

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**Невлюдов І. Ш., Боцман І. В.,
Невлюдова В. В., Разумов-Фризюк Є. А.**

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ
ГНУЧКИХ КОМУТАЦІЙНИХ СТРУКТУР**

МОНОГРАФІЯ

КК НАУ
Кривий Ріг
2018

Рецензенти:

І. М. Бондаренко, д-р фіз.-мат. наук, проф., завідувач кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв Харківського національного університету радіоелектроніки;

В. М. Свищ, д-р техн. наук, проф., Заслужений діяч науки і техніки України, радник генерального директора Державного науково-виробничого підприємства «Об'єднання Комунар»

Невлюдов І. Ш., Боцман І. В., Невлюдова В. В., Разумов-Фризюк Є. А.

Н 40 Технологічне забезпечення якості гнучких комутаційних структур. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2018 р. – 256 с.

У монографії викладено результати дослідження та розробки методів підвищення якості гнучких комутаційних структур (ГКС) для електронної апаратури, зокрема за рахунок технологічного забезпечення їх виробництва, а також розробки й удосконалення методів оцінки та прогнозування параметрів ГКС на етапах їх проектування, виготовлення та експлуатації.

Наведено фізико-технологічну модель параметрів ГКС, а також модель руйнування ГКС під час циклічних пружнопластичних деформацій. Викладено сформовані на основі досліджень рекомендації з технологічного забезпечення якості ГКС.

Представлено нові конструктивно-технічні рішення випробувальних стендів для дослідження механічних впливів на ГКС. Викладено результати експериментальних досліджень із визначення впливу механічних параметрів на якість ГКС.

Представлено новий метод контактування ГКС із електронними компонентами на основі плаского з'єднувача з нульовою силою вставки та наведено технологічний процес виготовлення з'єднувача.

Викладено результати досліджень технологічних режимів операцій із формування міжшарових з'єднань і монтажу електронних компонентів на ГКС за допомогою ультразвукового зварювання.

Монографія може бути корисною для фахівців промисловості, наукових співробітників, а також аспірантів, магістрантів і студентів ВНЗ, які навчаються за спеціальностями, пов'язаними з розробкою, виробництвом та експлуатацією нової електронної техніки.

Рекомендовано Вченою радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол № 6 від 26 квітня 2018 року).

ISBN 980-969-578-288-9

ББК 32.944.1+30.700.4

© І. Ш. Невлюдов
І. В. Боцман
В. В. Невлюдова
Є. А. Разумов-Фризюк
2018

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
1. Аналіз стану проблеми створення та використання гнучких комутаційних структур	11
1.1. Аналіз тенденцій розвитку електронних засобів та особливостей застосування гнучких комутаційних структур у їх складі.....	11
1.2. Приклади перспективних технологій створення та напрямів застосування ГКС.....	17
1.2.1. Нові технології створення ГКС.....	17
1.2.2. Гнучка електроніка для військових застосувань.....	22
1.2.3. Гнучкі електронні компоненти для систем зв'язку.....	24
1.2.4. Напрями створення переносної електроніки на основі ГКС.....	26
1.2.5. Приклади використання ГКС для створення засобів контролю друкованих плат та електронних компонентів.....	28
1.3. Аналіз характеристик ГКС та вимог до них.....	34
1.3.1. Аналіз особливостей використання ГКС.....	34
1.3.2. Формування вимог до матеріалу ГКС.....	39
1.3.3. Аналіз умов експлуатації та впливів на ГКС.....	42
1.3.4. Аналіз електромагнітної сумісності компонентів ЕЗ на основі ГКС.....	53
1.3.5. Аналіз особливостей проектування та технології виготовлення ГКС.....	58
1.4. Аналіз методів забезпечення якості ГКС у ЕЗ.....	60
1.4.1. Показники якості електронних виробів на основі ГКС.....	61
1.4.2. Показники надійності електронних виробів на основі ГКС.....	62
1.4.3. Методи забезпечення якості електронних виробів на основі ГКС.....	63
2. Фізико-технологічні моделі прогнозування якості ГКС у електронних модулях.....	66

2.1.	Прогнозування параметрів ГКС у електронних модулях у рамках вирішення завдання забезпечення їх якості.....	66
2.2.	Розробка та обґрунтування моделей дестабілізуючих факторів.....	69
2.3.	Розробка фізико-технологічної моделі для відображення зміни параметрів ГКС у електронних модулях	74
2.4.	Метод прогнозування параметрів ГКС у електронних модулях	86
2.5.	Вибір змінних, що визначають поведінку ГКС у електронних модулях.....	90
2.6.	Автоматизована система проектування ГКС «Flexible PCB Designer».....	97
3.	Моделі руйнування ГКС у складі електронних засобів і методи підвищення їх якості.....	101
3.1.	Аналіз видів деформацій, що виникають у ГКС	101
3.1.1.	Механізми руйнування ГКС	101
3.1.2.	Деформації типу «вигин»	102
3.1.3.	Деформації типу «розтягнення-стискання».....	103
3.1.4.	Резонансне руйнування	104
3.2.	Моделювання циклічних пружнопластичних деформацій ГКС під час багаторазових згинань	105
3.3.	Аналіз деформацій типу «розтягнення».....	113
3.4.	Аналіз резонансного руйнування ГКС.....	121
3.5.	Аналіз механізму утворення тріщин у провідниковій системі ГКС.....	129
3.6.	Аналіз можливих руйнувань електричного контакту «електронний компонент-основа ГКС»	134
3.7.	Рекомендації з технологічного забезпечення якості ГКС .	136
4.	Експериментальні дослідження впливу механічних дій на ГКС у електронних модулях.....	140
4.1.	Аналіз дестабілізуючих факторів і визначення вхідних параметрів для проведення досліджень	140
4.2.	Експериментальні дослідження впливу вібрацій на вихідні параметри ЕЗ на основі ГКС	142
4.2.1.	Постановка завдань дослідження	142

4.2.2. Принцип дії та опис конструкції випробувального устаткування	142
4.2.3. Низькочастотний вібростенд для контролю параметрів ЕЗ на основі ГКС.....	144
4.2.4. Проведення експериментальних досліджень.....	145
4.2.5. Аналіз результатів експериментальних досліджень.....	154
4.3. Дослідження механічних деформацій ГКС.....	162
4.3.1. Опис експериментальної установки для дослідження впливу механічних навантажень на ГКС	162
4.3.2. Проведення експерименту із визначення тиску, необхідного для руйнування рознімного з'єднання ГКС	164
4.4. Дослідження деградації діелектричної основи ГКС.....	166
4.4.1. Експериментальна установка для дослідження електричного пробою діелектриків	166
4.4.2. Експеримент із визначення напруги, необхідної для пробою основи ГКС під час її експлуатації у нормальних умовах	166
4.4.3. Експеримент із дослідження електричного пробою основи ГКС за її експлуатації в умовах із підвищеною вологістю	168
4.4.4. Експеримент із дослідження електричного пробою основи ГКС за імітації експлуатації в умовах морського середовища	169
4.5. Дослідження зразка ГКС на механічний розрив	170
4.5.1. Експериментальна установка для дослідження механічного розриву.....	170
4.5.2. Експеримент із дослідження механічного розриву ГКС.....	171
4.6. Моделювання напружено-деформованого стану ГКС.....	171
5. Технологічне забезпечення якості рознімних та нерознімних з'єднань ГКС у електронних модулях	178
5.1. Аналіз особливостей гнучких рознімних з'єднань	178
5.2. Плаский з'єднувач для електронних пристроїв з нульовою силою вставки на основі ГКС	179

5.3.	Розробка технологічного процесу виготовлення плаского з'єднувача для ГКС	182
5.4.	Експеримент із визначення перехідного опору ZIF FPC-з'єднувача.....	185
5.5.	Дослідження впливу технологічних режимів операції УЗ-мікрозварювання на надійність монтажних з'єднань у ГКС.....	192
5.5.1.	Постановка завдання.....	192
5.5.2.	Планування та проведення факторного експерименту, обробка результатів експерименту.....	193
5.5.3.	Оптимізація експериментально-статистичної моделі процесу УЗ-зварювання.....	198
5.6.	Експериментальне визначення оптимальних технологічних режимів процесу монтажу електронних засобів на основі ГКС.....	202
5.6.1.	Методика проведення експерименту.....	202
5.6.2.	Експериментальні дослідження.....	209
	Висновки.....	215
	Перелік посилань.....	218
	Додаток А. Математичне формулювання задачі моделювання згинальних коливань ГКС.....	234

