

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**ПАЛАГІН ВІКТОР АНДРІЙОВИЧ**

УДК.621.3.049.77

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ  
ВИРОБНИЦТВА КОМПОНЕНТІВ  
МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

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

Харків 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: Заслужений діяч науки і техніки України,  
Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор  
**Невлюдов Ігор Шакирович**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри технології та автоматизації  
виробництва радіоелектронних та  
електронно-обчислювальних засобів.

Офіційні опоненти: Заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор  
**Овчаренко Віталій Євгенович**,  
ДП «Науково-дослідний технологічний інститут  
приладобудування» м. Харків,  
Державне космічне агентство України,  
заступник директора з наукової роботи;

Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор  
**Дружинін Анатолій Олександрович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри напівпровідникової електроніки;

доктор технічних наук, професор  
**Уваров Борис Михайлович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
професор кафедри радіоконструювання і  
виробництва радіоапаратури.

Захист відбудеться «30» червня 2016 р. о 13<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради. Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м Харків, проспект Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, Харків, пр. Науки 14.

Автореферат розісланий «\_\_» травня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04  
к. ф-м. н., доц.

О. Г. Пащенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) є одним з прогресивних напрямків мікросистемної техніки (МСТ), яка разом з нанотехнологіями (НТ) вважаються в усьому світі як революційні, що визначають тенденції розвитку сучасного виробництва електронної техніки. Про це свідчить велика кількість державних, загальнонаціональних програм, перша з яких прийнята в Німеччині у 1998 р. В подальшому аналогічні довгострокові програми з'явилися і в інших країнах світу: Японія 1999 р. «Національна програма МСТ»; США 2000 р. «Національна нанотехнологічна ініціатива»; Росія 2006 р. національна цільова програма «Наноіндустрії і мікросистеми», Україна 2007 р. в рамках сьомої рамкової програми Євросоюзу підпрограми «Нанонауки, нанотехнології, матеріали та нові технології виробництва».

Під егідою НАНУ в даній програмі бере участь значна кількість інститутів, академій та університетів України. Інститут проблем матеріалознавства м. Київ та Донецький фізико-технічний інститут розробили медичні матеріали та носії цільової доставки ліків в організмі. Інститут монокристалів (м. Харків) розробляє сцинтиляційні матеріали і порошки для низькотемпературного спікання кераміки. НДТІП (м. Харків) розробив технологію виготовлення мікрошлейфів. Інститут електрозварювання (м. Київ) розробив унікальне обладнання і технологію нанесення термо-, зносо- і корозійностійких покриттів електронним променем (ЕВ PVD). У Львівському національному політехнічному університеті на високому рівні розвинена школа САПР МСТ.

Конструктивно-технологічним особливостям компонентів мікросистемної техніки присвячені праці багатьох зарубіжних і вітчизняних вчених. Можна назвати такі відомі імена, як Павлос Алівісатос, Ауазі Ф.А., Варадан В., Вернер В.Д., Борщев В.Н., Ваганов В.І., Гордієнко Ю.Є., Дружинін А.О., Лепіх Я.І., Лобур М.В., Лучинін В.В., Невлюдов І.Ш., Рожицький М.М., Стасюк З.В., та інші.

Між собою МСТ і нанотехнології тісно пов'язані: з одного боку, МЕМС-актуатори використовуються як мікроінструменти для маніпулювання нанооб'єктами, мікро- і нанороботами і їх вивчення, з іншого боку, квантовомеханічні ефекти, нові матеріали, пов'язані з наноструктурами, практичне застосування часто отримують у вигляді виробів МЕМС.

Об'єднання на рівні вузлів і блоків в єдину мікросистему механічних, електронних, оптичних, акустичних, магнітних, рідинних та інших компонентів дозволяє значно підвищити електрофізичні характеристики, але і водночас призводить до складності технологій, різноманітності процесів, високого рівня вимог до стабільності і контролю виробництва.

Інтерес до МЕМС пов'язаний не тільки з принципово новими технічними можливостями, а й з економічними, які забезпечують значне зниження витрат на виробництво продукції в процесі масових випусків за рахунок використання групових методів виготовлення і ресурсозбереження. Але масовість виробництва складних конструкцій МЕМС вимагає розробки ефективних методів проектування технологічних процесів та їх моніторинга під час виробництва.

Широке впровадження технологій виробництва МЕМС стримується відсутністю методологічних основ, які враховували б відмінності проектування мікророзмірних компонентів та спільне використання явищ різної фізичної природи в одному пристрої, що утворює протиріччя між традиційними підходами проектування та новими напрямками високих технологій.

На жаль, методологічних основ проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем, які враховували б специфіку техніки мікромініатюризації композиційних пристроїв, не існує.

Звідси виникає науково-прикладна проблема підвищення ефективності проектування технологічних процесів виробництва компонентів МЕМС з використанням явищ різної фізичної природи і зміни співвідношень діючих сил в процесі масштабування, які вимагають використання знань ряду суміжних технічних напрямків.

Таким чином, тема присвячена розробці методологічних основ проектування технологій компонентів МЕМС, обумовлена складністю об'єднання в межах одного виробу принципово різних систем і технологічних процесів і є актуальною науковою проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота пов'язана з планами наукових досліджень кафедри «Технології і автоматизації виробництва радіоелектронної та електронно-обчислювальної апаратури» Харківського національного університету радіоелектроніки за темами:

– «Теоретичні основи створення перспективних компонентів і нових технологій їх виробництва для широкого класу волоконно-оптичних систем». Термін виконання 1.01.2005 р. – 31.12.2007 р. (Держ. Реєстрація № 0105U002739);

– «Конструктивно-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем і технологій їх виробництва». Термін виконання 1.01.2008 р. – 31.12.2009 р. (Держ. Реєстрація № 0108U002216);

– «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем». (Держ. Реєстрація 0113U000358). Термін виконання 1.01.2010 р. – 31.12.2012 р. (Держ. Реєстрація №0110U002594);

– «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями і їх впровадження». Термін виконання 1.01.2013 р. – 31.12.2014 р. (Держ. Реєстрація № 0113U0003582).

Здобувач у цих роботах узагальнив теоретичні положення електромеханічних аналогій, використовував теорію подібності та розмірностей фізичних величин, байєсівських статистичних рішень для вибору кращого варіанта технологічного процесу, рекурентних методів оптимальних рішень для вибору стратегії моніторингу стохастичних технологічних процесів, досліджував конструктивно-технологічні рішення електронних і механічних компонентів МЕМС.

Здобувач виконав роботи за рядом господарських договорів, що спрямовані на вдосконалення та розвиток технології виробів електронного приладобудування: договір № 03 – 19 від 2003 р., договір № 4 – 37 від 2004 р., договір № 5 – 30 від 2005 р., № 19 від 2013 р., № 01 від 2014 р., № 04 від 2014 р., № 11 від 2014 р., № 03 – 04 від 2015 р. та інших.

