

Голові спеціалізованої вченої ради  
Д 64.052.04 у Харківському  
національному університеті  
радіоелектроніки,  
61166, м. Харків, просп. Науки, 14

### **ВІДГУК**

офіційного опонента доктора технічних наук, доцента, професора  
кафедри напівпровідникової електроніки, Національного університету  
«Львівська політехніка» Єрохова Валерія Юрійовича,  
на дисертаційну роботу Невлюдової Вікторії Валеріївни «Технологічне  
забезпечення якості гнучких структур у виробі електронної техніки» подану  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво  
електронної техніки

#### **1. Актуальність теми дисертації**

В даний час неможливо уявити жодного напрямку електронної техніки (ЕТ) без застосування друкованих плат (ДП). Якщо друковані модулі на жорсткій основі застосовуються давно, то гнучкі ДП є відносно новим напрямком апаратобудування, але таким, що вже активно використовуються в радіо-, авіаційній, космічній, автомобільній та комп'ютерній техніці, в приладах як стаціонарних, так і рухомих конструкцій.

Тому актуальним напрямом розвитку ЕТ, на даний момент, є застосування в її складі гнучких структур (ГС), до яких відносяться елементи гнучкої електроніки, гнучкі електронні компоненти, друковані плати і елементи міжз'єднань.

Багато досягнень електронної техніки пов'язано з напрямом мікромініатюаризації апаратури. Мініатюризація компонентів та пристроїв вимагає рішення проблем отримання надійних багатошарових міжз'єднань електронних апаратів, забезпечення теплових режимів, технологічні проблеми забезпечення високої точності та автоматизації виробництва, врахування обмежень пов'язаних з квантово-механічними, термодинамічними та фізичними межами.

Послідовне зменшення розмірів компонентів та конструкцій в цілому неодмінно призведе до досягнення межі атомно – молекулярного рівня, характерними якостями якої є гнучкість, пружність, межі, обумовленої квантово – механічними ефектами тощо.

Так, в наш час вже створена велика кількість елементів електронної техніки, до яких можна віднести гнучкі міжз'єднання, датчики різних фізичних величин з балочно – мембранними чутливими елементами, мікромініатюрні плівкові електронні компоненти на гнучкому носії та з новими принципами дії. Значно розвинений новий напрям мікросистемної техніки, в якому гнучкі та гнучко – жорсткі компоненти вирішують проблему





видалення складальних операцій. Все це свідчить про необхідність проведення робіт, направлених на підвищення якості технологічних процесів виготовлення гнучких та гнучкожорстких конструкцій в електронному приладобудуванні, що підтверджує актуальність роботи дисертанта Невлюдової В.В.

Гнучкі плати та шлейфи, у порівнянні зі звичними жорсткими ДП або джгутами сполучних проводів двосторонніх ДП, мають ряд незаперечних переваг: зниження габаритних розмірів і маси; гнучкість; можливість об'ємного компонування; зниження впливу температурних коефіцієнтів розширення при монтажі елементів на друковану плату; застосування технології «кристал-на-гнучкій платі» (Chip-on-Flex – COF).

Але, в той же час, було б неточно стверджувати, що ГС у всьому перевершують свої жорсткі аналоги. Конструкційна гнучкість є з одного боку гідністю ГС, але з іншого боку призводить до появи проблем, викликаних необхідністю забезпечення стабільності властивостей матеріалів, компонентів і конструкцій в часі під впливом дестабілізуючих факторів різного виду.

Незважаючи на велику кількість публікацій, присвячених вирішенню проблем конструкторсько-технологічного забезпечення ГС, залишається протиріччя між необхідністю подальшого підвищення якості існуючих і перспективних варіантів реалізації ГС при зниженні їх розмірів і підвищення щільності монтажу і обмеженістю відомих підходів до технологічного забезпечення, які були б засновані на універсальних засобах оцінки і прогнозування якості пристроїв ЕТ на базі ГС. Але, до тепер, з багатьох питань, пов'язаних з технологією виготовлення ГС, немає єдиного виробленого підходу.

Таким чином, заміна жорстких компонентів на гнучкі, з метою підвищення їх якості, функціональних можливостей, надійності і зменшення габаритно-масових характеристик, трудомісткості виготовлення, вартості, а також розробка нових технологічних процесів (ТП) для виробництва ЕТ, що використовує особливості гнучких структур, є **актуальним** завданням.

Дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, проводилися відповідно до **держбюджетних науково-дослідних робіт (ДНДР)**, які виконувались в Харківському національному університеті радіоелектроніки і авторка брала участь у виконанні даних робіт як виконавець: ДНДР «Конструктивно-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем та технологій їх виробництва» (ДР № 0108U002216); ДНДР «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (ДР 0113U000358); ДНДР «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями та їх впровадження» (ДР № 0113U003582); ДНДР «Створення мікромініатюрних компонентів електромеханічних інтелектуальних технологічних засобів промислового обладнання і робототехніки» (ДР № 0115U002433), **що також підтверджує**



**актуальність роботи.**

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків**

**2.1. У першому розділі** автором виконано змістовний аналіз технічних джерел за темою, здійснено огляд тенденцій розвитку виробів ЕТ. Проведено аналіз особливостей застосування ГС у складі виробів ЕТ, які покликані виконувати різноманітні функції, в тому числі забезпечення виробництва компонентів методами групової технології без використання складальних операцій. Здійснено аналіз характеристик ГС та вимог до них, надана класифікація за умовами застосування і конструктивними ознаками, розглянуті основні норми і вимоги для кожної класифікаційної групи за кліматичними впливами і механічними діями. Сформульовано наукове завдання, вирішення якого дозволить підвищити якість ГС, а також визначені напрями і методи досліджень.

**2.2. У другому розділі** розглянуті фізико-технологічні моделі прогнозування якості ГС у виробках ЕТ. Проведено розробку і обґрунтування моделей дії дестабілізуючих факторів. Розроблено модель проведення експериментальних досліджень. Проведена візуалізація процесу зміни параметрів ГС в складі виробів ЕТ, з використанням табличного відображення змінних в системі даних, згідно якому можна простежити динаміку їх зміни в часі, зробити оцінку стабільності параметрів системи і характеру впливу на них, а також спрогнозувати відмови виробів ЕТ на основі ГС, визначивши граничні значення параметрів. У розділі відображені зміни параметрів ГС або параметрів ТП з плином часу, з використанням спеціально розробленого програмного продукту (ПП), що реалізує алгоритм прогнозування.

**2.3. У третьому розділі** проведено аналіз видів деформацій, що виникають в ГС: типу згинання, розтягнення-стиснення, резонансне руйнування. Вибрано об'єкт і досліджено у вигляді гнучкого шлейфа на плівковому носії з монтажними з'єднаннями, отриманими ультразвуковим зварюванням, та з'єднувачем з нульовою силою вставки для формування роз'ємних з'єднань з іншими пристроями системи. В ньому присутня провідникова система, з'єднання, отримані УЗ зварюванням та рознімні з'єднання оригінальної конструкції, контактний тиск у яких створюється повітряною подушкою.

**2.4. У четвертому розділі** дисертаційної роботи містяться результати експериментальних досліджень, що відповідають меті роботи.

Проведено експериментальні дослідження по визначенню граничної напруженості електричного поля, необхідного для пробою основи ГС при експлуатації в нормальних умовах, в умовах з підвищеною вологістю, при імітації експлуатації в умовах морського середовища.

Приведено опис та принцип дії конструкції випробувального технологічного оснащення: низькочастотний вібростенд для контролю параметрів ЕТ на основі ГС (власна розробка, на яку отримано патент).



**2.5. У п'ятому розділі** досліджено ГС із багатошаровою провідниковою розводкою на полімерному носії, з реалізацією міжшарових з'єднань і можливістю монтажу навісних компонентів на ГС методом УЗ-зварювання, а також що містить рознімне сполучення зі з'єднувачем із нульовою силою вставки. Запропоновано новий метод контактування ГС із компонентами виробів ЕТ на основі плаского з'єднувача з нульовою силою вставки.

За результатами експериментальних досліджень встановлені оптимальні технологічні параметри операції УЗ-зварювання, зокрема визначено оптимальний режим зварювання для забезпечення необхідної міцності отримуваних монтажних з'єднань. Вибраний режим зварювання: потужність УЗ коливань 1,75 – 2,2 Вт, навантаження інструменту 0,4 – 0,7 Н, тривалість імпульсу 300 – 400 мс.