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

FFC – Flexible Flat Cable, гнучкий плаский кабель;
FPC – Flexible Printed Circuit, гнучка друкована плата;
ZIF – Zero Insertion Force, нульова сила вставки;
БДП – багатошарова друкована плата;
БКП – багатошарова комутаційна плата;
БПП – багатозондовий підмикальний пристрій;
ГДК – гнучкий друкований кабель;
ГДП – гнучка друкована плата;
ГЖБС – гнучко-жорстка багатошарова схема;
ГЖП – гнучко-жорстка плата;
ГКС – гнучка комутаційна структура;
ГМХ – габаритно-масові характеристики;
ДП – друкована плата;
ЕЗ – електронний засіб;
ЕК – електронний компонент;
ЕМС – електромагнітна сумісність;
ЖЦ – життєвий цикл;
ІС – інтегральна схема;
КІН – коефіцієнт інтенсивності напружень;
КМП – компоненти, що монтуються на поверхню;
КП – контактна площинка;
МЕМС – мікроелектромеханічні системи;
МСЕ – метод скінченних елементів;
МСТ – мікросистемна техніка;
НДС – напружено-деформований стан»;
ПЗ – правило зуву;
ПМ – параметрична множина;
ПФЕ – повний факторний експеримент;
СЕ – скінченні елементи;
ТЗ ДГКС – тестовий зразок двошарової ГКС;
ТП – технологічний процес;
ТПЕ – теорія планування експериментів;
УЗ-зварювання – ультразвукове зварювання;

ВСТУП

Сучасний рівень розвитку техніки характеризується комплексною розробкою складних електронних засобів і інтенсифікацією їх застосування в усіх галузях народного господарства, науки і техніки.

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

Однією з основних тенденцій розвитку техніки є перехід від традиційної апаратури до електронних засобів (ЕЗ) на гнучких основах у рамках розвитку в усьому світі напряду гнучкої гібридної електроніки. В умовах мікромініатюризації електронних виробів застосування гнучких комутаційних структур (ГКС), до яких відносяться гнучкі електронні компоненти, елементи гнучкої електроніки, друковані плати й елементи між'єднань, забезпечує низку переваг під час створення як стаціонарних, так і рухомих конструкцій. Особливо доцільним видається застосування подібних компонентів для авіаційної та космічної техніки, портативних телекомунікаційних пристроїв, для систем наземного та супутникового зв'язку, військової, побутової та медичної апаратури, а також для пристроїв мікросистемної техніки (МСТ) [1-6].

Вимоги до електронних засобів постійно зростають у зв'язку з жорсткістю умов їх експлуатації. При цьому існує серйозна проблема забезпечення якісних показників гнучких компонентів, оскільки вони можуть піддаватися великій кількості дестабілізуючих чинників на всіх етапах життєвого циклу (ЖЦ). Так, на-

приклад, на модулі, які встановлюються на рухомих об'єктах – автомобілях, літаках, ракетах і т. п., у процесі експлуатації можуть діяти інтенсивні механічні впливи – удари, вібрації, лінійні перевантаження.

Також слід зазначити, що у багатьох випадках мініатюризація підвищує ризики виробництва та знижує надійність електронних пристроїв, особливо, за умов збільшення розмірів схем. Існують проблеми створення якісних матеріалів для виготовлення ГКС. Стабільність їх геометричних розмірів виявляється гіршою, ніж у більшості матеріалів для виробництва традиційних жорстких модулів, отже, внаслідок більш складної структури схем, ці викликані матеріалом зміщення можуть бути локалізовані та непередбачувані у процесі виробництва. У результаті, в міру ускладнення конструкцій, це може позначитися на ефективності проектування, виробництва й експлуатації нових видів виробів на основі ГКС, зокрема, за їх широкого впровадження у складі компонентів мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [2].

Крім того для багатопарових ГКС слід враховувати взаємодію між матеріалами, конструкцію та технологію складання, щоб уникнути потенційно можливих проблем з різним ступенем розширення та гнучкістю шаруватого матеріалу, зі зміщенням матеріалу і впливом вологості та ін.

Таким чином, підвищення техніко-економічних показників електронних виробів, що досягається застосуванням ГКС, супроводжується посиленням вимог до рівня конструкторсько-технологічного забезпечення їх якості та ускладненням технологічних процесів (ТП) їх виробництва [7-18].

Однією з серйозних проблем під час розробки електронних модулів є забезпечення високої якості контактування ГКС зі з'єднувачами для їх під'єднання до жорстких частин [19].

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

В. Т. Балабановим, С. М. Семеніним та ін. [7-27].

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

Метою виконуваних авторами досліджень було підвищення якості ГКС у виробках електронної техніки шляхом розробки технологічного забезпечення їх виробництва на основі досліджень електрофізичних і технологічних параметрів ГКС та їх рознімних і нерознімних з'єднань.

Для досягнення цієї мети вирішувалися такі завдання:

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

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ГНУЧКИХ КОМУТАЦІЙНИХ СТРУКТУР

1.1. Аналіз тенденцій розвитку електронних засобів та особливостей застосування гнучких комутаційних структур у їх складі

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

Важливу роль у створенні електронної техніки нових поколінь відіграють:

- нові радіоелектронні матеріали з високими електрофізичними параметрами, якістю і чистотою всіх використовуваних у виробництві матеріалів;
- використання сучасної елементної бази на основі компонентів високого рівня інтеграції, функціональної електроніки;
- нові прецизійні та високопродуктивні ТП, що реалізуються в умовах вакуумної гігієни (вимог технологічного мікроклімату), і сучасне технологічне оснащення високого рівня автоматизації та інтелектуалізації;
- розширення сфери застосування нових принципів функціонування приладів, у тому числі спільного використання різних фізичних явищ у конкретних пристроях;
- використання нового принципу конструювання та виготовлення апаратури на основі гнучких структур, що забезпечують покращення експлуатаційних властивостей виробів еле-

ктронної та мікросистемної техніки з розподіленою, зосередженою гнучкістю, конструкцій зі змінною формою [2-3].

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

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

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

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

Однією з основних тенденцій приладобудування в усьому світі є створення пристроїв, які отримали загальну назву «гнучка електроніка».

Такі пристрої зараз розробляються у багатьох науководослідних лабораторіях найбільших виробників електронних засобів. Сфера майбутніх застосувань гнучкої електроніки є досить широкою й охоплює як побутову техніку, так і компоненти війсь-

кової, бортової, космічної, медичної та промислової апаратури.

Таким чином, заміна жорстких компонентів апаратури на гнучкі з метою підвищення їх якості, функціональних можливостей, надійності та зменшення габаритно-масових характеристик (ГМХ), трудомісткості виготовлення, вартості, а також розробка технологічної оснастки для виробництва електронних модулів, що використовує особливості гнучких структур, є актуальними завданнями.

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

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

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

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

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



Рисунок 1.1 – Застосування ГКС у електронних модулях

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

- тензорезистори, п'єзорезистори з еластомірів, гігіростори на поліімідній плівці;
- малоінерційні плівкові термопари, плівки полівінілідентфториду з п'єзоелектричним ефектом;
- плівкові п'єзоелектричні датчики, які не мають власних резонансних частот, які використовуються для спектральної сейсмологічної розвідки;
- високочастотні механічні резонатори для різних діапазонів хвиль, фільтри;
- мікрофони-телефони для різних діапазонів частот від інфрачервоного до гігагерцових;
- п'єзодвигуни штовхального типу;
- лінійні та кутові акселерометри, гіроскопи;
- мікроманіпулятори, актюатори, гіроскопи;

- кольорові світлофільтри з мільйонами елементів для КМОН- і ПЗЗ-матриць фотоапаратів, відеокамер, тепловізорів та ін.;
- плівкові елементи сонячних батарей з перовскіту є найбільш перспективними для сонячної енергетики;
- пристрої зчитування інформації з магнітних носіїв;
- гарнітури «hand-free» мобільних телефонів.

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

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

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

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

Зміна форми деталі (конфігурації) може забезпечити зміну властивостей пристрою. Наприклад, змінити аеро- або гідродинамічний опір руху, підйомну силу у відповідності до задале-

гідь передбаченого режиму роботи. Прикладом є утворення зазору між жорстким диском і магнітною голівкою запису-зчитування.

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

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

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

Із використанням методу конвергенції на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) ХНУРЕ, де розроблені багатозондові підмикальні пристрої для контролю електричних параметрів багатошарових друкованих плат, товстоплівкових і тонкоплівкових монтажних плат, електронних компонентів з матричними кульковими виводами, плоских мікроз'єднувачів з нульовою силою вставки (ZIF), принцип дії яких заснований на використанні гнучких полімерних підмикальних пластин [38].