**Мета роботи і завдання досліджень.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем шляхом закладення методологічних основ, які враховують зміни електрофізичних характеристик виробів за рахунок конвергенції явищ різної фізичної природи, зміни співвідношення діючих сил в процесі масштабування, можливість прогнозування виходу придатних компонентів, вибір варіанта та моніторинг технологічного процесу.

Для досягнення мети вирішуються такі завдання:

- аналіз реакції на зовнішні впливи механічних, електричних (електронних) компонентів, що входять у МЕМС;
- узагальнення теорії електромеханічних аналогій для розробки компонентів МЕМС, що містять мікромеханічні та електронні пристрої з урахуванням впливу масштабних коефіцієнтів на їх властивості;
- розробка рекурентного методу прийняття рішень у стохастичних системах для моніторингу технологічних процесів виробництва компонентів МЕМС;
- використання байєсівських статистичних рішень для вибору кращих варіантів технологічних процесів;
- розробка методу прогнозування виходу придатних компонентів за їхніми конструктивними елементами;
- використання принципу конвергенції для моделювання конструкторсько-технологічних рішень (КТР) багатозондового підмикального пристрою з самомоніторингом будь-якого зонду для контролю електронних компонентів з матричними кульковими виводами;
- моделювання КТР багатозондового підмикального пристрою для автоматизації електричного контролю багатозондових комутаційних структур з можливістю самоконтролю контактування кожного зонду;
- проведення аналізу ефективних областей створення МЕМС.

**Об'єктом дослідження** є технологічні процеси виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем.

**Предметом дослідження** є математичні моделі, методи та фізичні явища в компонентах і методології проектування технологій компонентів МЕМС.

**Методи дослідження.** У роботі використані математичні методи теорії подібності та розмірностей фізичних величин для виявлення зміни співвідношень сил, які діють у МЕМС компонентах водночас; електромеханічних аналогій у математичних моделях компонентів МЕМС; матрично-векторних операцій та марківських процесів під час побудови стратегії моніторингу технологічних процесів; байєсівських статистичних рішень для вибору варіанта технологічного процесу та ідентифікації функції перехідних ймовірностей; спряжених розподілів ймовірностей для спрощення перерахунків виходу придатних виробів; теорія напружено-деформованого стану матеріалів і елементів МЕМС в процесі розрахунків деформацій і пружностей компонентів; САПР під час розробок топології багатозондових підмикальних пристроїв.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Вперше методологічними основами розробки мікроелектромеханічних систем запропоновано визначити конвергенцію незвичайних фізичних явищ у мікромініатюрних виробках з урахуванням змен-

шення лінійних розмірів компонентів і зміни співвідношень дії різних видів сил, що дає можливість створення принципово нових технічних рішень для поліпшення електрофізичних характеристик мікрокомпонентів і техніко-економічних показників їх виробництва.

Вперше запропоновані метод і технологія створення МЕМС багатозондових підмикальних пристроїв (БПП) для контролю електричних параметрів багатошарових комутаційних структур, а також вихідного і функціонального контролю електронних компонентів з матричними кульковими виводами, засновані на поєднанні технологій гнучких полімерних шлейфів, матричних кулькових виводів і пресування з повітряною подушкою, що забезпечує підвищення щільності розміщення зондів на площині, надійність контактування та інтелектуальні властивості, виключає помилки контролю.

Набув подальшого розвитку:

- метод проектування МЕМС шляхом використання узагальнених сил, маси, координат та врахування мініатюризації механічних та електричних компонентів, що дає змогу скласти єдину систему рівнянь для статичного та динамічного режиму роботи МЕМС;

- математичні моделі чутливих елементів на основі балок складної конструкції, резонаторів у вигляді зустрічно-штирьових систем, п'єзоперетворювачів механічної енергії в електричну, що дозволяє поліпшити електро-фізичні властивості компонентів;

- метод управління електрофізичними параметрами компонентів, за різних поєднань діючих у МЕМС сил, що дозволяє підвищити швидкодію механічних і теплових актюаторів і датчиків, чутливість і добротність мікромеханічних резонансних систем;

- положення теорії байєсівських статистичних рішень, які об'єднують експертні оцінки та результати експериментів, що забезпечує вибір кращого варіанта ТП серед альтернативних;

- положення теорії рекурентних методів прийняття рішень у стохастичних процесах з прибутками, що дозволяє оптимізувати стратегії моніторингу складних технологічних процесів;

- метод прогнозування та розрахунку виходу придатних компонентів МЕМС на основі базових елементів конструкції, який дозволяє враховувати вплив технологій виготовлення, конструкцій, матеріалів, обладнання та організаційних вимог виробництва на вихід придатних.

**Практичне значення наукових результатів.** Розроблені методологічні основи проектування технологічних процесів виробництва компонентів МЕМС, які забезпечують:

- вибір кращого варіанта ТП за показниками мінімальних витрат;

- вибір оптимальної стратегії моніторингу ТП;

- прогнозування виходу придатних компонентів.

Визначено ефективні конструкторсько-технологічні рішення МЕМС, зокрема:

- виготовлення матричних структур чутливих елементів (сенсорів температури, тиску, ІЧ-випромінювання, мультисенсорів, безконтактних датчиків високої температури, мікропотужних джерел живлення, в тому числі тих, що утилізують невикористовувані види енергії (вібрацій, трясіння, ударів тощо), мікромеха-

нічних вузлів у вигляді безскладальних конструкцій з розподіленою, зосередженою податливістю, керованою конфігурацією.

Створені макетні й дослідні зразки МЕМС БПП для контролю електричних параметрів багатозондових структур, а також вхідного і функціонального контролю електронних компонентів з матричними кульковими виводами, які володіють інтелектуальними властивостями, а саме, можливістю самотестування будь-якого контакту з усієї множини; отримані патенти України № 82405, 95190, 97538, 98539). Їх випробування в дослідному виробництві показало виключення помилок першого і другого роду (пропуск бракованих і забракування придатних плат), зменшення собівартості та ГМХ (габаритномасових характеристик) приблизно на 1 – 2 порядки.

Дано рекомендації щодо конструктивно-технологічних рішень БПП за результатами математичного моделювання структур з різними елементами нерегулярності розташування точок контролю на площині виробів.

Розроблено МЕМС-інтерфейс для автоматичних контролюючих комплексів з багатозондовим підмикальним пристроєм (патент України № 98539 МПК H05K опубл. 05. 2012 р.), який зменшує кількість роз'ємних з'єднань на шляху від контрольованого виробу до автоматичного контролюючого пристрою від двох до трьох разів.

Створена матеріально-технічна база для підготовки фахівців за напрямом проектування та виробництва мікросистемної техніки, яка послужила основою для відкриття нової спеціальності підготовки бакалаврів, фахівців і магістрів «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної апаратури».

