and Education”. Varna, Bulgaria. 2011. С. 34-37.

103. Невлюдов И.Ш. Анализ влияния конструктивно-технологических факторов на кинетику формирования сварного микросоединения / И. Ш. Невлюдов, И. С. Хатнюк // Збірник наукових праць «Вісник національного технічного університету “ХПІ”». Харків: НТУ “ХПІ”, 2012. Вип. №1. С. 13-18.

104. Борщев В.Н. Исследование и выбор оптимальных технологических режимов сварки для автоматизации монтажа гибких алюминий-полиимидных микрокабелей / В.Н. Борщев, И.Ш. Невлюдов, М.А. Проценко, И.Т. Тымчук, и др. // *Технология приборостроения*. Харьков, 2011. Вып. №1. С. 3-8.

105. Дослідження напружено-деформованого стану поліімідних комунікаційних структур на прикладі гнучкого шлейфу / [І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, Н. П. Демська та ін.] // *Проблеми тертя та зношування*. 2019. № 2 (83). С. 54-64. DOI: 10.18372/0370-2197.2(83).13693

106. Балабанов В. Т. Технология создания плоских микромодулей для приборов бесконтактной идентификации: автореф. дис. к.т.н. / В. Т. Балабанов;

[Московский гос. ин-т электронной техники]. М., 2008. 26 с.

107. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) / А.Я. Ищенко, С.В. Подбельников, А.Г. Покляцкий // Автоматическая сварка. 2007. № 11 (655). С. 32-38.

108. Хатнюк И.С. Анализ полностью алюминиевой chip on flex (COF) технологии изготовления гибридных микросборок для микропроцессорных систем: материалы 10-й всеукраинской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Информационные системы и технологии». Одесса: ОДАХ, 2010. С. 53-55.

109. Грачёв А. А. Ультразвуковая микросварка / А. А. Грачёв, А. П. Кожевников, В. А. Лебига. М. : Энергия, 1977. 184 с.

110. Исследование влагопоглощения полиимидных покрытий и свободных пленок методом ИК-спектроскопии. Новые материалы и технологии НМТ-98 [Текст] : тез. докл. науч. практ. конф. (окт. 1998) – Москва : САА, 1998. 282 с.

111. Назаров Г.В. Сварка и пайка в микроэлектронике / Г. В. Назаров, Н. В. Гревцов. М. : Сов. радио, 1969. 192 с.

112. Заводян А. В. Анализ сборочно-монтажных процессов производства электронных средств: Уч. пособие / А. В. Заводян, А. М. Грушевский. М.: МИЭТ, 2005. 200 с.

113. Стародубцев Н.Г., Фомовский Ф.В., Невлюдова В.В., Демская Н.П. Математическое моделирование выбора информативных признаков для анализа состояния процессов жизненного цикла радиоэлектронных средств. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2017. No. 1 (1). с. 82-89. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.082>

114. Жуков А. А. Энергетические характеристики поверхностей и адгезионная прочность полиимидных покрытий на гидрофильных подложках в технологии микроэлектроники [Текст] / А. А. Жуков // Электронная техника. – 2001. Сер. 3, №155. С. 59-62.

115. Погалов А. И. Выносливость гибких печатных плат на полиимидных

пленках при производстве и эксплуатации устройств электронной техники / А. И. Погалов, Г. А. Блинов, Е. Ю. Чугунок // Известия высших учебных заведений. Электроника. № 6. 2014. С. 73-78.

116. Оцінка впливу механічних дій на гнучкі друковані плати / І. Ш. Невлюдов, Є. А. Разумов-Фризюк, Н. П. Демська, В. В. Невлюдова // Проблеми тертя та зношування. 2016. № 1 (70). С. 143-149. DOI: 10.18372/0370-2197.1(70).10402

117. Притчин С. Е., Гуріна Д. В., Демська Н. П. Методи контролю якості гнучких структур // Radioelectronics & Informatics journal. 2016. №3. С. 3-6.

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

119. Reboun, J., Pretl, S., Navratil, J., & Hlina, J. (2016). Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates. Paper presented at the Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, 2016 – September 184-188. doi:10.1109/ISSE.2016.7563185 Retrieved from www.scopus.com

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

121. Налимов В В. Логические основания планирования эксперимента [Текст] / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. М. : Металлургия. 1981. 155 с.

122. Кошевой Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко. Полтава : издатель Шевченко Р. В. 2013. 317 с.

123. Koshevoy N. D., et al. "Research of multiple plans in multi-factor

experiments with a minimum number of transitions of levels of factors." *Radio Electronics, Computer Science, Control* 2 (2019): 53-59.

