

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Разумов-Фризюк Євгеній Анатолійович

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ  
БАГАТОШАРОВИХ КОМУТАЦІЙНИХ ПЛАТ В ЕЛЕКТРОННІЙ  
ТЕХНІЦІ**

05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2010

Дисертація є рукописом

Роботу виконано в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник	доктор технічних наук, професор Омаров Мурад Анвер огли, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри природознавчих наук.
Офіційні опоненти	доктор технічних наук, професор, Овчаренко Віталій Євгенович, Науково-дослідний інститут приладобудування, Національне космічне агентство України, заступник директора з наукової роботи;  кандидат технічних наук, професор, Єрмічой Ілля Миколайович, Одеський національний політехнічний університет МОН України, завідувач кафедри електронних засобів та інформаційно-комп'ютерних технологій

Захист відбудеться «28» грудня 2010р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, проспект Леніна, 14.

Автореферат розіслано

«26» листопада 2010р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент

Б.Г. Бородін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дисертації.** Напрямок мікромініатюризації та інтеграції були та залишаються одними з основних шляхів розвитку електронної апаратури. Окрім міри інтеграції у вигляді кількості елементів сучасний етап розвитку мікроелектронної апаратури передбачає інтеграцію на одній підкладці компонентів різної природи: електронних, механічних, оптичних, рідинних та ін.

Істотною частиною подібних складних пристроїв є між'єднання компонентів, які реалізуються у вигляді багат шарових структур (багат шарової розводки і багат шарових комутаційних плат (БКП)). При мініатюризації інтегральних схем (ІС) перешкоджаючим чинником на шляху подальшого збільшення міри інтеграції можуть стати недостатня швидкодія і надійність БКП. Забезпечення надійності БКП стає проблемою при зниженні розмірів контактних майданчиків, кроку розводки і збільшенні кількості ланцюгів, що контролюються. Операція електричного контролю дозволяє своєчасно виявити браковані вироби. Важливим пристроєм, що забезпечує високу надійність і продуктивність операцій електричного контролю БКП є контактні пристрої. Основними контрольованими параметрами БКП є цілісність ланцюгів і відсутність коротких замикань між роз'єднаними провідниками. Із збільшенням кількості і щільності розташування контрольованих ланцюгів ускладнюються контактні пристрої, що викликає підвищення складності їх виготовлення і ремонту контактної пристрою, збільшення вартості, зниження надійності контакту, як окремих контактних елементів (КЕ), так і контактної пристрою в цілому.

З'являється необхідність розробки принципово нового контактної пристрою з великою кількістю контактних елементів (декілька тисяч) і мінімальним кроком між контактними елементами (менш 100 мкм).

Отже, технологічне забезпечення контролю БКП, шляхом розробки багат шарового контактної пристрою, що відрізняється великою кількістю контактних елементів (декілька тисяч), високою щільністю їх розташування (до 100 мкм), низькою собівартістю і високою ремонтпридатністю, для контролю електричних параметрів БКП є актуальною задачею.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційну роботу виконано відповідно до держбюджетних і госпдоговірних тем, які виконувалися у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ), згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри «Технології і автоматизації виробництва РЕС і ЕОС» (ТАПР) в межах держбюджетних науково-дослідницьких тем №189-1 «Технологічні основи перспективних компонентів і нових технологій їх виробництва для широкого класу волоконно-оптичних систем», на підставі наказу Міністерства освіти і науки №960 від 22.12.2004 і №224 «Конструктивно-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем і

технологій», на підставі наказу Міністерства освіти і науки №1044 від 27.11.2007. Автор брав участь у виконанні даних робіт як виконавець.

**Мета й завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка метода підмикання багатозарових комутаційних плат на операціях контролю електричних параметрів на основі гнучких шлейфів та BGA/CSP зондів до автоматизованих пристроїв контролю, що забезпечує підвищення якості та зниження собівартості електричного контролю пристроїв з великою кількістю ланцюгів, що контролюються та високою щільністю їх розташування.

Виконання поставленої мети роботи забезпечується вирішенням таких завдань:

- аналіз відомих контактних пристроїв для електричного контролю БКП;
- синтез конструктивно-технологічних рішень для побудови багатозондового контактного пристрою контролю БКП;
- дослідження технології виробництва контактного пристрою;
- вибір і дослідження властивостей матеріалів багатозондового контактного пристрою;
- вибір устаткування для виробництва багатозондового контактного пристрою;
- дослідження параметричних відмов розробленого багатозондового контактного пристрою;
- дослідження розширеного використання розробленого багатозондового контактного пристрою (контроль MEMS пристроїв, BGA компонентів).

**Об'єкт дослідження** – процес електричного контролю і виявлення дефектів БКП.

**Предмет дослідження** – багатозондові контактні пристрої електричного контролю.

**Методи дослідження.** Під час проведення дисертаційних досліджень використовувалися метод Байєсовських статистичних рішень, метод планування послідовного експерименту, що дозволяє мінімізувати кількість тестових перевірок, метод математичного моделювання, дилатометричні виміри, рентгено-флюоресцентний аналіз, спектральний аналіз.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У процесі розв'язання задач відповідно до мети досліджень отримано такі наукові результати:

- вперше на основі синтезу технології гнучких шлейфів та BGA/CSP структур запроваджено чотириточковий метод контролю з пневматичним притисненням багатозарових комутаційних плат, який дозволяє крім забезпечення перевірки багатозарових комутаційних плат високої щільності контролювати якість підключення багатозондового контактного пристрою до об'єкта контролю;
- вперше обґрунтовано технологічний метод формування матричних зондів та міжзарових з'єднань багатозондового контактного пристрою, за

допомогою застосування кластерної моделі Пуассона, що дозволило обрати технологію з найменшою ймовірністю параметричних відмов;

– удосконалено розроблений метод електричного контролю багатошарових комутаційних плат за допомогою розробки технології контролю, що дозволило пристосувати його для вхідного та функціонального контролю елементної компонентної бази з матричними кульковими выводами;

– набув подальшого розвитку метод Байєсівських статистичних рішень, який відрізняється формуванням рівней ієрархії відповідно до обраної технології, що дозволяє проектувати нові технологічні процеси з оптимізацією за обраним параметром;

**Практичне значення отриманих результатів.** На підставі дослідження матеріалів і технологічних процесів виробництва мікрошлейфів на поліімідному носіїві і BGA структур (технології формування матричних выводів BGA) розроблений контактний пристрій, який може бути використано на контрольних операціях у виробництві БКП, багатошарових тонко- і товстоплівкових комутаційних плат. Дані рішення захищені патентами на винахід №82405 «Багатозондовий підключаючий пристрій» Н05К 1/00, зареєстрований в Державному реєстрі патентів України на винахід 10 квітня 2008р.; декларативний патент на корисну модель №2788 «Автоматизований склад» В65G 1/02, зареєстрований в Державному реєстрі патентів України на винахід 16 липня 2004р.