Розробками ГКС займається багато відомих зарубіжних фірм, університетів і вчених: С. Вогель, А. Мідха, А. Хоуелл, Свідхар Кота, фірми FlexSys, IBM, лабораторії університетів, де вважають ГКС компонентами, що здатні замінити у значній час-

тині звичні жорсткі конструкції, з огляду на цілий ряд переваг гнучких «пристроїв» живої природи [3].

Проблемам розробки, виготовлення, тестування й експлуатації ГКС присвячено безліч робіт авторів з країн СНД, Європи та інших (Joseph Fjelstad, Peter Macleod, О. І. Кіліна, А. М. Медведєва, Г. В. Милова, С. М. Семеніна, Yong-Jun Kim, Mark G. Allen, Nix WD, Netting Keith та ін.). У їхніх роботах розглянуті питання проектування та розробки технологій виробництва друкованих плат, шлейфів на плівковому носії, напівпровідникових датчиків тиску [1, 6, 9, 39-40]. У Харкові на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» під керівництвом В. М. Борщова розроблено технологію створення багатошарових комутаційних плат на основі полііміду [7, 17].

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

1.2. Приклади перспективних технологій створення та напрямів застосування ГКС

1.2.1. Нові технології створення ГКС

Одним з сучасних високотехнологічних напрямів створення електронних схем є технологія Silicon Islands, що дозволяє створювати електронні інтегральні плати на гнучкій основі [41]. Використовуваний гнучкий матеріал може згинатися у межах 140-градусного діапазону і дозволяє поворот на 90 градусів на кожній ділянці розміром у 1 см. Це досягнення дозволяє створювати електронні компоненти, які будуть стійкими до багатьох механічних деформацій. Вчені впевнені, що така гнучкість дозволить створювати електронні пристрої, які можна буде імплантувати в організм людини (рис. 1.2).

Це виявиться корисним не тільки для кібер-модернізації людини, але і для вдосконалення конструкції зовнішніх електронних пристроїв, що використовуються в абсолютно інших, практично будь-яких, сферах. Гнучкі плати обумовлюють істотне

поліпшення механічних якостей сучасних електронних пристроїв, які стануть, перш за все, більш стійкими до різного роду пошкоджень. Принцип побудови гнучких схем є досить простим: на гнучкій основі розташовані кремнієві електронні вузли, що утворюють своєрідні острови; цей принцип і обумовив назву технології.



Рисунок 1.2 – Приклад гнучкої структури, виготовленої за технологією Silicon Islands

У центрі CMST (Centre for Microsystems Technology) при IMEC були розроблені дві нові технології [42-44]. Перша – це технологія ультратонкого корпусування кристалів UTCP (Ultra-Thin Chip Package). У відповідності до методу UTCP, кристали завтовшки 20-30 мкм інтегруються у поліімідні шари. Нанесення тонкої металізованої плівки на розгалужні контакти дозволяє створювати мініатюрні, легкі та гнучкі корпуси завтовшки менше ніж 100 мкм.

При цьому пристрої, виготовлені за технологією UTCP, поєднують у собі малу товщину, надзвичайну гнучкість і високу функціональність. Чипи є інкапсульованими між згорнутими поліімідними шарами, а розгалужені міжз'єднання реалізуються з використанням мікропереходів і тонкоплівкової металізації. Цільовими сферами застосування даної технології є медичні та мобільні пристрої (рис. 1.3-1.4).

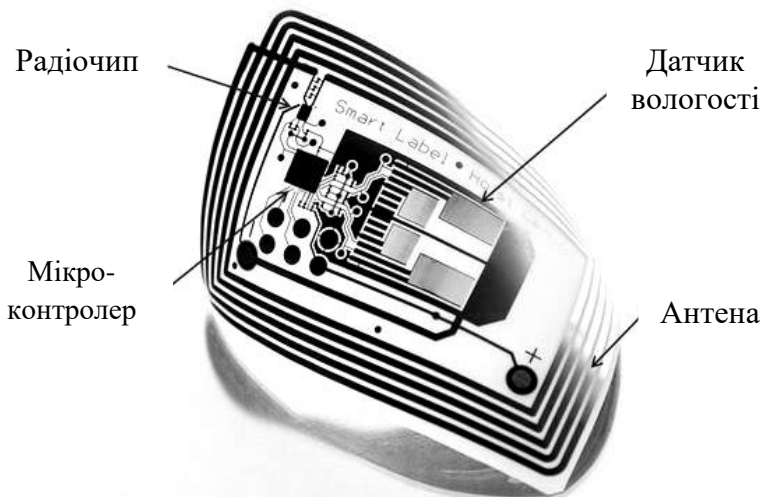


Рисунок 1.3 – Смарт-мітка з двома мікросхемами та 10 пасивними компонентами, вбудованими у повністю пласку гнучку підкладку товщиною 250 мкм

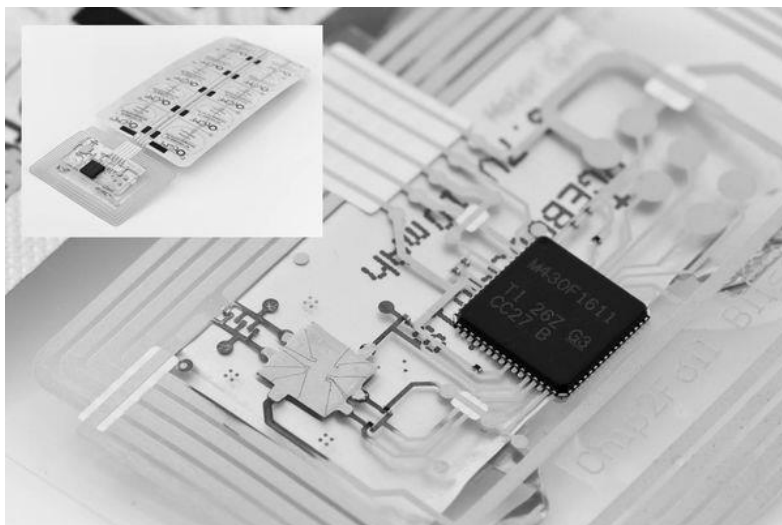


Рисунок 1.4 – «Розумний блістер» з інтегрованим NFC-радіочипом

Мініатюризація, яку забезпечує метод УТСП, і простота інтеграції в об'ємні конструкції завдяки гнучкості електронних схем дозволяють значно скоротити розміри та маси систем, що є важливою перевагою для їх застосування також у космічній техніці. Важливим є і те, що міцність між'єднання, яку забезпечують ці нові технології, у подальшому можна підвищити. Завдяки заливці в еластичні матеріали, електронні пристрої, що розтягуються, є менш чутливими до вібрацій. Ультратонкі пристрої можна вбудувати у гнучкі або жорсткі друковані плати методами ламінування, свердління наскрізних отворів і їх металізації.

Виробництво за технологією УТСП і заливка друкованих плат не потребують паяння, що дозволяє уникнути відповідних проблем з надійністю експлуатації пристроїв у жорстких умовах.

Із залитим у поліімід кристалом можна поводитися як з корпусом: наприклад, встановити на контакти шарикові виводи з припою, а складений кристал припаяти до підкладки з шаром між'єднань. Або ж можна інтегрувати ультратонкий корпус у жорсткі або гнучкі шари друкованої плати. Кристал можна протестувати до інтеграції, що має явну перевагу у порівнянні з безпосереднім вбудовуванням безкорпусних кристалів.

Друга технологія, запропонована науковим центром ІМЕС та Гентським університетом, – технологія SMI (Stretchable Moulded Interconnect) – базується на стандартному методі виробництва гнучко-жорстких друкованих плат. Однак еластичні між'єднання (рис. 1.5) виготовляються з міді у вигляді меандрів із основою з гнучкої матеріалу (наприклад, поліімиду), а не прямими, як зазвичай. Для заливки проводів і компонентів використовуються гнучкі матеріали, головним чином поліметилсилоксановий каучук (ПМС), поліуретан або інший пластик, які слугують основою електронної схеми [45-46]. Подковоподібні провідники, інтегровані в еластичну підкладку, можуть розтягуватися під впливом механічних сил і повертатися до початкового стану, не втрачаючи при цьому своєї функції. За механічними властивостями провідники подковоподібної форми у поєднанні з еластичною підкладкою нагадують двовимірну пружину.