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

### **3. Новизна результатів досліджень та їх теоретичне значення**

**3.1. Найбільш важливими новими науковими результатами, отриманими в дисертації, є:**

- запропоновано фізико-технологічну модель параметрів ГС, яка на відміну від відомих дозволяє прогнозувати якісні характеристики ГС і ТП їхнього виготовлення за рахунок обробки великого масиву даних;

- удосконалено математичну модель руйнування ГС, що дозволяє, на відміну від відомих моделей, виробити додаткові технологічні рекомендації щодо забезпечення якості ГС за рахунок аналізу їх фізико-технологічних параметрів і режимів експлуатації у складі виробів ЕТ;

- вперше обґрунтовано метод контактування ГС на основі плаского з'єднувача з нульовою силою вставки, який відрізняється тим, що за рахунок забезпечення рівномірного тиску на всі виводи ГС дозволяє підвищити якість її з'єднання з компонентами ЕТ, що дозволило знизити величину перехідного опору у порівнянні з ZIFами, гарантуєними виробниками;

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

**3.2. Отримані наукові результати відзначаються новизною, що полягає в підвищенні якості ГС у виробках ЕТ за рахунок технологічного забезпечення, а також розробки й удосконалення методів оцінки та прогнозування якісних характеристик ГС. Наведені авторкою результати досліджень мають достатнє теоретичне обґрунтування, і є вкладом в теорію та практику вирішення завдань щодо забезпечення якісних показників і надійності ГС.**



#### 4. Достовірність наукових положень и висновків

Достовірність отриманих наукових результатів заснована на доцільному виборі і достатньому використанні сучасних аналітичних методів досліджень, що дало можливість створити и ефективно використовувати адекватні математичні моделі оцінки якості багаторежимних радіоелектронних систем.

Отримані наукові результати добре узгоджуються з даними, що стали відомими в ході експериментального дослідження процесу проектування ЕРВ (на прикладі підсилювача потужності передавального тракту бортової авіаційної радіостанції Р-863), що також підтверджує їх достовірність.

#### 5. Практичне значення результатів

5.1. **Практична цінність** роботи полягає у втіленні наукових результатів в:

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

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

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

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

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

5.2. Практичне значення роботи підтверджується тим, що **результати роботи впроваджено** у виробництво на Державному підприємстві «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (НДТІП, м. Харків, акт від 22.02.2017 р); на підприємстві ТОВ «НВП «Укрінтех» (акт від 01.03.2017 р.). Результати досліджень також були використані в навчальному процесі на кафедрі інформаційних технологій електронних засобів Запорізького національного технічного університету (акт від 23.01.2017 р.), на кафедрі електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського (акт від 30.01.2017 р.) та на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки ХНУРЕ (акт від 13.02.2017 р).



## 6. Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в якості наукової основи для розробки і впровадження нових методів проектування гнучких ДП, які активно використовуються в радіо-, авіаційній, космічній, автомобільній та комп'ютерній техніці, в приладах як стаціонарних, так і мобільних конструкцій для використання на Державному підприємстві Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування (м. Харків), Харківському авіаційному заводі (м. Харків) та в інших галузевих підприємствах.

Крім того, результати дисертаційної роботи можуть бути використані у навчальній і науково-дослідній роботі провідних ВНЗ України, у яких ведеться підготовка фахівців у галузі електроніки.

## 7. Стиль, оформлення дисертації, автореферату. Повнота публікацій та відповідність спеціальності

7.1. **Дисертаційна робота** оформлена відповідно до вимог державного стандарту, має **необхідну структуру** і складається з вступу, п'яти основних розділів, висновків, списку літератури та дев'яти додатків. Стиль викладення матеріалів дисертації доказовий. Графічні матеріали виконані якісно і відбивають досліджувані процеси. Допоміжний і інформаційний матеріал, винесений у додатки допомагає уточнювати деякі положення дисертаційної роботи. Наявні посилання на всі наукові результати раніше виконаних досліджень маються. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Результати експериментальних спостережень у дисертаційній роботі всебічно проаналізовані і по них зроблені обґрунтовані висновки.

7.2. Нові положення, що виносяться на захист, досить повно відбиті в 26 наукових працях здобувача, **опублікованих у необхідному обсязі у фахових наукових виданнях**, затверджених ВАК України. Викладені у статтях основні результати повністю віддзеркалюють результати досліджень, отримані особисто автором та наведені у роботі. У процесі виконання досліджень автор провів достатню для кандидатських дисертацій роботу з їхньої апробації на представницьких наукових конференціях перед науковою громадськістю і на науково-технічних семінарах за участю провідних спеціалістів у галузі технології, обладнання та виробництва електронної техніки.