Подано заявки на отримання патентів №1786/ЗА/10 «МЕМС-інтерфейс багатоточкових автоматичних контролюючих комплексів», №21295/3 «Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій», №40904/3 «Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій».

Розроблено модифікації багатозондового контактної пристрою для чотириточкового контролю БКП і функціонального та вхідного контролю BGA компонентів.

**Особистий внесок здобувача.** Оpubліковані роботи [7, 10, 11, 12] написані без співавторів, зокрема в [7,10] наведено результати конструювання пристрою контролю багатошарових комутаційних плат, [11, 12] розглянуто технологію виробництва багатозондового контактної пристрою.

У роботах, опублікованих у співавторстві [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 14, 15], внесок здобувача полягає у тому, що: [1, 2, 5] автором розроблено конструкції винаходів, [3, 8] – проведено дослідження функції перетворення торсіонного підвісу ємнісного акселерометра, [4] – досліджено технологію наноімпрінтингу та розглянуто можливість її використання для створення зондів багатозондового контактної пристрою, [13, 14] – розглянуто особливості контролю багатошарових комутаційних плат за допомогою багатозондового контактної пристрою, [6, 15] – розроблено дерево ієрархій та проведено пошук оптимального варіанта технологічного процесу серед розглянутих, [9] – проведено огляд матеріалів для виробництва пристрою контролю.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної

роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-технічних конференціях і симпозіумах: «Стратегія якості в промисловості та освіті» (Варна, 2008); «Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій» (Севастополь, 2007); «Електронна компонентна база. Стан і перспективи розвитку» (Харків-Судак, 2008); «Радіоелектроніка й молодь в 21 ст.» (Харків, 2004, 2006, 2007, 2010); «Функціональна компонентна база в мікро-, опто- і наноелектроніці» (Харків-Кацивели, 2010); «New Leading Technologies in Machine Building» (Харків-Рибаче, 2010).

**Публікації.** За темою дисертації з викладанням її основних результатів опубліковано 15 робіт, з яких 2 патенти на винахід, 4 в наукових журналах та збірниках наукових праць, які увійшли до переліків, затверджених ВАК України, 9 матеріалів науково-технічних конференцій.

**Структура й обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновку, переліку використаних джерел з 151 найменувань. Повний обсяг роботи складає 151 сторінку, у тому числі: 31 рисунок, 32 таблиці, перелік використаних джерел на 13 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, завдання дослідження, визначено наукову новизну дисертаційної роботи і практичну цінність отриманих результатів.

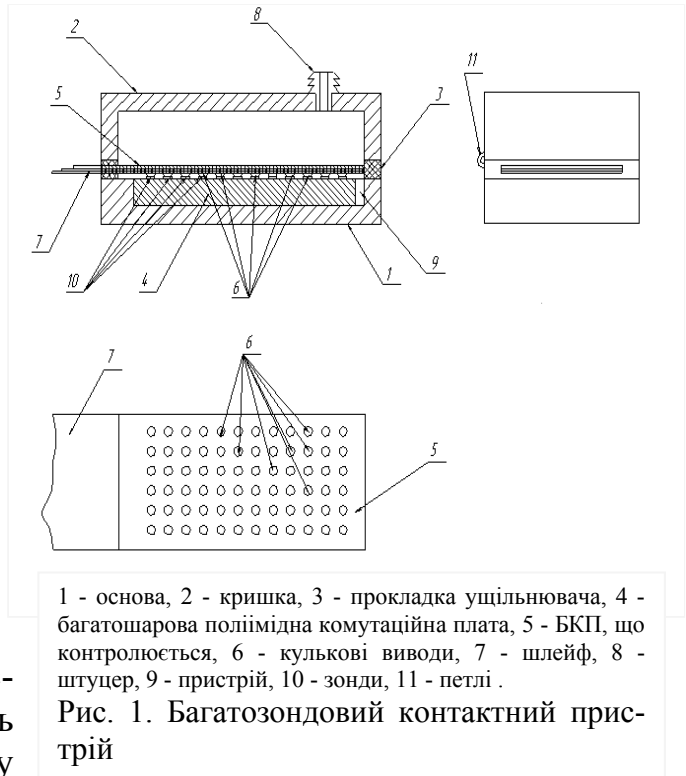
**У першому розділі** наведено огляд і аналіз контактних пристроїв, їх конструктивно-технологічних характеристик, сучасних вимог до виробництва і експлуатації.

Із зменшенням розмірів і збільшенням міри інтеграції БКП відбувається зменшення розмірів елементів, що контролюються, і збільшення щільності їх розташування. При використанні конструкцій контактних пристроїв для контролю електричних параметрів БКП відбувається постійне зменшення розмірів контактних елементів, а також значно збільшується їх кількість, тоді як загальна конструкція контактного пристрою і контактних елементів залишається незмінною. Це викликає постійне ускладнення виготовлення і експлуатації контактного пристрою, збільшення вартості, зниження механічної міцності, як окремих контактних елементів, так і контактного пристрою в цілому. Конструкції контактних пристроїв, які раніше (з малою кількістю і великим кроком зондів) відповідали вимогам надійності, точність, якості, перестають виконувати дані вимоги або стають надмірно дорогими. Безумовно, зараз існують контактні пристрої, що виконують дані умови, але вони відрізняються складністю конструктивного рішення, високою вартістю матеріалів, застосуванням дорогих або шкідливих матеріалів. Сьогодні усе більше посилюються вимоги до системи притиснення контактного пристрою, яка одночасно має забезпечити достатню якість операції контролю і відсутність пошкодження контрольованого пристрою під час контролю.

Отже, для контролю сучасних БКП існує необхідність розробки багатозондового контактної пристрою з великою кількістю зондів (декілька тисяч), високою щільністю їх розташування, високою надійністю контакту, низькою трудомісткістю і вартістю виробництва.