Створено кооперацію ряду підприємств м. Харкова для робіт у напрямку мікросистемної техніки; лабораторна база ХНУРЕ, спільний науково-навчально-виробничий центр ХНУРЕ – «Хартрон-Енерго ЛТД» (наказ № 208, від 24.10.2008 р.), виконано спільні розробки БПП з НДТІ Приладобудування, «Хартрон-Енерго ЛТД» і Львівським Інститутом прикладних проблем математики і механіки (НАНУ), КБ «Полісвіт» ДНВП «Об'єднання Комунар».

На підприємстві ДНВП «Комунар» впроваджені МЕМС багатозондові підмикальні пристрої з розщепленими зондами та метод прогнозування виходу придатних друкованих плат, на ДП «Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування» – метод вибору кращого варіанта ТП, на ООО НПФ «ВЕСТ ЛАБС ЛТД», Корпорація Тиол ООО НПО «Вертикаль», «Titan Machinery Limited» – МЕМС БПП для контролю компонентів BGA/CSP, про що свідчать відповідні акти впровадження.

Створено науково-технічну базу для підготовки бакалаврів, спеціалістів, магістрів і спеціалістів вищої кваліфікації за напрямом мікросистемної техніки:

– видано 1 монографію, 2 підручники для ВНЗ, які використовуються рядом провідних університетів України;

– поставлені нові лабораторні роботи з курсу «Компоненти і технології МЕМС»;

– підготовлено нові дисципліни «Високі технології», «Компоненти і технології мікросистемної радіоелектронної апаратури», «Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології», які викладаються студентам окремих спеціальностей ХНУРЕ.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані безпосередньо здобувачем. У друкованих наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належить: в [1] – вибір методу байєсівських статистичних

рішень і марківських процесів для відпрацювання технологічних рішень, прийнятих на етапах проектування виробів і моніторингу технологічних процесів їх виробництва; в [2] – розрахунок виходу придатних функціональних вузлів електронної апаратури за відомими конструктивними елементами з використанням апарата спряжених розподілів; в [3, 4, 6, 8, 17] – метод послідовного вибору кращого варіанта розробки за критерієм вартості на дереві рішень, який використовує експериментальні дані для коригування вихідних розподілів ймовірності за формулою Байєса; в [5, 7, 9] – використання марківських ланцюгів з прибутками для прогнозування (пошуку) оптимальної стратегії моніторингу в динамічних системах з дискретними станами, перерахунку параметра дискретного розподілу; в [10, 11, 12, 24, 29] – розгляд нових тенденцій інтеграції в одному чіпі компонентів механічних, електронних, оптичних, техніко-економічні переваги мікросистемної техніки; в [13] – уточнення рівнянь взаємодії електростатичних сил і пружних властивостей мікробалочної конструкції; в [14] – можливості МЕМС для мікромініатюаризації виконавчих механічних пристроїв і роботів; в [15] – порівняння можливостей елементів сонячних батарей на колоїдному напівпровіднику  $TiO_2$  з елементами на основі кремнію; в [16, 18, 19, 20, 30, 28, 34, 35] – рішення про заміну широко використовуваних багатозондових пристроїв, для підключення виробів у вигляді «ложе цвяхів», стрижнів з втратою стійкості і «літаючих зондів» на нетрадиційні МЕМС з матричними кульковими выводами на гнучкому поліімідному шлейфі з притисненням стисненим повітрям, а також поділом кожного зонду на кілька елементів для отримання можливості контролю контактування зондів з контактними майданчиками контрольованих БКП і електронних компонентів BGA/CSP; в [21, 23] – оцінка впливу лінійних розмірів компонентів на швидкість зміни різних фізичних сил; в [22, 24, 29, 38] – класифікація технологічних процесів виготовлення компонентів МЕМС і оцінка можливостей технологій МСТ; в [25] – положення, що конвергенція особливостей різних фізичних явищ є основним принципом створення компонентів МЕМС; в [26] – запропонована конструкція п'єзоелектричного циклічного перетворювача механічної енергії ваги рухомого об'єкта в електричну; в [27] – проведено оцінку можливостей наноімпринтинга і використання принципу рівномірної передачі тиску з використанням повітряної подушки; в [31] – оцінка параметрів діелектриків для виготовлення МЕМС; в [32] – розрахунок матриць жорсткості мікробалок складної конструкції; в [33, 30] – зв'язок компонентів функціональної електроніки та мікросистемної техніки; [36] – узагальнення теорії електромеханічних аналогій для систем «сила-струм», «сила-напруга»; в [37, 38, 39, 40, 42] – варіанти підвищення технологічності та надійності багатозондових підмикальних пристроїв; в [41, 44] – побудова дерева рішень для вибору кращого варіанта ТП з альтернативних; в [39, 43] – використання теорії подібності і розмірності фізичних величин для аналізу співвідношення діючих у мікроелектромеханічному пристрої сил, можливості поліпшення електрофізичних параметрів на основі ЕМА; в [45] – перелік особливостей різних фізичних явищ, котрі придатні для використання в МЕМС актюаторах.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і публікувалися на таких конференціях: The International Workshop on Optoelectronic. Physics and Technology (Kharkiv, 2007 р.); 2-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку»



МРФ-2005 (Харків, 2005 р.); 3-й МРФ «Електронна компонентна база. Стан і перспективи розвитку» (Харків – Судак, 2008 р.); 4-й МНК «Функціональна база наноелектроніки» (Харків – Кацівелі, 2011 р.); East-West Design and Technology Systems (EWDTS '2012) / IEEE Computer Society (Kharkiv, 2012); VI МНПК «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (м. Запоріжжя, 2012 р.); V МНК «Функціональна база наноелектроніки» (Харків – Крим, 2012 р.); VII Міжнародному симпозиумі «Фундаментальные и прикладные проблемы науки» (Москва, РАН, 2012 г.); а також на науково-технічних семінарах і конференціях ХНУРЕ (всього на 19 МНК).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень видана 1 монографія, 2 підручники з грифом МОНУ для студентів ВНЗ, опубліковано 26 статей у наукових фахових виданнях України, 5 публікацій, які входять до наукометричних баз «Scopus», «Ulrich`s Periodicals Directory», «Index Copernicus», «РІНЦ», рецензованих зарубіжними виданнями, 18 публікацій у збірниках матеріалів і тез доповідей науково-технічних конференцій, отримано 9 патентів України.

**Структура роботи.** Дисертаційна робота є рукописом і складається із вступу, 6 розділів, висновків, 15 додатків. Повний обсяг дисертації складає 302 сторінки, включає 78 рисунків, 8 таблиць, список використаних джерел з 253 найменувань на 25 сторінках, 15 додатків на 42 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовується актуальність роботи, визначено мету та завдання, показана практична значимість і наукова новизна отриманих результатів, сформульовані основні положення і висновки. Наведено інформацію про наукові публікації здобувача за темою роботи, його особистий внесок у вирішення проблеми. Подано короткий зміст дисертаційної роботи.