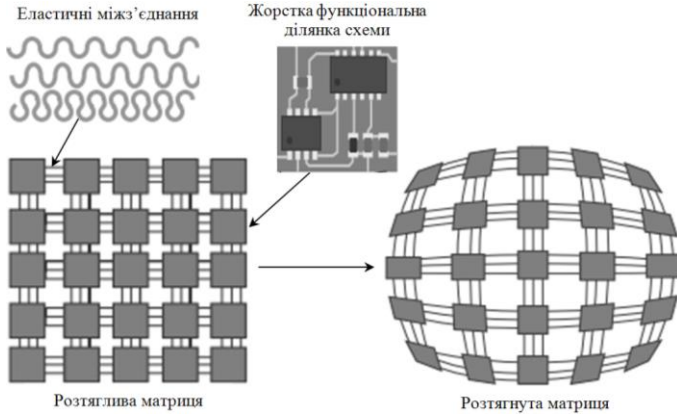


Рисунок 1.5 – Концепція розтягливих електронних схем [46]

На рис. 1.6 наведено приклад еластичної електронної системи зі встановленими компонентами, реалізованої за технологією SMI.

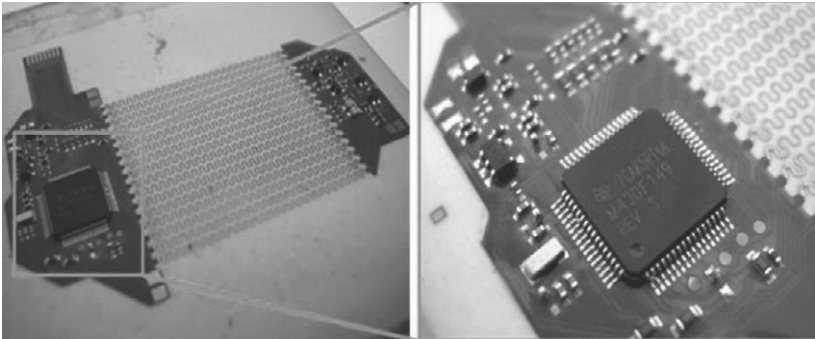


Рисунок 1.6 – Зразок розтягливої системи моніторингу дихання

Одним з найвищих пріоритетів у розглянутих гнучких електронних пристроях під час їхньої експлуатації є висока міцність.

Схема має розроблятися так, щоб вона витримувала розтягування та стиснення без пошкодження схеми. Ці проблеми ста-

ють більш суттєвими у тих випадках, коли схема вигинається під кутом більше за 90 градусів. Якщо кут вигину ГКС перевищує 90 градусів, імовірність пошкодження схеми у результаті розтягування або стиснення суттєво зростає.

1.2.2. Гнучка електроніка для військових застосувань

Партнерство з розробки гнучких електронних компонентів – тонких сенсорних екранів, які обертаються навколо руки, або крил літальних апаратів, які представляють собою датчики, – є одним із напрямів, котрі активно реалізуються Міністерством оборони США у рамках забезпечення впровадження інновацій Кремнієвої долини та запрошення до співпраці компаній регіону для розробки засобів озброєння наступного покоління.

У 2015 році у місті Сан-Хосе (штат Каліфорнія, США) з метою розробки й удосконалення гнучкої гібридної електроніки створено державний консорціум FlexTech Alliance, що функціонує за участю приватного капіталу.

До складу консорціуму увійшли більше ніж 160 високотехнологічних компаній і установ, у тому числі компанії Boeing, Apple, Motorola Mobility та Lockheed Martin, а також науково-дослідні організації та вищі навчальні заклади США, зокрема Корнельський, Гарвардський, Стенфордський і Нью-Йоркський університети та Массачусетський технологічний інститут.

Пентагон виділив на проведення досліджень FlexTech Alliance протягом п'яти років 75 млн. доларів. Грант уряду покликаний допомогти створити виробничу мережу для гнучкої електроніки по всій території США.

Таким чином, заплановано зростання виробництва нових видів гнучкої переносної електроніки, яка, у кінцевому підсумку, буде використовуватися в обшивці літаків і кораблів, військових приладах і системах озброєння, у пристроях для моніторингу здоров'я, а також побутовій електроніці. Для споживчого ринку прориви у галузі гнучкої електроніки можуть сприяти розвитку переносних комп'ютерів.

Для Міністерства оборони США можливі застосування починаються зі зменшення масогабаритних показників і енергоспоживання пристроїв, які використовуються збройними силами. На сьогоднішній день обмундирування звичайного морського піхотинця важить 40-60 кг, що значно перевищує рекомендовані 23 кг. Новий технологічний напрям створює великі перспективи розробки персональних і переносних датчиків, які Пентагон все частіше рекомендує використовувати особовому складу. Одним із головних застосувань, наприклад, можуть стати нові типи комп'ютерних екранів, які зможуть згортатися як рукав навколо передпліччя солдата, замінюючи важке та громіздке комп'ютерне обладнання. Таким чином, солдати зможуть носити гнучкі електронні компоненти та пристрої на своєму тілі та на одязі (рис. 1.7).

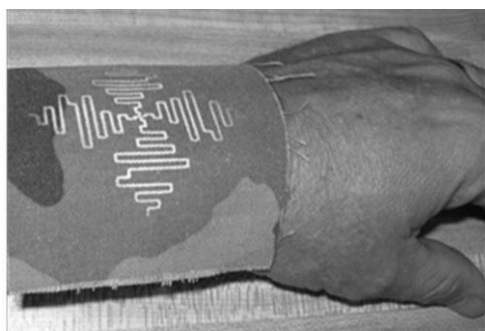


Рисунок 1.7 – Антена, надрукована на військовій формі [47]

Прогнозують, що гнучка електроніка допоможе інженерам створити нові види роботів, які матимуть меншу вагу і при цьому – велику мобільність і більшу функціональність, ніж сучасні роботи.

Напевно, найважливіші військові переваги отримають конструктори літальних апаратів, які зможуть використовувати гнучку електроніку для розробки набагато більш невлитої електронної бойової техніки та засобів зв'язку для реактивних літаків, літаків-шпигунів і дронів [48].

1.2.3. Гнучкі електронні компоненти для систем зв'язку

Виробник радіочастотних антен і антенних модулів для додатків M2M і Інтернету речей компанія Antenova до свого великого сімейства гнучких друкованих антен додала два нових виробу для систем позиціонування, названих Bentoni і Asper (рис. 1.8).

Антенa Bentoni (рис. 1.8, а) призначена для прийому сигналів усіх існуючих у світі загальнодоступних супутникових технологій: GPS, ГЛОНАСС, Beidou та GALILEO. Її розроблено для використання у системах стеження, портативних пристроях, мережевих компонентах, дронах і у переносній електроніці.



Рисунок 1.8 – Антени Bentoni (а) та Asper (б)

Здвоєна антенa Asper складається з двох роздільних антенних систем, об'єднаних в одну конструкцію (рис. 1.8, б). Реалізована у ній комбінація антен діапазонів 1559...1609 МГц і 2,4...2,5 ГГц дозволяє використовувати пристрій як для завдань позиціонування, так і для бездротового зв'язку. Така антенa підійде для систем стеження, спортивних камер, відеореєстраторів, мережевих пристроїв і портативної електроніки [49-50].

Обидві антени відрізняються високими технічними характеристиками і гарною електричною ізоляцією від навколишніх елементів усередині пристрою.

Розробки Bentoni і Asper – найостанніші гнучкі друковані антени у сімействі flexiiANT компанії Antenova. Вони поставля-

ються з роз'ємом I-PEX MHF і високочастотним кабелем діаметром 1,13 мм, довжина якого обирається користувачем серед трьох запропонованих варіантів. Для економії робочого простору у пристроях антени можна згинати та згортати.

Колектив розробників антен компанії Antenova націлений на створення таких продуктів, які дозволяли б розробнику зручно інтегрувати їх у свої схеми, а не конструювати пристрій, розміщуючи його елементи навколо антени. Простоті підключення антен сприяє, зокрема, клейовий шар, завдяки якому антени можуть бути легко закріплені всередині корпусу електронного пристрою [51].

Антени з гнучких полімерних друкованих плат забезпечують рішення для ринку M2M (GSM/WLAN), у застосуваннях, де критичним є розмір компонентів. Антена може бути встановлена безпосередньо на корпусі пристрою. Для монтажу потрібно зняти захисну плівку з клейового шару, нанесеного на одну сторону антени та приклеїти її на вибране місце. Незважаючи на дуже тонкий матеріал, антена є дуже міцною і витримує необхідні випробування пристрою на температурні зміни та вібрацію. Ця антена не залежить від кола заземлення друкованої плати, що економить простір, внаслідок чого така антена підходить навіть для пристроїв невеликого розміру, наприклад, переносних персональних пристроїв стеження, пристроїв автомобільної навігації тощо. Антени бувають різної форми та розмірів (рис. 1.9). Кабелі та з'єднувачі можуть бути довільними: стандартними варіантами є IPEX, U.FL або відкритий облужений кінець кабелю [32].