У другому розділі розглянуто конструкцію розробленого багатозондового контактної пристрою для контролю БКП, проведено аналіз технології його виготовлення. Розроблений багатозондовий контактний пристрій (рис. 1) володіє такими особливостями: багатшарова поліімідна комутаційна плата є гнучкою і контакт кожного зонда забезпечується за рахунок тиску стислого повітря, що дозволяє забезпечити рівномірне притиснення всіх точок багатшарової поліімідної комутаційної плати навіть при невеликій різниці у висоті контактних майданчиків плати, що контролюється. Пневматичне притиснення значно знижує вірогідність відсутності контакту (із-за різниці тиску на різних точках контролю) в порівнянні з механічним або магнітним притисненням. Багатшарову поліімідну комутаційну плату виконано на підключаючому шлейфі, що дозволяє підключати пристрій безпосередньо до вимірювального пристрою і виключити проміжні з'єднання, а також поліпшити механічні й електричні характеристики пристрою, що у свою чергу підвищує точність і надійність операції контролю.

Підключаючий шлейф і відповідно поліімідна комутаційна плата є багатшаровими, що забезпечує доступ вимірювального пристрою до великої кількості точок контролю на комутаційній платі (до декількох тисяч). Максимальна кількість виводів визначається кількістю шарів підключаючого шлейфу, кроком розміщення зондів, габаритами контролюваного виробу. Можливе використання розробленого пристрою для контролю складних багатшарових комутаційних плат (БКП). Кулькові виводи (зонди) виконано за технологією BGA, що дозволяє забезпечити їх малі розміри (діаметр до 50 мкм), високу щільність (крок розміщення до 100 мкм), високу якість контактування, простоту виготовлення, а також низьку трудомісткість і вартість підключаючого пристрою порівняно з іншими типами підключаючих пристроїв. Завдяки однаковому контактному тиску в контактних парах значно знижується кількість помилок під час контролю в порівнянні з іншими контактними пристроями з непереміщуваними контактами.



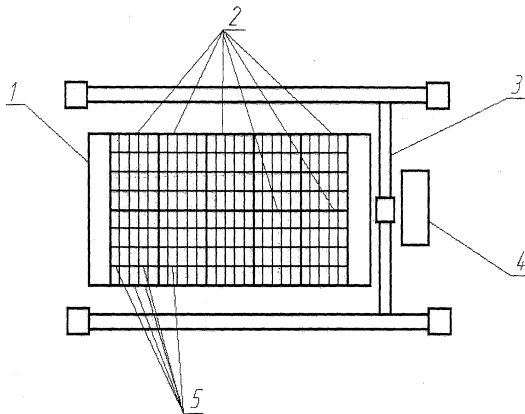
Зонди розташовані у вузлах координатної сітки у вигляді матриці або довільно, відповідно до топології контрольованої плати. У разі великої кількості точок контролю на БКП підключаючий шлейф може підходити до пристрою з двох, три або чотирьох сторін. Розроблений багатозондовий підключаючий пристрій можна використовувати для контролю електричних параметрів сучасних БКП завдяки високій щільності розміщення і малим розмірам зондів.

Технологія BGA відрізняється низькою вартістю і простотою, в порівнянні з технологіями виготовлення зондів інших контактних пристроїв. Крім того дана технологія швидко розвивається, що дозволить в майбутньому виготовляти зонди менших розмірів і з меншим кроком.

Притиснення контактної пристрою до контрольованого виробу здійснюється стислим повітрям. Якісне притиснення забезпечується за рахунок гнучкості притискуючої плати. Проведено аналіз можливих матеріалів для виробництва гнучких плат. Як матеріал притискуючої плати вибраний лакофольговий поліімід, що має низьку вартість, достатню гнучкість, механічну міцність, добрі діелектричні властивості.

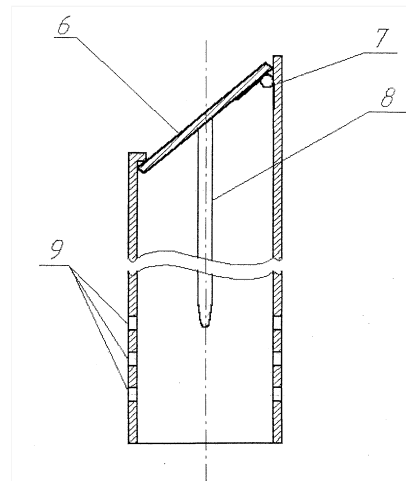
На основі технологій BGA і обробки лакофольгового поліімиду розроблено структуру технологічного процесу виробництва багатозондового контактної пристрою.

Для зниження дії доквілля на контрольовані вироби і дії вологи на поліімідні притискуючі пластини розроблено автоматизований склад. Склад з комірками складається з декількох секцій, які можна ізолювати одну від іншої. В кожній ізолюваній секції є своє призначення.



1 -зони зберігання трьох типів (контейнер),  
2 - секції для зберігання вантажу, 3 - робот порталного типу, 4 -приймальний стіл, 5 - комірка складу

Рис. 2. Схема автоматизованого складу.



6 - кришка комірки, 7 - пружина, 8 - фіксатор касети, 9 - отвори

Рис. 3. Поздовжній розріз комірки складу.

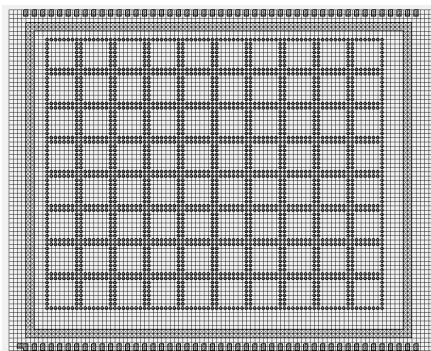
Зберігання модулів, елементів, виробів в умовах звичайного доквілля.



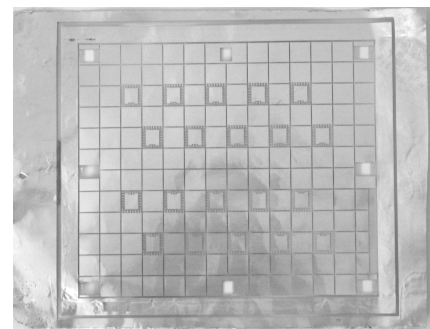
2. Температурна обробка (сушка, полімеризація та ін.). Дана можливість дозволяє поєднати операції зберігання і термообробки притискуючої пластини (сушка, дублення).