**У першому розділі** проведено аналіз сучасного стану і проблем розвитку мікроелектромеханічних систем для різних сфер використання. Встановлено, що поліпшення відомих технологій вже знаходиться на межі фізичних можливостей (субмікронні розміри елементів, ізоляція з двох-трьох молекулярних шарів, одноелектронні транзистори, ускладнення міжз'єднань, теплових режимів тощо.).

Вказується, що ефективними сферами застосування МЕМС стали: космічна, військова, медична, автомобільна, ІТ-техніка, прилади для наукових досліджень, мікроробототехніка, мікрофлюїдика, зростає частка виробництва МЕМС для споживчої електроніки (мобільних телефонів, планшетів, ноутбуків, моніторів, засобів GPS-навігації та інших), найбільш ефективними МЕМС-компонентами виявилися п'єзорезистивні датчики тиску медичного призначення, струменеві термо- і п'єзодрукуючі головки, ємнісні акселерометри та мікродзеркальні цифрові пристрої, масове виробництво акселерометрів для автомобільної промисловості дало значні кошти для розвитку робіт з МЕМС в цілому.

Визначається призначення компонентів МЕМС, як прецизійних та інтелектуальних датчиків фізичних величин, актюаторів, мікророботів, мікрофлюїдних пристроїв, окремих електронних компонентів.

Вказується, що сучасні актюатори включають: мікродвигуни (електростатичні, п'єзо-, вібраційні, рідинні- і твердотільні реактивні імпульсної дії), мікродозатори, позиціонери, мікродзеркала, мікробалки, кантилевери, міліпеде, мембрани, вали, контактори.

Зазначається, що окремим напрямком можна вважати мікроробототехніку та її медичні, військові, космічні мікро- і нанопристрої, мобільні роботи для різних середовищ, розподілені робототехнічні пристрої, біологічні та біоподібні роботи.

Відзначається високий рівень та темпи розвитку МЕМС-компонентів у світі.

Сформульовані проблеми дослідження, що полягають у необхідності підвищення ефективності виробництва за рахунок створення методологічних основ проектування компонентів МЕМС, мета та задачі дисертаційної роботи.

Дані, наведені у розділі 1, опубліковано в роботах [10 – 15, 27, 29 – 32, 45, 46].

**У другому розділі** виконаний фізико-математичний аналіз зміни властивостей компонентів МЕМС із пропорційним зменшенням лінійних розмірів тіл і конвергенції в одному пристрої відомих явищ різної фізичної природи.

Виділено особливості цих явищ з метою використання в МЕМС.

Зі зменшенням розмірів елементів змінюються співвідношення об'ємних і поверхневих сил, інерційних і сил пружності твердого тіла, сил тертя, гравітації та інерції, змінюються умови теплопередачі, швидкодія та інші електрофізичні параметри елементів.

До фізико-математичних основ відносять принципи ізоморфізму, електромеханічних (та інших) аналогій, теорії подібності та розмірностей фізичних величин (ТП і РФВ).

Так, явища електро- і теплопровідності, дифузії, перенесення кількості руху із в'язким перебігом рідини та інші описуються добутком похідної відповідної змінної ( $U$  – напруги,  $T$  – температури,  $C$  – концентрації речовини,  $v$  швидкості течії) за координатами, помноженими на відповідний коефіцієнт ( $\sigma$  – електропровідність,  $\lambda$  – теплопровідність,  $D$  – дифузія,  $\eta_e$  – динамічна в'язкість). Тому із введенням відповідних коефіцієнтів перерахунку кожне з наведених явищ можна змоделювати будь-яким іншим з урахуванням реальних обмежень умов їх протікання, зручності й точності вимірювання відповідних змінних.

Електромеханічні аналогії дозволяють описати дію в одному пристрої мікромеханічних сенсорів і (або) актюаторів спільно з мікроелектронною схемою обробки і передачі інформації.

Фізичні процеси або системи подібні, якщо у відповідні моменти часу у відповідних точках простору відповідні значення змінних величин, що характеризують стан однієї системи, пропорційні відповідним величинам іншої системи. Критеріями подібності є однакові значення характеристичних чисел.

Логічною основою теорії подібності (ТП) є теорія розмірностей фізичних величин, яка для опису досліджуваних явищ використовує системи з основними незалежними величинами.

(У системі вимірювань СІ для опису механічних процесів достатньо трьох основних величин: довжини,  $l$ ,  $m$  [L]; маси  $m$ , кг [M];  $t$ , часу, [T]. Для електромеханічних систем необхідно додати ще одну основну величину – силу струму  $A$  [I], або напругу  $V$ [U].

Похідні одиниці утворюються за загальним рівнянням:  $[x_{r+1}] = K[x_1]^{a_1}[x_2]^{a_2} \dots [x_r]^{a_r}$ , де  $[x]$  – основна одиниця (розмірність) величини  $x$ ,  $i=1,2,\dots,r$ ;  $\alpha$  – абстрактні додатні або від’ємні числа;  $K$  – числовий коефіцієнт.

Дія різних сил змінюється за різними законами зі зменшенням лінійних розмірів, змінюються співвідношення сил, що діють у пристроях МЕМС одночасно. Внаслідок цього багато фізичних величин, що характеризують мікро- та наносистеми, відрізняються від величин макросистем.

При цьому величини, які визначають властивості матеріалів: щільність  $\rho$ , модуль Юнга  $E$ , зсуву, діелектрична і магнітна проникність  $\varepsilon$ ,  $\mu$  інші модулі та константи вважаються постійними.

Розглянемо у відомих співвідношеннях електричних величин і різних сил їх залежність від масштабу лінійних величин – розмірності  $[L]$ .

Площа  $S \sim [L^2]$ ; об’єм  $V \sim [L^3]$ ; маса  $m \sim V \sim [L^3]$ .

В електричних колах за постійної електричної напруженості поля  $E$  напруга  $U=El \sim [L^1]$ . Залежність похідних електричних величин від лінійних розмірів опору  $R$ , індуктивності  $L$  і взаємоіндуктивності  $M$ :  $R = \rho \frac{1}{S} \sim [L^{-1}]$ ;  $L, M \sim [L^1]$ ,  $I [L^2]$ ;  $p \sim [L^2]$ .

Нижче розглянуті закони зміни різних сил.

1. Сила поверхневого натягу  $F$  пропорційна довжині:  $F = al \sim [L^1]$ .