7.3. Обраний напрямок досліджень та отримані результати **відповідають паспорту спеціальності 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки** (п. 2 – розроблення нових технологічних процесів для промислового виробництва приладів електронної техніки, приладів контролю (вимірювання) параметрів електронної техніки та п. 3 напрямків досліджень – нові технологічні процеси й апаратура для промислового виробництва елементів функціональної електроніки (транзисторів, мікросхем, збірок, фотоелементів, п'єзоперетворювачів,



термоелементів, сенсорних елементів), тому що торкаються питань забезпечення надійності і безвідмовності електронної техніки.

## **8. Недоліки та зауваження**

8.1. У дисертаційній роботі Невлюдової В.В. є окремі **недоліки та зауваження**, серед них такі:

1. Обмеженість кількості розглянутих у роботі гнучких структур (реально – це шлейф з УЗ зварними з'єднаннями та роз'ємними кульковими і гнучка індуктивність);

2. В тексті часто використовується термін «ГС» хоч зміст матеріалу стосується конкретних видів ГС (шлейфа, контактів з'єднувача, котушки індуктивності, тощо);

3. Не досліджена довговічність кулькових виводів шлейфу з ZJF з'єднувача, хоч це новий конструктивний елемент ГС;

4. З проведених експериментальних досліджень на ИР 5047-50 і отриманих результатів на рисунку 4.22, в якому визначається що розрив одношарової ГС на основі полііміду відбувається в межах 10-12Н, не сказано чи враховуються похибки розривної машини;

5. Розроблена експериментально - статистична модель (вираз 5.7), адекватна тільки при використанні установки ЭМ-4092, і не може бути адаптивна під установки ЭМ-4320У і автомати термозвукового зварювання типу ЭМ-4260, ЭМ-4350, ЭМ-4450, ЭМ-4451 методом "кулька-клин" і ЭМ-4370 методом "клин-клин".

6. Наявні деякі порушення вимог щодо дотримання рівномірної щільності тексту на сторінці, наприклад стор. 107, 132, 184 дисертації. Також до недоліків слід віднести наявність в тексті дисертації складних речень, які створюють певні труднощі для сприйняття його семантичного змісту.

8.2. Означені недостатки **не є принциповими** і не впливають на основні результати роботи.

## **9. Загальні висновки**

9.1. Незважаючи на вказані недоліки, треба відмітити, що дисертація є **завершеною науковою працею**, містить нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують задачу розробки та удосконалення методів оцінки і прогнозування якісних характеристик виробів ЕТ на основі ГС на етапах проектування, виробництва і експлуатації.

9.2 В цілому в роботі наявні різнобічні сторони досліджень:

- виконана теоретична розробка методу прогнозування якості компонентів та пристроїв ЕТ та створене програмне забезпечення для його реалізації;

- розроблені конструктивно – технологічні рішення з'єднувача з нульовою силою вставки, що використовує новий принцип створення однакового тиску контактних пар за рахунок тиску повітря в замкненому просторі;



- створені математичні моделі та виконане експериментальне дослідження впливу циклічних деформацій згинання шлейфу на допустиму кількість деформацій

- досліджена залежність міцності зварних УЗ з'єднань в багат шаровому гнучкому шлейфі від режиму зварювання (потужності УЗ коливань, тиску зварювального електроду та часу зварювання) знайдено оптимальний режим процесу;

- створене технологічне оснащення для проведення випробувань дії механічних факторів на ГС та проведені дослідження;

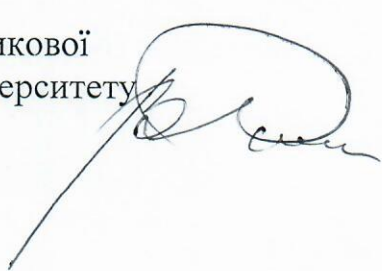
- розроблений технологічний процес виготовлення вузла, що включає сам гнучкий шлейф, операцію зварювання його різних шарів та електронних компонентів до його контактних площинок, пайку кулькових виводів;

- надані загальні рекомендації по підвищенню якості ГС в ЕТ.

9.3. За актуальністю, науковим і прикладним рівнем, новизною та практичною спрямованістю отриманих результатів **дисертація відповідає вимогам** п.п. 11, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015) щодо кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, доцент,  
професор кафедри напівпровідникової  
електроніки, Національного університету  
«Львівська політехніка»



В.Ю. Єрохов

Підпис ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар  
НУ«Львівська політехніка»



Р.Б. Брилинський