3. Для захисту контрольованих виробів і поліімідних матеріалів контактної пристрою від агресивного, по відношенню до нього, атмосферного повітря контейнер заповнюється захисним газом. Зберігання заготовок поліімідного шлейфу контактної пристрою в секціях, заповнених захисним газом дозволяє уникнути небажаної дії вологи.

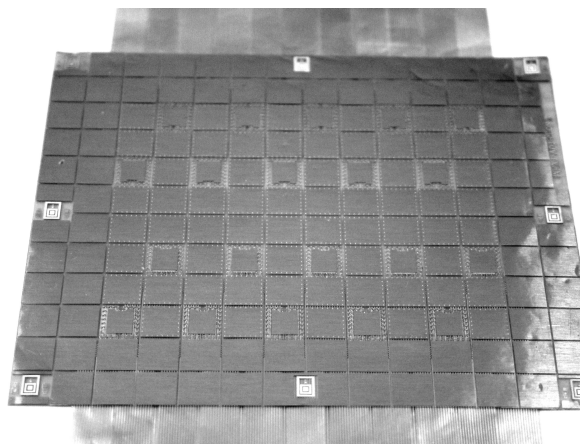
Розроблено конструкцію притискуючої пластини контактної пристрою для контролю БКП апаратури УКЦВС, розробленої Свердловським НДІ «Автоматика» (розміри 48x60мм, 2240 елементів, що контролюються), рис.4.



а



б



в

- а) контрольований виріб (БКП апаратури УКЦВС), 48x60мм;
- б) шар поліімідної притискуючої пластини;
- в) притискуюча пластина контактної пристрою.

Рис. 4. БКП, що контролюється, і шари поліімідної притискуючої пластини контактної пристрою

Для зручності підключення різні шари притискуючої пластини мають різну довжину шлейфу і на зворотну сторону поліімідного шлейфу в місці розташування контактів наклеєно смужки склотекстоліту завтовшки 100 мкм. Або можливе використання зіф-з'єднувачів. Запропонована конструкція контактної пристрою, що виготовляється на основі технологій BGA і

лаковольгового поліімиду, відрізняється простотою виготовлення і низькою собівартістю.

У третьому розділі проведено аналіз та вибір технології для виробництва багатозондового контактного пристрою, розглянутого в другому розділі. З метою зниження ймовірності браку при виробництві здійснено математичне обґрунтування вибору варіанта технології, устаткування, матеріалів для виробництва зондів пристрою на основі методу Байєсівських статистичних рішень. Якість операції контролю напряду залежить від якості виготовлення контактної пристрою.

Мета процесу пошуку рішення в завданні вибору устаткування для технологічного процесу виготовлення контактної пристрою полягає в здобутті рішення, яке було б описано з достатніми деталями для його практичного застосування в реальних умовах. Процес пошуку такого рішення здійснюється у вигляді послідовності експериментів, тобто операцій, в яких отримується інформація про природу можливих рішень.

Така інформація може бути отримана шляхом фактичної оцінки розробки конкретного рішення і визначення його вартісного критерію.

Побудовано дерево рішень шляхом складання списків всіх можливих операцій  $a$ , станів  $\theta$ , експериментів  $e$ , включаючи нульовий  $e_0$ . Для кожного експерименту складається список всіх можливих результатів  $z$ . У розробленому дереві рішень визначено такі рівні ієрархії: 1 – множина варіантів створення зондів за технологією BGA на поліімідном шлейфі (1), 2 – тип технології створення зондів (трафаретний друк – 11, і уприскування крапель припою - 12), 3 – устаткування (BGA9000a - 111, Apr-5000 – 112, InjectSys350A - 121, AOYUE 720 - 122), 4 – матеріал зондів (паяльні пасти Sn62/Pb36/Ag2 та NC297DX).

Для кожної комбінації визначається «експеримент, результат, операція, стан» її відносна бажаність, тобто  $u(e, z, a, \theta)$ . Задається попереднє («априорне») судження приймача рішень про відносну вірогідність різних станів  $\theta$  і виражається у вигляді розподілу вірогідності  $P'(\theta)$ . Для кожного експерименту визначається його імовірнісна характеристика у вигляді  $P'(z|\theta)$ . Для кожної комбінації «експеримент, результат» обчислюється апостеріорний розподіл  $P''(\theta | z, e)$  за формулою Байєса

$$P''(\theta | z, e) = \frac{P'(\theta)P(z|\theta, e)}{\sum_{\theta} P'(\theta)P(z|\theta, e)} \quad (1)$$

Визначається очікувана вигода від кожної операції для кожної комбінації «експеримент, результат» за формулою

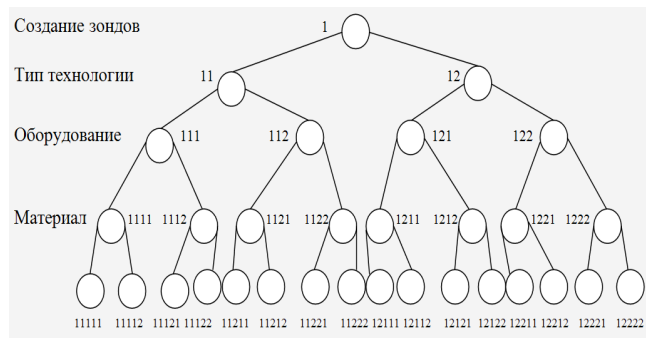
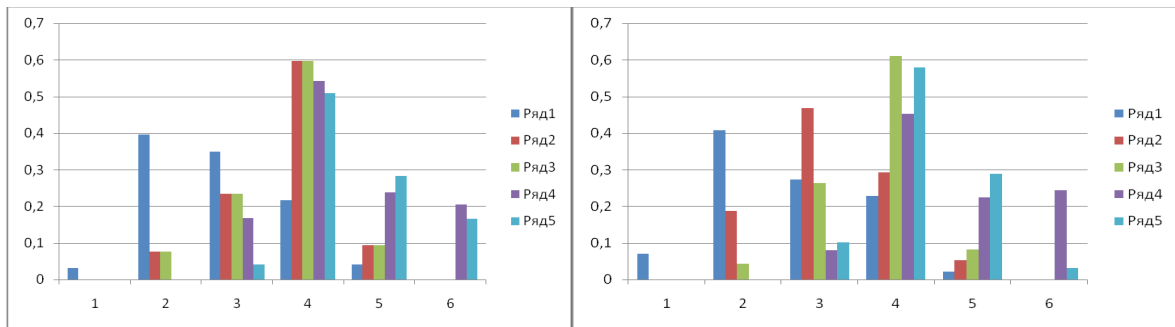