На рис. 1.8, а зображено антену, що працює на частотах 900/1800/1900 МГц. Її робочий температурний діапазон становить $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +105\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рисунках 1.8, б та в наведено фотографії антен, що налаштовуються на частоти 900/1800/2100 МГц. Їхні робочі температури знаходяться у діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Усі представлені антени мають ефективність 50 %, хвильовий опір 50 Ом, зворотні втрати $\leq -10\text{ дБ}$, їхня поляризація – лінійна.

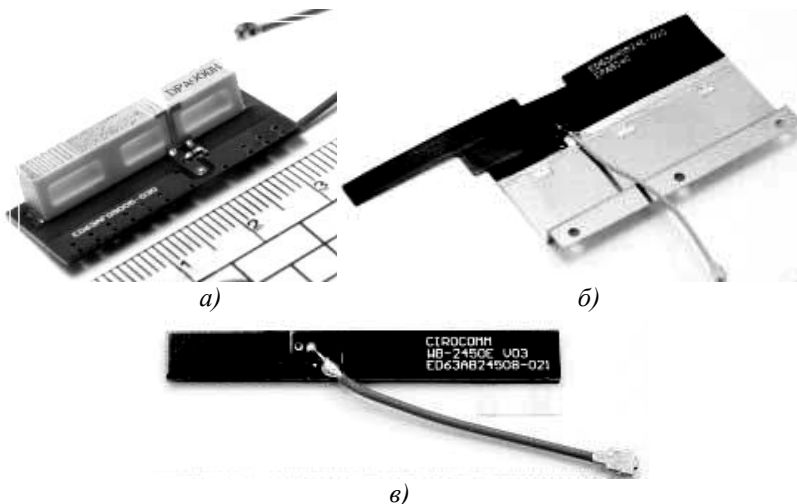


Рисунок 1.9 – Варіанти конструктивного виконання вбудовуваних GSM/UMTS антен

1.2.4. Напрями створення переносної електроніки на основі ГКС

На сьогоднішній день ринок переносної електроніки представлений смарт-годинниками, окулярами, браслетами, фітнес-трекерами. Також світові виробники розробляють сучасні варіанти жіночої біжутерії, які б могли конкурувати з традиційними аксесуарами завдяки своїм смарт-функціям.

Компанії починають тестувати використання переносної електроніки для основних робочих ситуацій, а саме для безпечного доступу до робочого місця, управління робочим часом співробітників, зв'язку співробітників у режимі реального часу.

Що стосується створення переносних пристроїв, які здебільшого містять у своєму складі гнучкі друковані схеми, то можна навести багато прикладів, уже реалізованих на практиці [30, 34-36, 52-53].

Так, наприклад, розроблені мікросхеми-тату і гнучкі електронні пристрої, що розчиняються у воді [54-55].

Вчені Токійського університету, в свою чергу, створили перший прототип датчика, що у 30 разів легший за папір для принтера і у 5 разів тонший за харчову плівку того ж розміру [56].

В основі нового сенсора лежить полімерна підкладка (PEN – polyethylene naphthalate) товщиною 1 мкм. Ширина одного рулону плівки становить 10 см, а довжина – 10 км. Така плівка використовується в серійному виробництві конденсаторів.

Японські вчені зуміли виправити головний недолік PEN-плівки, що полягає у її занадто грубій поверхні, яку видно тільки під мікроскопом. Дослідники виявили, що за умови правильного нанесення шарів елементів електроніки вказаний недолік стає перевагою: на плівку добре наноситься метал. Це дозволяє випустити тонку електроніку з високими характеристиками міцності.

Прототип тактильного сенсора складається з PEN-плівки розміром 4,8 см², одного шару інтегральних схем і шару з 144 тактильними схемами.

«Невидимі» електронні пристрої можуть використовуватися в медицині, робототехніці та інших галузях.

Для створення струмопровідних доріжок мікросхем інженери з Федеральної політехнічної школи Лозанни (EPFL, Швейцарія) розробили принципово новий підхід, що дозволив забезпечити працездатність гнучкої електроніки за умови багаторазового розтягування [57].

Розробники використали з цією метою суміш рідкого галію та золота. Галій має високу провідність, однак залишається рідким за кімнатної температури, тому зазвичай не підходить для виготовлення електроніки. У вільному стані він розривається на окремі краплі, як ртуть. Однак поряд із золотою плівкою він тече суцільним потоком, не розриваючись, тим самим не піддаючи загрози працездатності мікросхем. Металева суміш у готовому вигляді заливається до наноканалів, виготовлених за допомогою методу електронно-променевої літографії у матеріалі-підкладці.

Підкладку виконали з гнучкого пластика, який є дуже стійким до впливу ультрафіолету. У результаті мікросхему в цілому можна розтягувати вздовж до чотирьох разів і навіть скручувати та перекручувати її, і вона не втратить своєї працездатності. Рідинні доріжки при цьому просто звужуються, але потік металу в них залишається безперервним.

1.2.5. Приклади використання ГКС для створення засобів контролю друкованих плат та електронних компонентів

На кафедрі КІТАМ ХНУРЕ розроблено конструкції багатозондових підмикальних пристроїв (БПП) для електричного контролю багатозондових комутаційних плат (БКП), а також для вхідного та функціонального контролю електронних компонентів (ЕК) із матричними кульковими виводами типу BGA/CSP [38, 58-60].

Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій для контролю ЕК (рис. 1.10) містить корпус-основу 1, контакти-зонди у вигляді майданчиків на притискній пластині – гнучкій багатозондовій платі 2 з провідниками, виготовленій з фольгованих діелектриків, притискування якої до контрольованих електронних компонентів 3 здійснюється стисненням повітрям, решітку 4 (забезпечує захист від провисання), ущільнювальну прокладку 5, яка забезпечує герметичність корпусу, фіксуючий елемент 6, кришку 7 і повітряний об'єм зі штуцером.

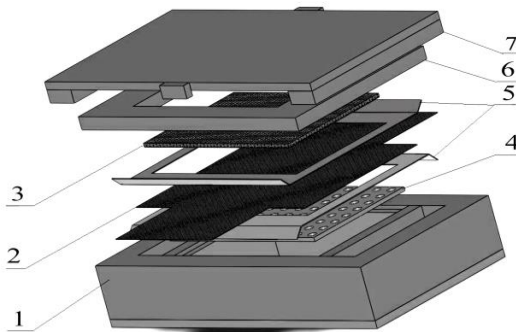


Рисунок 1.10 – Тривимірна модель БПП

Схему підключення BGA-компонентів до БПП наведено на рис. 1.11.

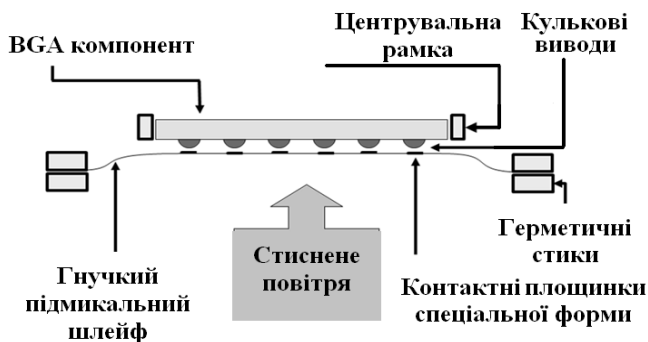


Рисунок 1.11 – Схема підключення БПП до BGA-компонентів

Зонди БПП для контролю БКП виконуються у вигляді кульок за технологією BGA, що дозволяє забезпечити їхні малі розміри (діаметр до 50 мкм), високу щільність (крок розміщення до 100 мкм), високу якість контактування, простоту виготовлення, а також низьку трудомісткість використання підмикального пристрою порівняно з аналогами.

Для підвищення надійності контролю БКП за допомогою БПП запропоновано використовувати спеціальну форму контактних зондів, із розщепленням кулькових зондів на декілька окремих частин з метою дублювання контакту. На рис. 1.12 наведено приклад реалізації одного зонда БПП, розділеного на чотири частини, та з'єднання попарно-перехресно пар a-d, b-c кульок цього зонда у різних шарах багатопшарової гнучкої плати.