2. Сила електростатичної взаємодії між обкладинками плоского конденсатора від зміни зазору  $d$  або зсуву за однією з осей площини  $b$  або  $l$ , визначається як похідна потенційної енергії по лінійному розміру, що зменшується за квадратичною залежністю (рис. 1)

$$F_d = \frac{\partial W}{\partial d} = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 b l}{d^2} u^2 \sim [L^2],$$

$$F_b = \frac{\partial W}{\partial b} = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l}{d} u^2 \sim [L^2],$$

$$F_l = \frac{\partial W}{\partial l} = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 b}{d} u^2 \sim [L^2].$$

(1)

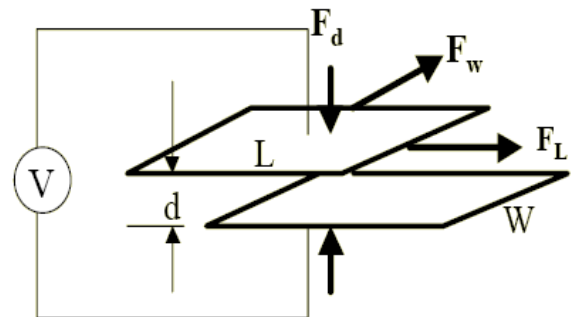


Рисунок 1 – Електростатична взаємодія

Таку саму залежність мають сили, що створюються тиском газів і рідин.

3. Електромагнітна сила взаємодії струму  $I$ , що протікає провідником, з полем постійного магніту створює індукцію  $B$ , змінюється відповідно до закону Фарадея пропорційно кубу лінійного розміру, де  $\psi$  – потокозчеплення:

$$F = I \frac{d\psi}{dx} = I \frac{B l dx}{dx} = B I l \sim [L^3]. \quad (2)$$

Вага компонентів також змінюється за кубічним законом.

4. Під час електромагнітної взаємодії між двома контурами із струмом електромагнітна сила, яка прагне змінити координату  $l$ , що визначає взаємне положення контурів, та залежить тільки від взаємоіндукції  $M$ :

$$F_{em} = \left( \frac{\partial w_m}{\partial l} = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial l} \right) \sim [L^2][L^2][L^0] \sim [L^4]. \quad (3)$$

В. Триммер запропонував ввести параметр «вектор сил», пов'язаний із залежністю різних сил від лінійного розміру, у вигляді вектор-стовпчика

$$F = [L^F] = [L^1, L^2, L^3, L^4]^T. \quad (4)$$

Зв'язок похідних величин – прискорень, часу відпрацювання, питомі щільності потужності та потужності втрат від лінійного розміру відображено в табл 1.

Таблиця 1 – «Вектор сил» і похідних величин: прискорення –  $a$ ; час –  $t$ ; щільність потужності –  $p/v_0$ ; щільність потужності втрат  $p_{втрат} / v$ .

| $F$ | $a$ | $t$ | $p/v_0$ | $p_{втрат} / v$ |
|-----|-----|-----|---------|-----------------|
| 1   | -2  | 1,5 | -2,5    | -               |
| 2   | -1  | 1,0 | -1,0    | -2              |
| 3   | 0   | 0,5 | 0,5     | -1              |
| 4   | 1   | 0   | 2,0     | 0               |

Електромеханічні аналогії дозволяють описати поведінку механічних елементів узагальненої маси ( $m, I$ ), пружності  $K_{мех}$  і механічних втрат  $R_{мех}$  під впливом сил та електричних компонентів  $L, C$  і  $R$  під впливом напруги  $U$  або струму  $I = \dot{q}^e$ , також показати відповідність між механічними і електричними величинами в системах «сила напруга» і «сила-струм».

Більш складні електромеханічні та інші аналогії мають місце у фізичних середовищах, властивості яких залежать від механічних, електричних, магнітних і термодинамічних величин.

Насамперед це стосується діелектриків, особливо кристалічних, які мають структуру у вигляді системи електричних заряджених елементарних комірок, оптичних кристалів і феромагнітних матеріалів.

Для того, щоб процеси залишилися незмінними, відповідні характеристичні числа мають залишитися незмінними. Деякі характеристичні числа залежать від основної одиниці «довжини», а інші незалежні. Характеристичні числа, залежні від масштабу довжини, надають інформацію для отримання загального висловлювання про співвідношення фізичних процесів у мікродіапазоні. Нижче подано відомі характеристичні числа, які особливо важливі для застосування в мікросистемах.

**Число Коші** (пружні коливання)  $c_a = \frac{\rho}{E} \omega^2 l^2$  визначає співвідношення інерційних сил і сил пружності у твердому тілі. Це співвідношення показує, що частота коливань обернено пропорційна довжині. З цього випливає, що механічним мікросистемам властиві дуже високі частоти власного резонансу і поліпшені динамічні характеристики та малі часові реакції.

**Число Вебера** (інерція, поверхневий натяг)  $w_e = \frac{\rho v^2 l}{\sigma_s}$  визначено, як співвідношення інерційних сил і поверхневого натягу. Тут  $v$  – це швидкість,  $\rho$  – щільність і  $\sigma_s$  – поверхневий натяг. Для великих чисел Вебера інерційні сили відіграють головну роль, у той час як для малих чисел Вебера значущі сили поверхневого натягу.

У розрахунках МЕМС компонентів важливим є забезпечення теплового режиму. **Число Фур'є**  $F_0$  вказує на співвідношення між накопиченою і переданою тепловою енергією. Перехідні процеси під час перенесення тепла подібні, якщо числа Фур'є однакові.

$$F_0 = \frac{at}{l^2} = \frac{\lambda t}{c_p \rho l^2}, \quad (5)$$

де  $c_p \rho$  – теплова енергія, що накопичена одиницею об'єма;  $\lambda$  – коефіцієнт температуропровідності.

**Число Фруда** (механіка, конвекція, механіка рідини) – безрозмірна величина  $F_r = \frac{v^2}{gl}$  має важливе значення для всіх динамічних переміщень у гравітаційному полі. Воно характеризує співвідношення між інерційними силами і силами гравітації (вага) є залежною від швидкості  $v$ , прискорення через сили тяжіння  $g$  і масштабу довжини  $l$ .

За великих значень числа Фруда ефектом сили тяжіння нехтують, у той час як за малих значень числа Фруда можна нехтувати силами інерції.

**Число Рейнольдса** (механіка рідини)  $R_e = \frac{vl}{\nu}$  – відоме і найбільш часто вживається ( $v$  – середня швидкість текучого середовища,  $l$  – визначальний лінійний розмір (дорівнює діаметру із круглим поперечним перерізом),  $\nu$  – кінетична в'язкість плинного середовища:  $\nu = \eta / \rho$ ,  $\eta$  – динамічна в'язкість текучого середовища,  $\rho$  – щільність текучого середовища).

Перехід між сухим тертям і тертям з мастилом характеризується формулою **Зоммерфельда**:

$$S_0 = p\Psi^2 / \omega\eta, \quad (6)$$

де  $p = F/(ld)$  – тиск навантаження;  $\Psi = (D-d)/d$  – відносний радіальний проміжок;  $D$  – зовнішній діаметр підшипника;  $d$  – внутрішній діаметр підшипника;  $\eta$  – в'язкість мастила;  $\omega$  – швидкість;  $l$  – довжина підшипника.