Рис. 5. Дерево рішень

$$u^*(a, e, z) = \sum_{\theta} u(e, z, a, \theta) \cdot P^{\theta}(\theta | z, e). \quad (2)$$

Для кожної комбінації «експеримент, результат» визначається оптимальна операція і оптимальна вигода

$$u^*(z, e) = \max u^*(a, z, e). \quad (3)$$



Для кожного експерименту обчислюється вірогідність кожного окремого результату  $z$ , що задається безумовним розподілом  $P(z | e)$ .

Для кожного експерименту визначається очікувана вигода  $u^*(e)$ :

$$u^* = \sum_z P(z|e) \cdot u^*(z, e). \quad (4)$$

Оптимальним вважається той експеримент  $e$ , для якого вигода  $u^*(e)$  максимальна. Оскільки тут розглядається також і нульовий експеримент, може виявитися, що саме він і є оптимальним; це означатиме, що операція має вибиратися без жодного експерименту:

$$u^*(e^*) = \max u^*(e). \quad (5)$$

Отже, розроблена на основі статистичних рішень Байєсівських модель вибору устаткування для виготовлення зондів багатозондового контактного пристрою дає можливість здійснити вибір варіанта устаткування за критерієм значення кількості виходу придатних виробів, навіть при малих кількостях одиниць устаткування, матеріалів тощо можна отримати значну кількість їх

поєднань. Оптимальним варіантом є вибір технології трафаретного друку, установка BGA9000a, матеріал виводів олово-свинець, що дозволило у свою чергу підвищити надійність операції контролю.

**У четвертому розділі** розглянуто вірогідність параметричних відмов зондів і міжшарових з'єднань гнучкої притискуючої пластини розробленого багатозондового контактного пристрою з метою вибору технологій міжшарових з'єднань і кріплення зондів.

Як основа використовувався розподіл Пуассона. Звичайний розподіл Пуассона не відповідає дійсності із-за нерівномірного розподілу дефектів, які утворюють деякі ділянки, кластери. Запропонований підхід, заснований на модифікованому (компаунд) розподілі. Статистичні моделі, засновані на компаунді-розподілі, можуть бути застосовані як на етапі розробки і проектування, так і на етапах виробництва. Розроблена математична модель компаунда-розподілів, дозволяє вирішувати завдання розрахунку розподілу виходу придатних контактних пристроїв від пластини до пластини, оцінки собівартості і управління ефективністю виробництва матричних виводів, контролю технологічних втрат та ін. Компаунд-розподіл Пуассона є простою моделлю оцінки виходу придатних виробів, заснованої на біноміальному розподілі.

$$P(k) = (C_n)^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (6)$$

Міра інтеграції  $n$  - мікросхеми є зазвичай велике число, а відмова окремого елемента  $p$  - свідомо мале число, біноміальний розподіл можна з високою точністю апроксимувати розподілом Пуассона. Хай  $\lambda=np$  – середнє очікуване число дефектів у мікросхемі. Згідно з розподілом Пуассона, вірогідність мати рівно  $k$  дефектів на гнучкій пластині:

$$P(k) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^k}{k!}. \quad (7)$$

Вихід працездатних виробів визначається як:

$$Y=1-e^{-\lambda}. \quad (8)$$

Даний вираз дає занижений прогноз очікуваного виходу придатних виробів для переходу від пластин меншої площі до пластин з більшою площею. Занижений прогноз обумовлений тим фактом, що різного роду дефекти на поліімідному шлейфі виникають в процесі технологічної обробки не незалежно

один від одного, а мають тенденцію групуватися разом, утворюючи більш-менш виражені кластери.

Прийнято, що щільність дефектів  $\lambda$  має щільність розподілу  $P(\lambda)$ .

$$P(\lambda) = \frac{b^a \cdot \lambda^{(a-1)} \cdot e^{-b\lambda}}{\Gamma(a)} \quad (9)$$

Вихід придатних виробів задається виразом:

$$Y = P(k=0) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda} P(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

На основі моделі невідтворюваності параметра  $\lambda$  за допомогою гамарозподілу Окабе і Степпера, щільність вірогідності якого задана виразом:

$$a = \frac{\mu^2}{D - \mu}, \quad (11)$$

$$b = \frac{\mu}{D - \mu}, \quad (12)$$

де  $a > 0$ ,  $b > 0$  – параметри гама-розподілу,  $D$  дисперсія  
Вихід придатних виробів подається формулою (13)

$$Y = P(k=0) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda_0}{b}\right)^a}, \quad (13)$$

де,  $\lambda_0$  – середнє число дефектів, що доводяться на одну пластину.

Отже, проведені дослідження дають можливість прогнозувати вірогідність відсутності відмов міжшарових з'єднань і з'єднання зондів до контактних майданчиків. Кращі показники за якістю виробів забезпечують зварні міжшарові з'єднання, на рівні 98,809% ймовірності знаходження з'єднання в працездатному стані після закінчення 15 тисяч годин роботи.

У п'ятому розділі розглянуто використання розробленого багато-зондового контактного пристрою для функціонального контролю мікро-електромеханічних систем (MEMS) на прикладі ємнісного акселерометра ADXL 103.

Розроблено топологію притискуючої пластини контактного пристрою для контролю MEMS акселерометра і здійснено математичне моделювання об'єкта контролю з метою порівняння експериментальних і розрахункових даних.

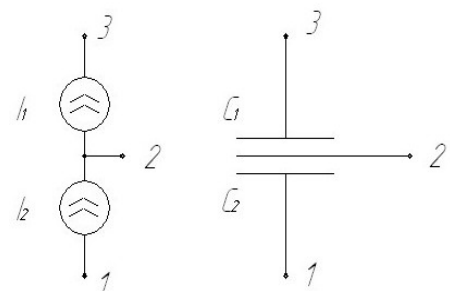


Рис. 7. Схема заміщення акселерометра залежними джерелами струму

Проведений експеримент щодо виміру вихідної напруги акселерометра ADXL 103 при різних зовнішніх чинниках (поворот, прискорення, вібрація). Вихідний сигнал контролювався за допомогою розробленого багатозондового контактного пристрою.