124. Невлюдов І. Ш., Пономарьова Г. В., Бортнікова В. О. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів // *Вчені записки ТНУ імені ВІ Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. Т. 29. №. 68. С. 204-210.

125. Боев В.Д. Концептуальное проектирование систем в AnyLogic и GPSS World / В.Д. Боев. – 2-е изд., испр. Москва : Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 543 с.

126. Боев В.Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов: монография / В. Д. Боев. СПб. : ВАС, 2011. 404 с.

127. Крюков А.Ю. Математическое моделирование процессов в машиностроении: Монография / А.Ю. Крюков, Б.Ф. Потапов. Пермь : ПГТУ, 2007. 322 с.

128. Лапа М.В. Интеллектуальный метод гибкого проектирования технологических процессов изготовления деталей приборов : Дис... канд. техн. наук: 05.11.14 / Национальный технический ун-т Украины "Киевский политехнический ин-т". К., 2004. 181 с.

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

130. Замирец Н. В. Алюминиевая "Chip on flex" (COF) технология в радиационном приборостроении / Н. В. Замирец, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, та інш. // *Технология приборостроения*. 2007. № 2. С. 3-9.

ДОДАТОК А

Патент на корисну модель



ДОДАТОК Б
на типовий технологічний процес складання гнучких
алюміній-поліімідних комутаційних структур
зі зварними між'єднаннями, виконаними за допомогою УЗ-зварювання

ДОДАТОК В

Акти впровадження



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття ступеня кандидата технічних наук
Демської Наталії Павлівни

Комісія у складі: голови — головного конструктора, к.т.н. Замірця О. М., членів: начальника відділу № 41 Долженко М.В., начальника відділу 21, к.т.н. Зубкова В.М., склала цей Акт що засвідчує впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи Демської Наталії Павлівни 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 Н01К 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:

О. М. Замірець

Члени комісії:

М. В. Долженко

В. М. Зубков

Кридитна адреса:
61064 м. Харків, вул. Володимирська, 43 кв. 7
Поштова адреса:
61001 м. Харків, пр. Юрія Гагаріна, 20 оф. 2319

UKRINTECH
UKRAINIAN INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Поточний рахунок в ПАТ «ПВМБ»: UA15334851000000002600811191
Поточний рахунок в АТ КБ «ПРИВАТБАНК»: UA333515330000026003052222090

Телефон: +38 (057) 768-09-02
e-mail: info@ukrintech.com.ua

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРІНТЕХ»

Код ЄДРПОУ 37461045, ІПН № 374610420350
Витяг з реєстру платників ПДВ №1420354500038

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «НВП «УКРІНТЕХ»

 С.В. Демченко

« 27 » 01 2020 р.

м. Харків, пр. Гагаріна, 20, оф. 2319.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття ступеня кандидата технічних наук Демської Наталії Павлівни

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»;

Боцман О.С. – провідний інженер-електронник 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») був використаний стенд для дослідження якості конструкції плаского з'єднувача гнучких шлейфів для визначення найбільш вдалої для контактування форми притискаючої кришки з'єднувача, які розроблені у дисертаційній роботі Демської Н.П.

Результати впровадження довели, що запропоновані Демською Н.П. 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 запропонованої методики, 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

С. В. Демченко 

Члени комісії:

О.В. Вікторова 

О.С. Боцман 



ЗАТВЕРДЖУЮ
 Генеральний директор
 ТОВ «Науково-виробниче
 підприємство «ЛТУ»
 Г.І. Нікітський
 « 10 » вересня 2020 р.



АКТ
 про впровадження результатів дисертаційної роботи
 на здобуття ступеня кандидата технічних наук
 Демської Наталії Павлівни

Комісія у складі голови: Першого заступника директора-Головного конструктора – д.т.н., проф. Борщова В.М. та членів комісії: начальника відділення-заступника Головного конструктора – к.т.н. Проценко М.А., провідного наукового співробітника – к.т.н. Лістратенко О.М., начальника відділу – Кушнірук Р.А. склала акт про впровадження у виробництво у ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» результатів дисертаційної роботи Демської Н. П. при створенні модулів електронної техніки, а саме:

- технології контактування гнучких комутаційних структур із плоским з'єднувачем з нульовою силою вставки при створенні модулів електронної техніки для забезпечення стабільності підмикання;
- математичної моделі впливу конструкційних параметрів плоского з'єднувача на перехідний опір у зоні контактування гнучких комутаційних структур із його матрицею контактів.