У формулі Зоммерфельда присутнє сухе тертя, яке є домінуючим у точному машинобудуванні та в мікромеханічних пристроях.

Конвергенція в конкретному МЕМС-компоненті різних особливостей властивостей (феноменів) матеріалів, поєднання сил різної фізичної природи, можливостей управління взаємодією частин, що є складовими мікроструктур компонента, створює безліч варіантів отримання компонентів МЕМС з унікальними електрофізичними параметрами.

У МЕМС діють сили гравітації (вага), інерції, пружності, тертя (дисипативні), поверхневі, електростатичні, магнітні, електромагнітні, хімічні й електрохімічні та кардинально визначають їх властивості.

Управління здійснюється аеро-, гідромеханічними, електромагнітними, акустичними, оптичними, тепловими, хімічними, біохімічними впливами.

Таким чином, можна вважати, що конвергенція різних фізичних величин з урахуванням зменшення лінійних розмірів компонентів і аналогій є основним принципом створення компонентів МЕМС.

Зменшення розмірів компонентів забезпечує підвищення їх швидкодії (і власної резонансної частоти). Підвищується чутливість датчиків. Електростатичні двигуни стають ефективнішими електромагнітних, мікробалки – ефективними датчика-

ми температури та перспективними чутливими елементами для інфрачервоного бачення. Знижується енергоспоживання МЕМС-пристроїв.

МЕМС-пристрої є мікромініатюрними інформаційно-керуючими системами, придатними для виробничих технологій, здатними задовольнити різноманітні вимоги (інтелектуальності, цифрового подання інформації, багатофункціональності, високої чутливості й точності, низької вартості в умовах масового виробництва та використання групових технологій).

Об'єднання електричних і механічних пристроїв на низькому рівні інтеграції так само дозволяє істотно поліпшити надійність та електрофізичні властивості пристроїв.

Дані, наведені в розділі 2, опубліковано в роботах [21 – 25, 45, 36 – 39, 46].

**У третьому розділі** розроблені математичні моделі мікроелектромеханічних компонентів: мікробалок, ємнісних актюаторів та резонаторів, п'єзоперетворювачів.

Велика кількість рухомих елементів МЕМС: керовані контактні пари, пружні підвіси, клапани, кантилевери, міліпеде, резонансні системи, акселерометри та гіроскопи – мають деталі у формі консольної балки, що підлягають дії згинаючих узагальнених сил. З огляду на розміри елементів МЕМС (від 1 мкм до 1 мм), балки є найпростішими пружинами або ділянками більш складних композицій з послідовно (і) або паралельно з'єднаних елементів балок. Під час згинання балка переходить у складний напружений стан, обумовлений системою діючих на неї сил, конструкцією та властивостями матеріалу. До особливостей розрахунку додається необхідність врахування масштабного фактора, що змінює співвідношення впливу гравітаційних, інерційних і сил пружності у твердому тілі, інерції та сил поверхневого натягу в рідинному середовищі тощо. Для розрахунку деформації в матеріалах балок за об'ємного напруженого стану необхідний облік дії нормальних і дотичних напружень, і в загальному випадку тензори напруг і деформацій визначаються для анізотропних матеріалів 81 компонентою ( $3^4$  – тензором четвертого рангу). З урахуванням просторової симетрії пружності матеріалів з кубічною кристалічною структурою, яка притаманна кремнію, число незалежних змінних зменшується до 36, а ізотропних матеріалів – до 3.

У векторно-матричній формі тензор деформації та напруження визначається рівняннями:

$$\varepsilon_i = s_{ij}\sigma_{ij}; \quad \sigma_{ij} = c_{ij}\varepsilon_{ij}, \quad (7)$$

де  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  – тензори другого рангу деформацій і напружень, отримувані згортанням тензорів четвертого порядку  $\varepsilon_{ijkl}$ ,  $\sigma_{ijkl}$  за правилами підсумовування Ейнштейна;

$c_{ij}$  – коефіцієнти жорсткості;

$s_{ij}$  – коефіцієнти податливості матеріалу в напрямку дії відповідного напруження;

$\varepsilon_i$  – відносні деформації (розтягування – стиску) уздовж осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;

$\gamma_{ij}$  – кути зсуву в площинах, позначених нижніми індексами.

Динаміка руху балки в загальному випадку (рис. 2) визначається диференціальним рівнянням другого порядку у вигляді:  $[m]\{\ddot{\xi}\} + [R]\{\dot{\xi}\} + [K]\{\xi\} = \{F\}$ , де  $\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$  – переміщення, швидкості та прискорення обраних вузлових точок балки відповідно;  $[m]$  – система матриць маси структурної ділянки балки, кг;  $[R]$  – системи матриць демпфування, втрат, Нс/м;  $[K]$  – системи матриць жорсткості ділянки балки, Н/м;  $\{q\} = \{x_i, z_i, \theta_i \dots x_N, z_N, \theta_N\}$  – розташування вузлів  $N$  трикомпонентних векторних стовпців;  $\{F\}$  – вектор узагальнених сил ( $M, Q, q$ ).

Для розв'язку рівняння з урахуванням граничних умов для обох кінців ділянки балки маємо 4 рівняння з 4 невідомими.

Виражаючи функції  $v(x)$  та  $\theta(x)$  і групуємо подібні члени, отримуємо:

$$v(x) = H_1(x)v_1 + H_2(x)\theta_1 + H_3(x)v_2 + H_4(x)\theta_2$$

У цій рівності  $H_i(x)$  – кубічні функції.

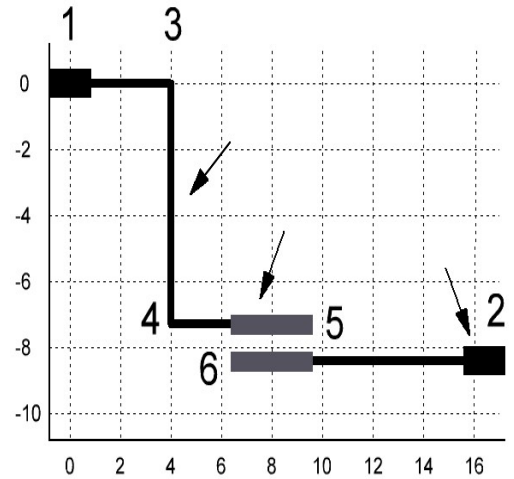
У рівнянні руху балки жорсткість  $K$  і компоненти тензора жорсткості  $K_{ij}$  характеризують амплітуду відхилення тіла або окремих частин, точок тіла від положення статичної рівноваги під дією одиничної сили та мають розмірність  $[H/M]$ . Зворотні жорсткості величини  $C$  називаються пружністю та мають розмірність  $[M/H]$ .