Для розробки контактної підключаючої пристрою для контролю певного виробу МЕМС необхідно детально вивчити його структуру, електричні і механічні параметри, діапазон їх вимірів. Зважаючи на складність пристроїв МЕМС великий інтерес становить моделювання структури, функціонування і розрахунок параметрів їх елементів при проектуванні. Для моделювання конкретного типу акселерометрів необхідно задатися еквівалентною схемою.

Для моделювання наведемо фізичну модель, побудовану на основі джерел струму (рис. 7). Баланс сил при лінійних зовнішніх прискореннях подається виразом:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} - \eta \frac{dx}{dt} - kx + \frac{\varepsilon S V_{21}^2}{2(x_0 + x)^2} - \frac{\varepsilon S V_{32}^2}{2(x_0 - x)^2} = 0. \quad (14)$$

Отримана залежність визначає значення ємностей  $C_1$  і  $C_2$ .

$$C_1 = \frac{\varepsilon S}{(x_0 - x)}; \quad C_2 = \frac{\varepsilon S}{(x_0 + x)}. \quad (15)$$

Що дозволяє визначити функціональну залежність джерел струму в схемі заміщення:

$$I_1 = -\frac{dQ_1}{dt} = -\left(V_{21} \frac{dC_1}{dt} + C_1 \frac{dV_{21}}{dt}\right); \quad (16)$$

$$I_2 = -\frac{dQ_2}{dt} = -\left(V_{32} \frac{dC_2}{dt} + C_2 \frac{dV_{32}}{dt}\right). \quad (17)$$

Для випадку диференціального конденсатора, рухливий електрод якого здійснює обертальне переміщення відносно осі (рис 8), що проходить через центр торсіонів пружного підвісу активними узагальненими силами є момент, що крутить, створюється неврівноваженою масою маятника під дією прискорення, а також моменти електростатичної взаємодії частин рухомої пластини з нерухомими електродами. Вони врівноважуються моментом сил тертя і моментом сил пружності, що розвивається закрученням торсіона.

Рівняння коливань маятника набуває такого вигляду:

$$M(a) + M^K + M^{EC} + M^L = 0 \quad (18)$$

Момент інерції самої балки жодного опору обертанню (окрім несиметричного, наприклад тертя об повітря) не чинить.

Рівняння залежності ємності від кута повороту маятника, набуває такого вигляду:

$$C_1 = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\varepsilon W dx}{d(x, \alpha)} = \left( \frac{\varepsilon W}{\operatorname{tg} \alpha} \ln \frac{d + X_2 \operatorname{tg} \alpha}{d + X_1 \operatorname{tg} \alpha} \right); \quad (19)$$

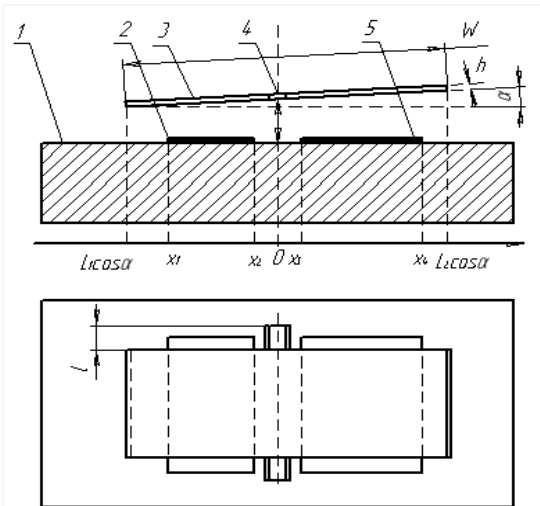
$$C_2 = \int_{x_3}^{x_4} \frac{\varepsilon W dx}{d(x, \alpha)} = \left( \frac{\varepsilon W}{\operatorname{tg} \alpha} \ln \frac{d + X_4 \operatorname{tg} \alpha}{d + X_3 \operatorname{tg} \alpha} \right). \quad (20)$$

При малих значеннях  $\alpha$  рівняння 19, 20 мають такий вигляд:

$$C_1 = \varepsilon W \left( \frac{X_2}{d + X_2 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{X_1}{d + X_1 \operatorname{tg} \alpha} \right); \quad (21)$$

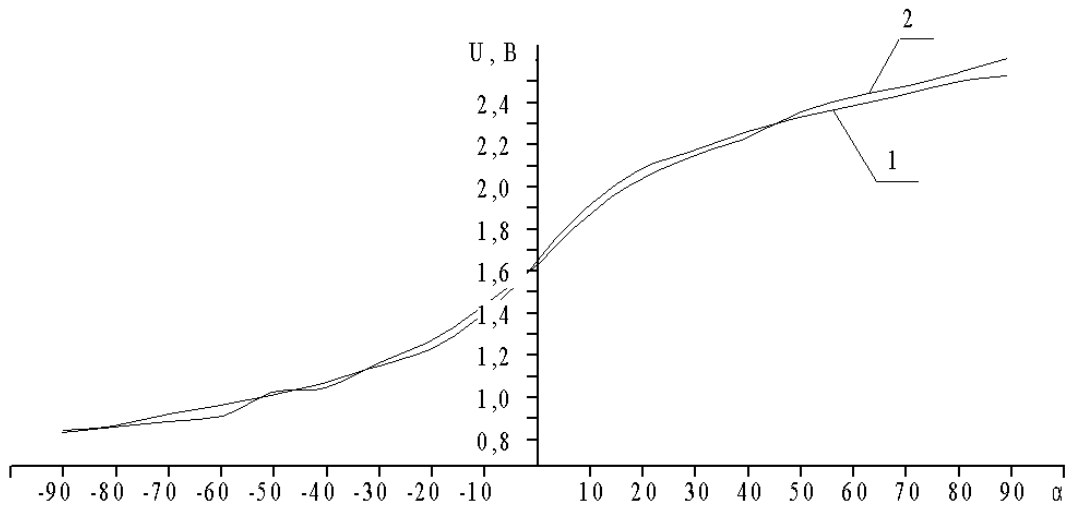
$$C_2 = \varepsilon W \left( \frac{X_4}{d + X_4 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{X_3}{d + X_3 \operatorname{tg} \alpha} \right). \quad (22)$$

Отримана модель акселерометра дозволяє з досить високою точністю визначати залежність зміни ємності від прикладеної зовнішньої сили. Для перевірки достовірності побудованої моделі порівняні дані отримано за допомогою моделі значень вихідної напруги від кута нахилу акселерометра з даними отриманими експериментально. Результати розрахунку і експерименту наведено на рис. 9.