Отриманий позитивний науково-технічний ефект дозволив забезпечити необхідні якісні характеристики модулів електронної техніки та їх компонентів при застосуванні гнучких комутаційних структур із плоским з'єднувачем з нульовою силою вставки.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:

 _____ В.М. Борщов

Члени комісії:

 _____ М.А. Проценко

 _____ О.М. Лістратенко

 _____ Р.А. Кушнірук



ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор Національного університету
«Запорізька політехніка»

проф. Беліков С.Б.

05 2019р.

впровадження результатів дисертаційної роботи
Демської Наталії Павлівни

Комісія у складі голови: декана факультету радіоелектроніки та телекомунікацій – к.т.н., доц. Кабака Владислава Семеновича та членів комісії: завідувача кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» – д.т.н., доц. Шило Галини Миколаївни, доцента кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» – к.т.н. Малого Олександра Юрійовича, доцента кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» – к.т.н., доц. Фурманової Наталії Іванівни, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Демської Н.П. на тему «Технологія електричних між'єднань модулів електронної техніки», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки у навчальний процес Національного університету «Запорізька політехніка».

Склад впровадження:

– метод контактування гнучких комутаційних структур (ГКС) на основі плоского роз'єму з нульовою силою вставки, що відрізняється тим, що за рахунок забезпечення рівномірного тиску на всі виводи ГКС дозволяє підвищити якість з'єднання ГКС з компонентами електронної техніки;

– технологія виготовлення ГКС на поліамідному носії, що забезпечує формування якісних нероз'ємних і роз'ємних з'єднань мікромодулів.

Комісія встановила, що результати дисертаційної роботи Демської Н.П. були впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» Національного університету «Запорізька політехніка» при проведенні лабораторних занять з курсів «Основи проектування електронних апаратів», «Матеріали та матеріалознавство електронних апаратів» та «Основи технології електронних апаратів» для спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Голова комісії

В. С. Кабак

Члени комісії

Г. М. Шило

О. Ю. Малий

Н. І. Фурманова

«Затверджую»
 Проректор з науково-педагогічної та
 методичної роботи Кременчуцького
 національного університету
 ім. М. Остроградського
 проф. Костін В. В.
 «30» 04 2020р.

АКТ

з впровадження результатів дисертаційної роботи Демської Наталії Павлівни

Комісія у складі голови: декана факультету електроніки та комп'ютерної інженерії – к.т.н., доц. Мосьпана Владислава Олександровича та членів комісії: завідувача кафедри електронних апаратів – к.т.н., доц. Фомовської Олени Владиславівни, доцента кафедри електронних апаратів – к.т.н., доц. Юрка Олексія Олексійовича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Демської Н. П. на тему «Технологія електричних між'єднань модулів електронної техніки», 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 ім. М. 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 Демської Н. П. були впроваджені у навчальний процес кафедри електронних апаратів Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського при проведенні лабораторних робіт та практичних занять з курсів «Матеріали та компоненти радіоелектронних засобів», «Програмно-технічні засоби діагностики і оцінка ризику», «Основи технології та автоматизація виробництва засобів телекомунікації та радіотехніки», «Технологія деталей» для спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Голова комісії



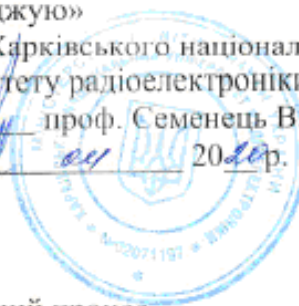
В.О. Мосьпан

Члени комісії

О.В. Фомовська

О.О. Юрко

«Затверджую»
 Ректор Харківського національного
 університету радіоелектроніки
 проф. Семенець В.В.
 «30» 04 2020р.



АКТ

з впровадження у навчальний процес
 результатів дисертаційної роботи
 Демської Наталії Павлівни

Комісія у складі голови: декана факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій – д.т.н., проф. Филипенка Олександра Івановича, членів комісії: д.т.н., доц., професора кафедри компютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) д.т.н., проф. кафедри КІТАМ Палагіна Віктора Андрійовича, заступника завідувача кафедри КІТАМ з наукової роботи – к.т.н., доц., професора кафедри КІТАМ Євсєєва Владислава Вячеславовича, к.т.н., доцента кафедри КІТАМ Разумова-Фризьюка Євгенія Анатолійовича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Демської Н. П. на тему «Технологія електричних між'єднань модулів 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 Демської Н. П. впроваджені у навчальний процес на кафедрі КІТАМ при викладанні дисциплін: «Компоненти та технології мікросистемної радіоелектронної техніки», «Технічні засоби автоматизації інтелектуальних виробництв», «Сучасні матеріали виробництва засобів радіоелектроніки», «Фізико-хімічні основи технології засобів радіоелектроніки» для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка, освітньо-професійних програм «Інтелектуальні технології засобів радіоелектроніки» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки».