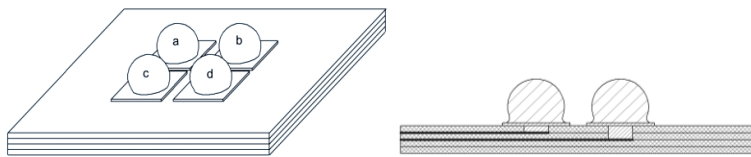


Рисунок 1.12 – Зонд для підключення до контрольованих точок на БКП

Для контролю BGA-компонентів використовуються плоскі контактні майданчики. Кожний окремий зонд-майданчик (рис. 1.13), як і у випадку з БПП для контролю БКП, поділяється на декілька частин, які призначені для контактування з одним кульковим виводом ЕК так, що окремі частини зонда стануть електрично сполученими між собою тільки за умови контактування щонайменше двох частин до одного виводу.

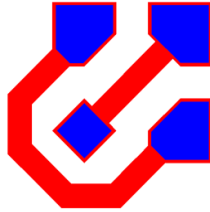


Рисунок 1.13 – Зонд-майданчик для підключення до виводу ЕК

Притиснення контактного пристрою до контрольованого виробу здійснюється за допомогою стисненого повітря. Завдяки однаковому контактному тиску в контактних парах значно знижується кількість помилок під час контролю в порівнянні з іншими пристроями з непереміщуваними контактами.

Пневматичне притиснення значно знижує вірогідність відсутності контакту (через різницю тиску в різних точках контролю) в порівнянні з механічним або магнітним притисненням.

Підмикальний шлейф забезпечує доступ контактного пристрою до великої кількості точок контролю на контрольованому виробі (до декількох тисяч). Максимальна кількість виводів визначається кількістю шарів підмикального шлейфу, кроком розміщення зондів, габаритами об'єкта контролю.

Описані конструктивно-технологічні рішення БПП забезпечують велику щільність розміщення зондів (до 100 мкм), високу якість контактування, простоту виготовлення, а також низьку трудомісткість використання БПП порівняно з аналогами. Водночас використання гнучкого шлейфа дозволяє підключити пристрій безпосередньо до вимірювального пристрою та виключити

проміжні з'єднання, а також поліпшити механічні й електричні характеристики пристрою, що у свою чергу підвищує надійність контролю.

Для виробництва ГКС для підмикальних плат БПП як матеріал обрано лакофольговий поліімід, який має низьку вартість, достатню гнучкість, механічну міцність, гарні діелектричні властивості.

На основі використання БПП розроблено метод підключення БКП та ЕК до автоматизованих вимірювальних комплексів (АВК) із використанням МЕМС-інтерфейсу, що дозволяє спростити конструкцію, зменшити масо-габаритні показники контактних пристроїв шляхом усунення громіздких рознімних з'єднань на шляху підключення контрольованих виробів до вимірювального устаткування (рис. 1.14).

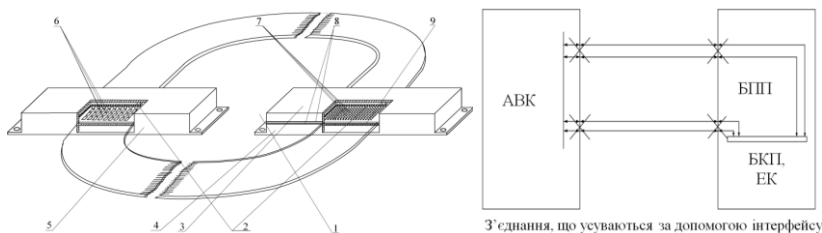


Рисунок 1.14 – МЕМС-інтерфейс для підключення контрольованих виробів до АВК

Пристрій, що реалізує МЕМС-інтерфейс, складається з декількох функціональних частин: гнучка плата-шлейф 1, що з'єднує підмикальну частину БПП із контактним полем у АВК; підмикальна частина з контактами-зондами для підключення до контрольованих виробів 2 (БКП, ЕК із матричними кульковими виводами), які встановлюються та позиціонуються по напрямних елементах і фіксуються кришкою 3; контактне поле АВК, з яким з'єднані ключі автоматизованого контролюючого комплексу; корпус для розміщення підмикальної частини та контрольованого виробу 4; корпус для розміщення контактної частини АВК 5 [61].

Підмикальна частина має одну форму зондів для контролю ЕК із матричними кульковими виводами у вигляді майданчиків 6, та іншу – у вигляді кульок 7 – для контролю БКП.

Підмикальна частина гнучкої плати встановлюється в корпусі між ущільнювальними прокладками 8, які забезпечують герметичність корпусу. З протилежного боку притискної плати відносно контрольованого об'єкта знаходиться захисна решітка 9, яка захищає притискну плату від провисання до моменту подачі стисненого повітря та забезпечує вільний доступ повітря до всієї площі притискної плати.

Приклад контрольованого з використанням БПП об'єкта – мікросхеми з кульковими виводами у корпусі FG-320 – наведено на рис. 1.15.

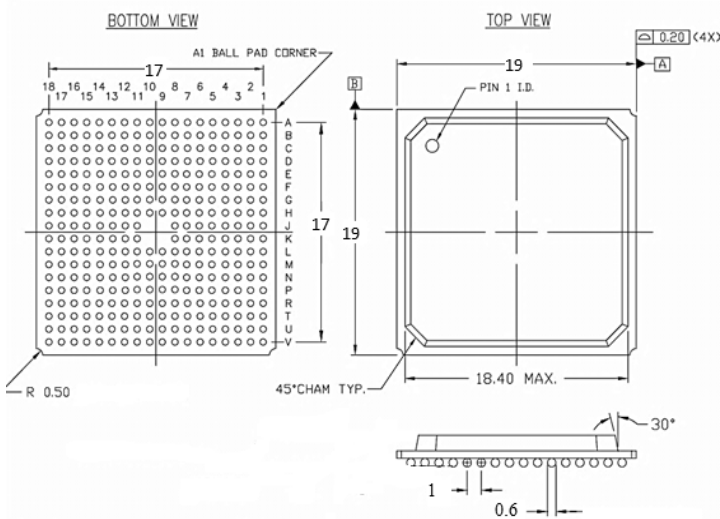


Рисунок 1.15 – Корпус FG-320

Топологію ГКС для контролю вказаної мікросхеми наведено на рис. 1.16. Конструктивні особливості цього варіанта топології такі: матеріал плати – полімід марки ФДИ-А-50; шлейф складається з трьох шарів, ширина провідників – 70 мкм,

а відстань між ними – 80 мкм; габаритні розміри контактного майданчика – 300×300 мкм. Для суміщення шарів та позиціонування притискної плати відносно виводів ЕК на платі розміщені реперні знаки. Кількість з'єднань за допомогою каскадного зварювання провідників між шарами плати – 288. Підключення БПП до АВК здійснюється із використанням шістнадцяти стандартних 51-вивідних ZIF-з'єднувачів.

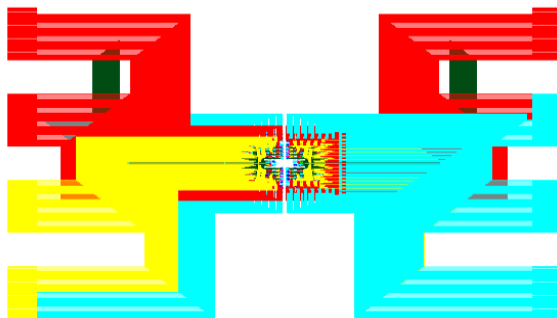
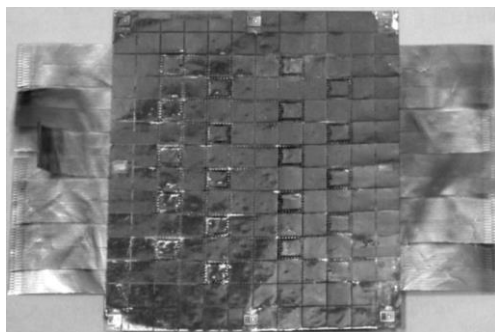


Рисунок 1.16 – Топологія гнучкого шлейфа

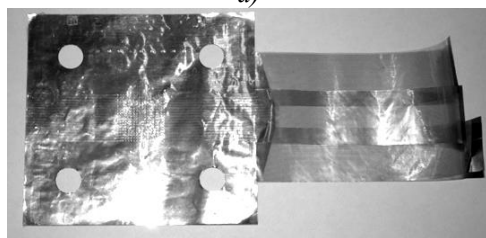
Допустимі значення тиску повітря у корпусі БПП для забезпечення високої надійності контролю електричних параметрів електронних компонентів лежать у межах 0,056...0,25 МПа.

Дослідні зразки гнучких поліімідних шлейфів БПП для контролю БКП з розмірами 48×60 мм і 2400 контрольованими точками та мікросхеми у корпусі FG-320 (на практиці реалізовано чверть топології) представлено на рис. 1.17, а та рис. 1.17, б відповідно.