1 - підкладка; 2 - перший електрод; 3 - маятник; 4 - торсіонні підвіси; 5 - другий електрод

Рис. 8. Конструкція маятникового акселерометра



1 – графік, побудований на основі моделі;

2 – графік, побудований на основі експериментальних даних.

Рис. 9. Графіки залежності вихідної напруги акселерометра від кута нахилу.

Відмінності в теоретичній і експериментальній залежностях значною мірою обумовлені наближеністю моделі і неточностями механізму позиціонування і неізолюваними зовнішніми вібраціями.

Порівняння отриманих експериментальних і розрахункових даних призводять до виводу про можливість застосування розробленого багатозондового контактної пристрою для проведення функціонального контролю МЕМС.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо розробки і дослідження прецизійного контактної пристрою для електричного контролю БКП і технології його виробництва, що забезпечує підвищення надійності, зниження собівартості операцій контролю БКП.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Шляхом синтезу технологій виготовлення мікрошлейфів на полііміді, технології виготовлення матричних кулькових виводів і технології пресування з повітряною прокладкою розроблені КТР, що забезпечують підключення до БКП декількох тисяч зондів на операціях контролю електричних параметрів плат. На розробку отримано патент України № 82405.

2. Виготовлено та випробовано макетний зразок багатозондового контактної пристрою для контролю п'ятишаровою плівковою БКП з розмірами 48x60мм, що містить 2400 зондів.

3. Вдосконалено конструкторсько-технологічні рішення багатозондового контактної пристрою за рахунок забезпечення можливості самотестування контакту кожного зонда з відповідною контрольованою точкою БКП. Направлена заявка на патент України.



4. Розроблено модифікацію багатозондового контактної пристрою, що забезпечує підключення компонентів з матричними кульковими виводами BGA/CSP для вхідного і функціонального контролю. Направлено заявку на патент України.

5. Розроблено МЕМС інтерфейс багатоточкових контролюючих пристроїв для підключення складних комутаційних плат на операціях контролю, що виключає всі проміжні паяні і різні з'єднання між зондами багатозондового контактної пристрою і точками підключення автоматизованих контролюючих пристроїв або пультів контролю.

6. Матричні багатозондові контактні пристрої визначено як перспективний напрям вимірювальної апаратури і для перспективних конструктивів типу кросу-барів, трекових ЗУ та ін.

7. Розроблено автоматизований склад для зберігання виробів електронної техніки на різних стадіях виробництва з можливістю поєднання операцій зберігання і термообробки, зберігання виробів в умовах неагресивного довкілля і малими витратами газу середовища.

9. Математично обґрунтовано вибір устаткування для виробництва контактної пристрою на основі Байєсовських статистичних рішень з метою зниження браку при виробництві зондів за технологією BGA.

10. Досліджено параметричні відмови міжшарових з'єднань і з'єднань зондів з контактними майданчиками поліімідної притискуючої пластини.

11. Підтверджена можливість використання розробленого багатозондового контактної пристрою для функціонального контролю МЕМС.

12. Досліджено функцію перетворення МЕМС об'єкта контролю (на прикладі акселерометра ADXL 103) з метою порівняння розрахункових і експериментальних даних, отриманих за допомогою контактної пристрою.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Патент на винахід, Україна №82405 МПК H05K 1/00 Багатозондовий контактний пристрій, публ. 10.04.08, Бюл. №7, 2008р.

2. Декларативний патент на корисну модель, Україна №2788 B65G 1/02 Автоматизований склад, публ.16.05.2004, Бюл. №8, 2004р.

3. Палагин В.А. Уточнение модели емкостных элементов МЭМС / В.А. Палагин, Е.А. Разумов-Фризюк, Е.В. Грицкевич // Нано- и микросистемная техника. – 2007. №4. – С. 48–50.

4. Невлюдов И.Ш. Нанолитография – наноимпринтинг / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, Е.А. Разумов-Фризюк // Радиотехника. – 2007. № 150. – С. 151–157.

5. Невлюдов. И.Ш. Многозондовое контактное устройство / И.Ш. Невлюдов, Ю.Н. Мачихин, В.А. Палагин, Е.А. Разумов-Фризюк // Технология приборостроения. – 2009. №2. – С. 43–45.

6. Невлюдов И.Ш. Использование метода Байесовских статистических решений для выбора варианта технологического процесса / И.Ш. Невлюдов, М.А. Омаров, В.А. Палагин, *Е.А. Разумов-Фризюк* // Вопросы пректирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2010. №3. – С. 173–180.

7. *Разумов-Фризюк Е.А.* Многозондовое контактное устройство / *Е.А. Разумов-Фризюк* // Стратегия качества в промышленности и образовании: 4-я Международная конференция, 30 мая – 6 июня: 2008г.. тезисы докл. – Варна, 2008. – С. 792–794.

8. *Разумов-Фризюк Е.А.* Моделирование емкостных элементов МЭМС / *Е.А. Разумов-Фризюк, Е.В. Грицкевич* // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: 3-я Международная конференция 16–21 апр.: 2007г., тезисы докл. – Севастополь, 2007. – С. 250.

9. Палагин В.А. Исследования возможности изготовления лако-фольговых диэлектриков повышенной точности для изготовления МЭМС устройств / В.А. Палагин, В.И. Степаненко, К.Ю. Харенко, *Е.А. Разумов-Фризюк* // Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития: 1-я Международная конференция 30 сен. – 3 окт. 2008г., тезисы докл. – Харьков-Судак, 2008. – С. 219–221.

10. *Разумов-Фризюк Е.А.* Контроль матричных структур БИС / *Е.А. Разумов-Фризюк* // Радиоэлектроника и молодеж в 21 веке: 8-ой Международный форум 19 - 15апр. 2004г., тезисы докл. – Х., 2004. – С. 159.