У матриці податливості  $s_{ij}$  мають розмірності  $[M^2/H]$ , а модулі пружності  $c_{ij} - [H/M^2]$ . Таким чином, за встановленою в теорії опору матеріалів і теорії пружності термінології модулі пружності  $c_{ij}$  відповідають жорсткості  $K$  одиничної довжини, а податливості  $s_{ij}$  – пружностям  $C = K^{-1}$ . Тоді:  $K_{ij} = c_{ij} \cdot l$ ;  $c_{ij} = \frac{S_{ij}}{l}$ .

Коефіцієнт відносної жорсткості балки в процесі деформації розтягування – стиску  $K_{розт}$  визначається як відношення жорсткості  $ES$  до довжини  $l$ , тобто,  $K_{розт} = \frac{ES}{l}$ ,  $[H/M]$ . Тут  $S$  – площа поперечного перерізу балки.

Під час деформацій згинання доцільно ввести поняття «еквівалентної жорсткості» ділянки балки довжиною  $l$ , пов'язане із прогином кінця цієї ділянки, яке необхідне для «зшивки» складної сполученої балки. Прогин кінця балки під дією зосередженої сили обернено пропорційний до кубу довжини та пропорційний жорсткості перерізу при згинанні  $EI_y$ . Тоді:  $K_{зг} = \frac{EI_y}{l^3}$ ,  $[H/M]$ .

Тоді матриця жорсткості згину балки буде представлена у вигляді матриці  $6 \times 6$ :



1, 2 – анкер; 3, 4, 7 – вузли;  
5, 6 – вільні кінці балок.

Рисунок 2 – Складна балка

$$K = \frac{E}{l^3} \begin{bmatrix} Sl^2 & 0 & 0 & -Sl^2 & 0 & 0 \\ 0 & 12I_y & 12EI_y & 0 & -12I_y & 6I_y l \\ 0 & 6I_y l & 6EI_y l & 0 & -6I_y l & 2I_y l \\ -ESl^2 & 0 & 0 & Sl^2 & 0 & 0 \\ 0 & -12I_y & -12EI_y & 0 & 12I_y & -6I_y l \\ 0 & 6I_y l & 6EI_y l & 0 & -6I_y l & 4I_y l \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Матриці  $R$  та  $m$  розраховуються прирівнюванням внутрішніх і зовнішніх робіт на віртуальних переміщеннях.

Слід зазначити, що балка як пружний елемент має інваріантну величину, яка пов'язує масу  $m$ , чутливість  $S$  і частоту власного резонансу  $f_0$ :  $msf_0^2 = const$ .

В межах цього співвідношення можна варіювати розміри, чутливість та швидкодію елемента.

Значну частину МЕМС актюаторів складають *ємнісні мікромеханічні компоненти* у вигляді простого або диференціального конденсатора, який можна представити «аналоговим функціональним блоком», що може бути змодельований за допомогою джерел напруги ( $V$ ) або заряду ( $Q$ ), у вигляді залежності струму від напруги та ємності:

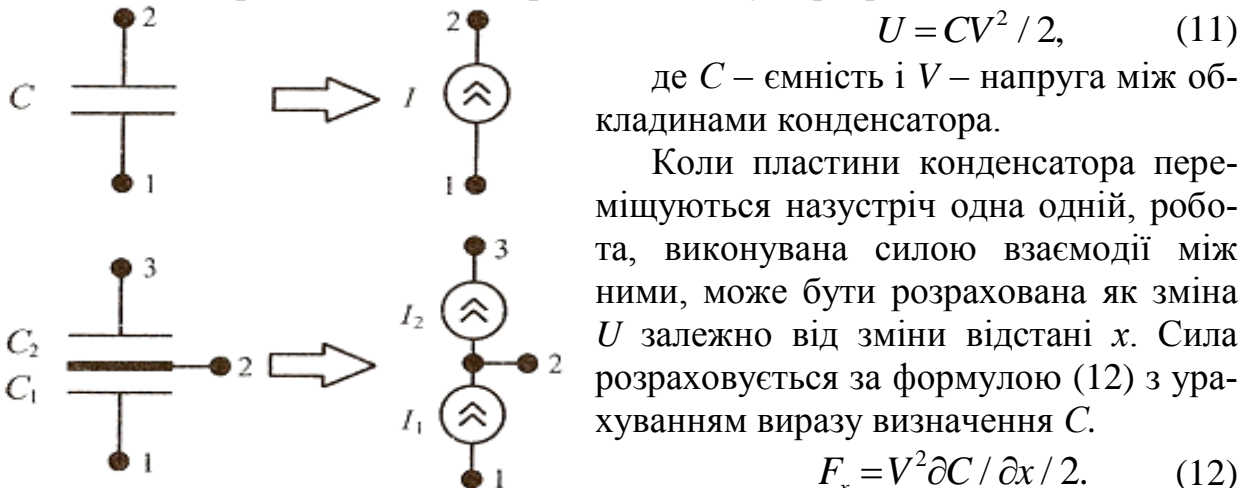
$$I = -\frac{dQ}{dt} = -(V \cdot \frac{dC}{dt} + C \cdot \frac{dV}{dt}). \quad (9)$$

Аналогічно схема диференціального мікромеханічного конденсатора подається триполюсником із двома джерелами струму. При цьому функціональна залежність джерел визначається виразами:

$$I_1 = -\frac{dQ_1}{dt} = -(V_{21} \cdot \frac{dC_1}{dt} + C_1 \cdot \frac{dV_{21}}{dt}); \quad I_2 = -\frac{dQ_2}{dt} = -(V_{32} \cdot \frac{dC_2}{dt} + C_2 \cdot \frac{dV_{32}}{dt}). \quad (10)$$

Схеми заміщення подано на рис. 3.

Для конденсатора накопичена енергія  $U$  може бути розрахована:



де  $C$  – ємність і  $V$  – напруга між обкладинами конденсатора.

Коли пластини конденсатора переміщуються назустріч одна одній, робота, виконувана силою взаємодії між ними, може бути розрахована як зміна  $U$  залежно від зміни відстані  $x$ . Сила розраховується за формулою (12) з урахуванням виразу визначення  $C$ .

$$F_x = V^2 \partial C / \partial x / 2. \quad (12)$$

Існує декілька варіантів реалізації електростатичних актюаторів на основі плоскопаралельних конденсаторів.

1, 2, 3 – номери виводів

Рисунок 3 – Схема заміщення одиничного та диференціального конденсаторів ЕМС джерелами струму



З погляду опису руху рухомого електрода можна розділити на два типи.

До першого типу належать конструкції з лінійним переміщенням рухомого електрода між закріпленими електродами.

Модель забезпечує можливість спільного моделювання механічного руху рухомого електрода ЕМС і процесів в електричній схемі (рис. 4).