Параметри ГКС, зображеної на рис. 1.17, а, такі: ширина провідників – 75 мкм; відстань між провідниками – 150 мкм; товщина нікелю на контактних площинках – 5-10 мкм; розмір вікон під УЗ-зварювання – 150×150 мкм.



a)



б)

*Рисунок 1.17 – Гнучкі підмикальні пластини БПП:
а – для контролю БКП; б – для контролю ЕК з кульковими виводами*

1.3. Аналіз характеристик ГКС та вимог до них

1.3.1. Аналіз особливостей використання ГКС

На сучасному етапі розвитку радіоелектронної промисловості, особливо мікроелектронної, із появою великих і надвеликих інтегральних схем (ІС) стало очевидним, що традиційні методи конструювання та монтажу друкованих вузлів ЕЗ не можуть забезпечити виконання вимог, які висувають до них, тому були запропоновані нові методи так званого поверхневого монтажу (SMT, COB, TAB, COF-технології), коли електронні компоненти (ЕК) розташовуються не на штирьових виводах, встановлених у відповідних отворах у друкованій платі (ДП) або припаяних до відповідних пелюсток, а безпосередньо на контактних

площинках на ДП, сформованих струмопровідними доріжками, або для монтажу використовуються спеціальні носії, виготовлені з гнучких матеріалів (поліімід, лавсан, поліефір) [3-6]. Це дозволило не тільки досягти у величезній мірі мініатюризації складених таким чином виробів, а й призвело до значного зниження їхніх маси та вартості, оскільки дані технології передбачають наявність повністю автоматизованого виробництва.

Розробка чергових поколінь елементної бази (інтегральна, потім функціональна мікроелектроніка), посилення вимог до електронних пристроїв, вимагали розвитку техніки друкованого монтажу та призвели до створення багатопшарових, гнучких і рельєфних друкованих плат.

Різноманіття сфер застосування електроніки зумовило спільне існування різних типів ДП [62].

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

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

ГКС є структурами з друкованими електронними схемами, що використовують гнучкий базовий матеріал та застосовуються для [63]:

- забезпечення динамічної гнучкості;
- зменшення розмірів конструкції;
- зменшення ваги (50-70 % під час заміни проводового монтажу, до 90 % під час заміни жорстких плат);
- збільшення ефективності складальних операцій;
- зменшення вартості складання (зменшення числа операцій);
- збільшення виходу придатних електронних засобів при їх складанні;

- підвищення надійності (через зменшення числа рівнів з'єднань);
- поліпшення розсіювання тепла;
- забезпечення високої електричної міцності;
- спрощення контролю (візуального й електричного);
- забезпечення широкого температурного діапазону (для полііміду від $-169\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$), хімічної стійкості та високої радіаційної стійкості.

Перевагами ГКС також є:

- спрощення компоновання та зменшення об'єму електронних засобів на 40...50 %;
- висока надійність, що забезпечується високими електроізоляційними характеристиками діелектричних основ ГКС;
- поліпшені електричні характеристики (уніфіковані матеріали, хвильовий опір, зменшення індуктивності);
- висока механічна міцність;
- стійкість до вібрацій, ударів і лінійних прискорень;
- технологічність конструкції та економічність ТП виготовлення ГКС; скорочення числа таких операцій, як вимірювання довжини, різання, зняття ізоляції, електричний контроль та ін.;
- можливість тривимірної конструкції упаковки; сумісність із поверхневим монтажем компонентів (сумісність за коефіцієнтом розширення);
- можливість скачувати ГДК у рулон і складати гармошкою, що підвищує ремонтпридатність електронних засобів за рахунок використання книжкових конструкцій і висувних блоків.

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

- компактні розміри, які досягаються за рахунок більш тонкої діелектричної основи ДП;
- ергономічність, у залежності від ступеня жорсткості ГКС їй можна надавати різних форм без втрати функціональних

параметрів;

- зниження маси, що досягається також завдяки більш тонкій основі;
- зменшення часу та собівартості складання завдяки груповим методам складання та монтажу виробів.

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

- авіаційна та космічна апаратура (супутники, панелі, радарні системи, прилади нічного бачення);
- промисловий контроль (комутуючі прилади, нагрівачі);
- автомобільна електроніка (панелі, системи контролю);
- побутова техніка (фотокамери, відеоканери, калькулятори тощо);
- медицина (слухові апарати, серцеві стимулятори);
- комп'ютери (друкуючі головки принтерів, управління дисками, кабелі);
- інструменти (рентгенівське обладнання, лічильники частинок).

На рис. 1.18 наведено приклади використання ГКС у радіоелектронних модулях. На рис. 1.18 позначені: а – шестишарова гнучко-жорстка багатошарова плата для військових приладів спостереження; б – гнучко-жорстка багатошарова плата, що застосовується у військових радарах з індикаторами Е-типу, з двадцятьма сімома провідними шарами; в – 16-шарова материнська плата з послідовним з'єднанням РЕГАЛФЛЕКС для блоку електронного управління цивільними реактивними літаками.

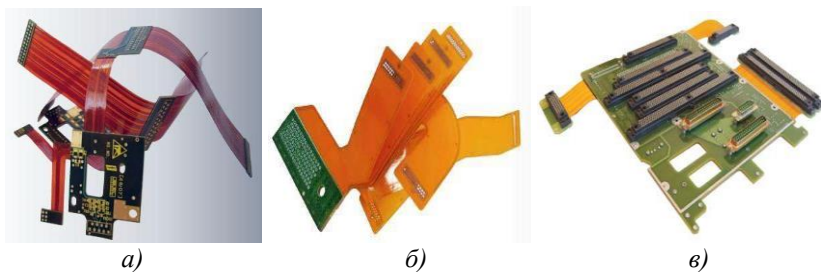


Рисунок 1.18 – Приклади конструкцій ЕЗ на основі ГКС

У функціональному відношенні ГДП використовують як:

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

Таким чином, ГКС є одним з перспективних напрямків в області техніки монтажу компонентів ЕЗ.

Конструктивно виконані за принципом організованих виводів ГКС забезпечують посилення стійкості конструкцій електронних засобів до механічних впливів, зменшення їх габаритів і ваги, можливість застосування автоматизованих процесів їх складання та монтажу, знижуючи тим самим трудомісткість ТП їх виробництва та підвищуючи якість ЕЗ.

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

Гнучко-жорсткі багатошарові схеми (ГЖБС) поєднують у собі всі переваги жорстких ДП і багатошарових кабелів. Крім того, технологія гнучких і гнучко-жорстких плат сприяє зменшенню кількості внутрішніх з'єднань у пристроях. Ця остання перевага вже продемонструвала збільшення надійності для багатьох пристроїв, застосовуваних у космосі, у медицині, у комп'ютерній, телевізійній та автомобільній техніці [64-65].

1.3.2. Формування вимог до матеріалу ГКС

Проаналізовані конструкторсько-технологічні напрямки в розвитку техніки монтажу багатошарових комутаційних плат пред'являють цілий ряд специфічних вимог до якості матеріалу гнучких основ і до технологічних операцій при виготовленні плат і кабелів та їх складання.

Ізоляційні матеріали гнучких плат, перш за все, повинні володіти високими питомими об'ємними і поверхневими опорами, низькою діелектричної проникністю для зменшення паразитних зв'язків між контактними елементами.

За фізико-механічними властивостями матеріал повинен забезпечувати високу механічну міцність при малій товщині плати, гарну теплопровідність, достатню теплову і хімічну стійкість при виробництві та використанні, негорючість, лінійну стабільність, температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР), близький до ТКЛР наносимих матеріалів (для зменшення внутрішніх механічних напружень в структурі). Крім того важливими технологічними характеристиками гнучких полімерних плат і кабелів слід вважати: можливість вибіркового травлення; високу міцність на розрив і вигин; стійкість до тертя; відсутність істотних газовиділень в вакуумі при високих температурах.

Крім цього, матеріал для гнучкої друкованої основи повинен забезпечувати низьке водопоглинання для попередження розшарування і відшарування при нагріванні та теплостійкість – для витримування пайки, зварювання без руйнувань і зниження гнучкості.

У багатьох гнучких платах в якості ізоляційного матеріалу використовується дешева поліефірна плівка. Однак вона погано травиться, має низьку робочу температуру, велику усадку. Крім того, плівка горюча.

У табл. 1.1 наведені характеристики використовуваних для виготовлення гнучких плат матеріалів.