Голова комісії

О.І. Филипенко

Члени комісії

В.А. Палагін

В.В. Євсєєв

Є.А. Разумов-Фризьюк

ДОДАТОК Г

Список опублікованих праць за темою дисертаційної роботи

1. Демська Н. П. Гнучкі комутаційні структури: аналіз технологій та галузі застосування. *Технология приборостроения*. 2019. №1. С. 38–42.
2. I. Botsman, N. Demska and V. Nevliudova, "Research of Mechanical Influences on Flexible Printed Circuits Parameters," 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-4, (*Scopus*)
3. Невлюдов І.Ш., Новоселов С.П., Боцман І.В., Демська Н.П. Розробка параметричної моделі гнучких комутаційних структур для дослідження механічних впливів на них // Фізичні процеси та поля технічних та біологічних об'єктів: матеріали XVII-міжнар. наук.-техніч. конф., 2-4 листопада 2018 р. Кременчук: КРНУ, 2018. С. 141-143.
4. Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Є. А., Демська Н. П., Гуріна Д. В. Аналіз впливу механічних напружень на можливість мініатюризації гнучких структур електронної техніки на прикладі ZIF з'єднувача. *Проблеми тертя та зношування*. 2017, № 3 (76). С. 74-80.
5. Палагин В. А., Разумов-Фризюк Е. А., Невлюдова В. В., Демская Н. П. Анализ и разработка конструкций разъемов для FFC или FPC шлейфов. *Технология приборостроения*. 2016. № 1. С. 50-53.
6. Богдан Ю.І., Демська Н.П., Невлюдова В.В., Палагін В.А., Разумов-Фризюк Є.А., Роменський В.І. Патент України № 103402 МПК H01R 12/82 (2011.01), Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки. 10.12.2015, бюл. № 23.
7. Разумов-Фризюк Є.А., Невлюдова В.В., Демська Н.П. Плоский роз'єм для електронних пристроїв з нульовою силою вставки // Новые технологии в машиностроении: материалы 27-международ. научн.-технич. конф., 3-8 сентября 2017 г. Коблево-Харьков : ХАИ. С. 77-78.
8. Nevliudov I., Omarov M., Botsman I., Demska N., Nevliudova V., Starodubcev M. Research of factors influencing the process of formation of welded microconnections in electronic modules. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering* , 2019 , 181-187 .

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

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

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

12. Демська Н. П., Палагін В. А., Омаров Ш. А. Математичні моделі мікроелектромеханічних міжз'єднань // Виробництво & Мехатронні Системи (M&MS-2019): матеріали III міжнар. наук.-техніч. конф., 24-25 жовтня 2019 р. Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 119-122.

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

14. Невлюдов І.Ш., Демська Н.П., Новоселов С.П., Разумов-Фризюк Є.А. Контроль якості електричних міжз'єднань гнучких структур. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2020. (1(63)), 103-112.

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

16. Невлюдова В.В., Демская Н.П., Бондаренко Ю.В. Основные причины отказов гибких коммутационных плат // Фізичні процеси та поля технічних та біологічних об'єктів: матеріали XVI-міжнар. наук.-техніч. конф., 3-5 листопада 2017 р. Кременчук: КРНУ, 2017. С. 33-34.

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

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

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

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

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

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

23. Притчин С. Е., Гуріна Д. В., Демська Н. П. Методи контролю якості гнучких структур // Radioelectronics & Informatics journal. 2016. №3. С. 3-6.

24. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Демська Н.П., Разумов-Фризюк Є. А. Моделювання вигину двошарової структури при термовпливах // Математичне моделювання процесів в економіці та управлінні проектами і програмами (ММП-2019): матеріали міжнар. наук.-техніч. конф., 09-13 вересня 2019 р. Харків-Коблево: ХНУРЕ, 2019. С. 55-58.

25. Демская Н. П., Невлюдов И. Ш., Боцман И. В., Старобудцев Н. Г. Эксплуатационные характеристики гибких печатных структур МЭМС-устройств // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка: матеріали XVII-міжнар. наук.-техніч. конф., 14-16 травня 2020 р. Кременчук: КРНУ, 2020 р. С. 62.

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