11. *Разумов-Фризюк Е.А.* Особенности изготовления микро-механических систем (МЭМС) / *Е.А. Разумов-Фризюк* // Радиоэлектроника и молодеж в 21 веке: 10-ый международный форум 10 - 12 апр. 2006г., тезисы докл. – Х., 2006. – С. 145.

12. *Разумов-Фризюк Е.А.* Технология наноимпринтинга / *Е.А. Разумов-Фризюк* // Радиоэлектроника и молодеж в 21 веке: 11-й Международный форум 10 - 12 апр. 2007г., тезисы докл. – Х., 2007, – С. 173.

13. *Разумов-Фризюк Е.А.* Многозондовое контактное устройство с самоконтролем / *Е.А. Разумов-Фризюк, И.Т. Тимчук* // Радиоэлектроника и молодеж в 21 веке: 14-й Международный форум 18 - 20 марта 2010г., тезисы докл. – Х., 2010. – С. 277.

14. Невлюдов И.Ш. Многозондовое подключающее устройство для контроля BGA-компонентов / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, И.Т. Тимчук, *Е.А. Разумов-Фризюк, И.В. Жарикова* // Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники: 3-я Международная конференция 28 сен.– 2 окт. 2010г., тезисы докл. – Харьков-Кацевели, 2010. – С. 191–194.

15. Невлюдов И.Ш. Использование метода Байесовских статистических решений для выбора варианта технологического процесса / И.Ш. Невлюдов,

М.А. Омаров, В.А. Палагин, *Е.А. Разумов-Фризюк* // *New Leading Technologies in Machine Building: 20-я международная конференция 3 - 8 сен. 2010г., тезисы докл.* – Харьков-Рыбачье, 2010. - С. 12–13.

#### АНОТАЦІЯ

**Разумов-Фризюк Є.А. Технологічне забезпечення електричного контролю багатозондових комутаційних плат в електронній техніці.** – Рукопис

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2010.

У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання розробки багатозондового контактної пристрою, що забезпечує підвищення якості і зниження собівартості електричного контролю МКП з великою кількістю контрольованих ланцюгів і високою щільністю їх розташування.

Новизна наукових результатів полягає у тому, що вперше на основі синтезу технології гнучких шлейфів та BGA/CSP структур запроваджено чотириточковий метод контролю з пневматичним притисненням багатозондових комутаційних плат, який дозволяє крім забезпечення перевірки багатозондових комутаційних плат високої щільності контролювати якість підключення багатозондового контактної пристрою до об'єкта контролю.

Практична значущість результатів визначається тим, що за результатами досліджень отримано патенти на винаходи №82405 «Багатозондовий підключаючий пристрій» Н05К 1/00, №2788 «Автоматизований склад» В65G 1/02, та подано заявки на отримання патентів №1786/ЗА/10 «МЕМС-інтерфейс багатоточкових автоматичних контролюючих комплексів», №21295/3 «Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій», №40904/3 «Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій».

#### АННОТАЦИЯ

**Разумов-Фризюк Е.А. Технологическое обеспечение электрического контроля многослойных коммутационных плат в электронной технике.** – Рукопись

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – Технология, оборудование и производство электронной техники. – Национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2010.

В работе решена актуальная научно-прикладная задача разработки многозондового контактного устройства, которое обеспечивает повышение качества и снижение себестоимости электрического контроля МКП с большим количеством контролируемых цепей и высокой плотностью их расположения.

Новизна научных результатов состоит в следующем:

- впервые на основании синтеза технологий гибких шлейфов и BGA/CSP структур создано микромеханическое многозондовое контактное устройство, обладающее интеллектуальными свойствами, что позволило кроме обеспечения проверки многослойных коммутационных плат высокой плотности осуществлять проверку качества подключения и повысить надежность;

- впервые обоснован технологический метод формирования матричных зондов и межслойных соединений многозондового контактного устройства, отличающейся использованием кластерной модели Пуассона, что позволило выбрать вариант технологии с наименьшей вероятностью параметрических отказов;

- усовершенствован метод контроля многослойных коммутационных плат за счет обоснования четырехзондового метода контроля электрических соединений на базе гибких коммутационных шлейфов с пневматическим прижатием, что позволило контролировать качество подключения многозондового контактного устройства во время технологической операции контроля;

- получил дальнейшее развитие метод Байесовских статистических решений, отличающийся формированием и оптимизацией дерева решений для выбора варианта технологии, оборудования, материалов технологического процесса.

Практическая значимость результатов определяется тем, что по результатам исследований получены патенты на изобретения №82405 «Многозондовое подключающее устройство» H05K1/00, №2788 «Автоматизированный склад» B65G 1/02 и поданы заявки на получение патентов №1786/3A/10 «МЭМС интерфейс многоточечных автоматизированных контролирующих устройств», №21295/3 «Микроэлектромеханическое многозондовое контактное устройство», №40904/3 «Микроэлектромеханическое многозондовое подключающее устройство».

## SUMMARY

Razumov-Fryziuk E.A. **The technological providing of electric control of multi-layered interconnect boards in electronic technique.** – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.27.06 - Technology, equipment and production of electronic technique. – National university of radioelectronics, Kharkov, 2010.

An actual scientific and applied problem is solved development of multiprobe contact device which provides upgrading and decline of prime price of electric control of MCB with plenty of the controlled chains and high closeness of their location.

The novelty of scientific results obtained is determined by performing for the first time the synthesis of technology of flexible loops and BGA/CSP structures it is inculcated four point method of control with the pneumatic pinning of multi-layered interconnect boards, which allows except for providing verifications of multi-layered interconnect boards of high-density to control quality of connecting of multiprobe connecting device to object of control.

The practical significance is determined by patents are got on inventions №82405 «Multiprobe connecting device» of H05K1/00, №2788 «Automated storage» of B65G 1/02 and requests are given on the receipt of patents №1786/3A/10 «MEMS interface of the automated supervisory devices» of suspension points, №21295/3 «Mikroelektromechanic multiprobe contact device», №40904/3 «Mikroelektromechanic multiprobe connecting device».

Підп. до друку 22.11.10. Формат 60×84 1/16. Спосіб друку – ризографія.  
Умов. друк. арк. 1,2. Облік. вид. арк. 1,1. Тираж 100 прим.  
Зам. № 2-1086. Ціна договірна.

---

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ  
61166, Харків, просп. Леніна, 14