Таблиця 1.1

Характеристики можливих матеріалів гнучких плат

Параметри плівки	Матеріал плівки						
	Епоксискло	Поліефір	Поліетилен	Фторопласт	Поліімід		
					Каптон Н	Каптон V	ФДИ-А
Жорсткість під час розтягування	196	160	210	200	1750	1750	1200
Відносне подовження у процесі розриву, %:							
за 293 К	-	100	150	175	70	70	25
за 473 К	-	125	300	300	90	90	35
Модуль пружності	$31,5 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$	$1,98 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,248	0,2-0,4	0,2	0,24	0,148	0,148	0,148
Робоча температура, К	423	373	353	500	673	673,5	673
Температура плавлення, К	448	533	393	533	Деструкція за 723 К протягом декількох годин		
Водопоглинання за 24 год, %	1,5	0,7	0,8	0,5	2,9	2,9	3-3,5
Усадка за 423 К впродовж 2 год, %	-	2,0	-	2-3	0,1-0,14	0,03-0,05	0,1-0,3
Відносна діелектрична проникність на частоті 1 кГц	5,0	3,5	2,8	2,1	3,5	3,5	3,5
Тангенс кута діелектричних втрат на частоті 1 кГц	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	-	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Напруженість пробію, В/м	-	295	20	150	276	276	150
Здатність до хімічного травлення	погана	задовільна	задовільна	погана	добра	добра	добра
Питомий опір за 20 °С, Ом·см	10^{18}	10^{18}	10^{11}	10^{17}	10^{11}	10^{18}	10^{17}

Полііміди є групою полімерів дуже міцних і стійких до впливу хімічних речовин, і високої температури. Їх міцність, а також хімічна і термічна стійкість такі високі, що ці матеріали часто замінюють скло і метали, такі як сталь, у багатьох промислових додатках, де до цих якостей пред'являються високі вимоги. Поліімідна плівка відноситься до антифрикційних матеріалів, вона не розчиняється в органічних розчинниках, стійка в оліях, руйнується (гідролізується) під дією концентрованих кислот і лугів. Має високу радіаційну стійкість.

Завдяки перерахованим властивостям поліімідні плівки знайшли широке застосування в авіації, електротехніці, радіомеханіці і багатьох інших галузях промисловості, в основному в якості високоміцного ізоляційного матеріалу. Великою перевагою такої ізоляції є її негорючість. Використання плівки в якості електроізоляції дозволяє збільшити питому потужність і надійність електромашин, механізмів і приладів, підвищує температуру їх експлуатації, зменшує обсяг і вагу. Поліімідна плівка добре металізується.

Для полііміду, поряд з високою міцністю на розтяг, хорошими ізоляційними властивостями, хімічною стійкістю, негорючістю та інш. характерний ряд властивостей, які роблять його незамінним в технологічних процесах, пов'язаних з вакуумним осадженням плівок і фотолітографією. Це перш за все відсутність істотних газовиділень в вакуумі до температур 473-523 К і здатністю до однорідного травленню в сильних лужних середовищах.

Поліімід є слабополярним середньочастотним матеріалом, з $tg\delta = 0,003$. Діелектричні втрати полііміду зменшуються з підвищенням температури: так, за 493 К його $tg\delta = 0,0006$.

Поліімідні плівки – домінуючий полімерний матеріал для виготовлення гнучких друкованих плат. Вони мають такі переваги: висока гнучкість при всіх температурах; хороші електричні властивості; висока хімічна стійкість (за винятком гарячого концентрованого лугу), тугоплавкість; дуже хороша стійкість до розриву (але погане поширення розриву); поліімід легко підда-

ється травленню в концентрованих лугах, що дозволяє виготовляти наскрізні перехідні отвори діаметром 70 ... 100 мкм, таким чином отримуючи електричні переходи при формуванні багат шарових комутаційних плат на поліімідній плівці; робоча температура – від - 200 до + 300 °С.

До недоліків поліімідних плівок можна віднести: високе водопоглинання (до 3 % за вагою), через що поліімід потребує технологічного сушіння і захисту; відносно висока вартість, зважаючи на малу масу споживаного матеріалу.

1.3.3. Аналіз умов експлуатації та впливів на ГКС

За всіх численних переваг у процесі експлуатації ГКС, у складі електронних засобів, піддаються великій кількості дестабілізуючих факторів, які можуть впливати на їх якість.

Можливі види впливів на ГКС систематизовані у вигляді схеми, представленої на рис. 1.19. Зокрема, до них відносяться: механічні, хімічні, термічні, хвильові, електричні та кліматичні.

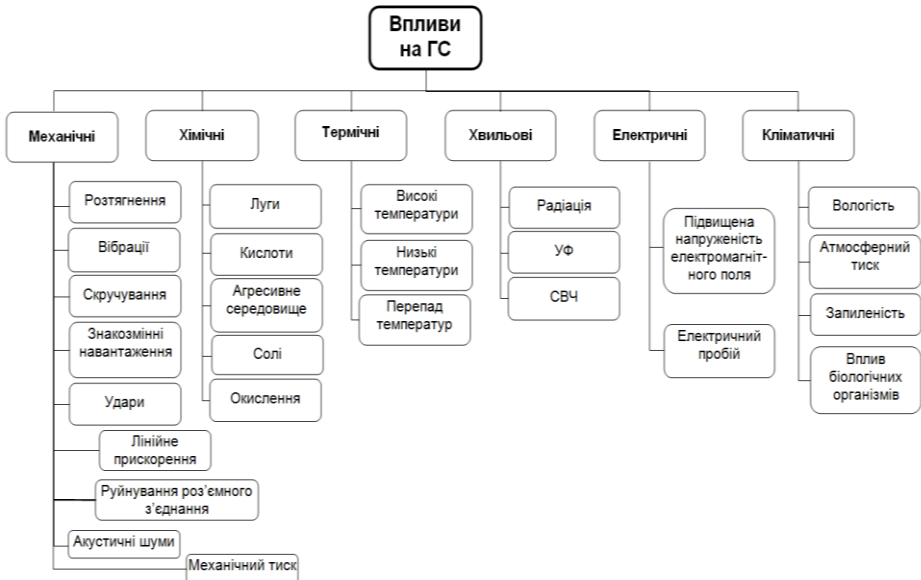


Рисунок 1.19 – Види впливів на ГКС

Класифікація ЕЗ за умовами застосування та конструктивними ознаками (за стійкістю до широкого діапазону перепадів температур, до вібрації і т. д.), а також основні норми та вимоги для кожної класифікаційної групи за кліматичними (температура, підвищена вологість і атмосферний тиск) і механічними впливами (синусоїдальна вібрація та механічні удари) наведені у табл. 1.2.

У табл. 1.3 подано перелік вхідних параметрів для проведення досліджень ГКС.

Таблиця 1.2
Основні норми та вимоги до ГКС у складі ЕЗ

Зовнішні впливи	Діапазон зміни параметрів, що впливають на ЕЗ		
	Наземні ЕЗ	Корабельні ЕЗ	Літакові ЕЗ
1	2	3	4
I. Кліматичні впливи			
1. Температура максимальна, °С			
- робоча	50	30-60	60-110
- гранична	60	65	80-260
2. Температура мінімальна, °С			
- робоча	40	40	60
- гранична	40	40	90
3. Вологість відносна			
- насиченість, %	80-93	98-100	93-100
- температура, °С	25	25	25
4. Акустичні шуми			
- рівень, дБ	85-125	75-140	130-150
- частота, Гц	50-1000	50-1000	50-1000
5. Атмосферний тиск, Па			
- максимальний	$10,6 \cdot 10^4$	$10,6 \cdot 10^4$	$10,6 \cdot 10^4$
- мінімальний	$5,7 \cdot 10^4$	$8,8 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^4$
II. Механічні впливи			
1. Вібрації			
- частота, Гц	10-70	0-120	5-2000
- прискорення, g	1-4	1,5-2	до 20
2. Ударні стрясання			
- прискорення, g	10-15	15	6-12
- тривалість, мс	5-10	5-10	до 15

1	2	3	4
3. Одиночні удари			
- прискорення, g	50-1000	до 1000	-
- тривалість, мс	0,5-10	0,5-2	-
4. Лінійне прискорення, g			
- уповільнене	2-4	-	4-6
- відцентрове	2-5	-	4-10

Таблиця 1.3

Перелік вхідних параметрів для проведення досліджень ГКС

Назва параметру	Діапазон значень
Частота зовнішніх коливань	0 ... 5000 Гц
Амплітуда коливань	0 ... 50 мм
Напрямок впливу коливань	вертикально до друкованого модуля
Прискорення	0 ... 5g
Зусилля розтягування	0 ... 100 Н
Радіус вигину	1 ... 50 мм
Висота прогину ГКС	0 ... 20 мм

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