Розглянемо модель для другого конструктивного типу ємнісного акселерометра (рис. 5). У даній конструкції рухомий маятник може виконувати обертальне (кутове) переміщення відносно осі, що проходить через центри торсіонів пружного підвісу. При цьому основними параметрами замість зсуву  $x$  і маси  $m$  будуть кут повороту  $\alpha$  та момент інерції  $I$  маятника.

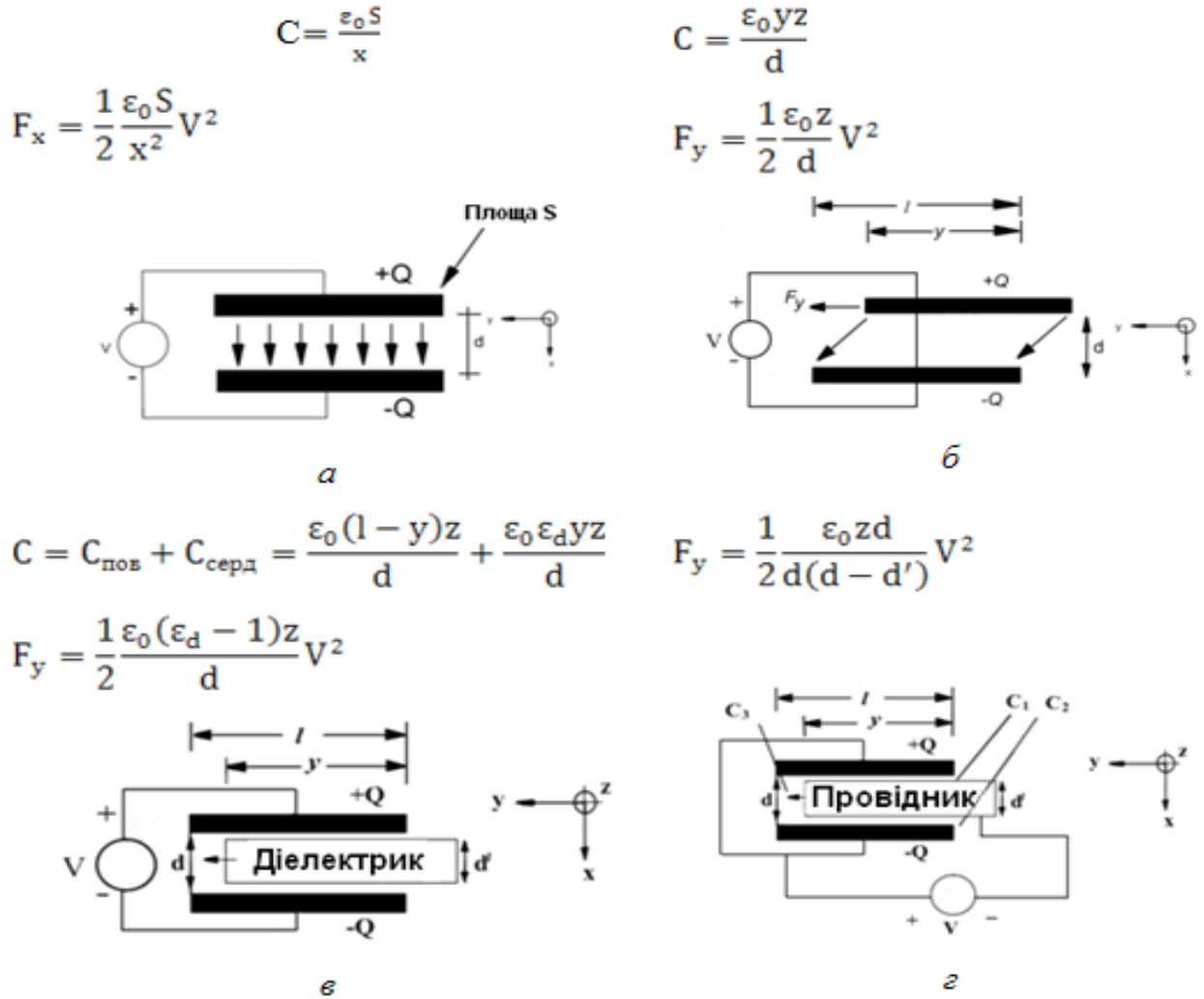


Рисунок 4 – Варіанти зміни ємності конденсаторів:

- a* – перпендикулярний рух обкладинок; *б* – зсув за довжиною обкладин;
- в* – введення діелектрика в проміжок; *г* – введення в проміжок провідника

Момент сил пружності внаслідок крутіння торсіонів:  $M_{np} = \frac{\alpha G I_p}{l}$  де  $G$  – модуль

пружності під час крутіння;  $I_p$  – полярний момент поперечного перерізу торсіона;  $G I_p$  – жорсткість або пружність при крутінні,  $l$  – довжина частини торсіона, що закручується.

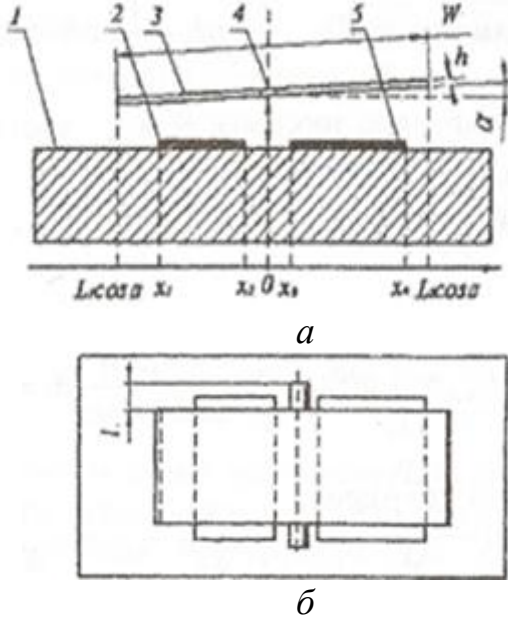
$$M_{EC} = M_{EC1} - M_{EC2} \quad (13)$$

$$M(a) \equiv I \frac{d^2 \alpha}{dt^2}. \quad (14)$$

Рівняння кутових коливань маятника матиме такий вигляд:

$$M(a) - \lambda \frac{d\alpha}{dt} - \frac{GI_{\text{торс}} \alpha}{l} + M_{\text{ЕС}} = 0, \quad (15)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт сили гальмування (демпфування);  $I$  – осьовий момент інерції маятника відносно осі торсіона.



- 1 – кремнієвий маятник (рухомий електрод); 2 – торсіони підвісу;  
 3 – перший керуючий електрод (напруга  $V_{12}$  відносно маятника);  
 4 – другий керуючий електрод (напруга  $V_{32}$  відносно маятника);  
 5 – підкладка

Рисунок 5 – Ескіз конструкції маятникового акселерометра

Для збереження енергії на вихідному кінці використовується заряд конденсатора значної ємності через схему випрямлення (рис. 6).

Максимальна щільність енергії для п'єзокераміки ЦТС (PZT) досягає при холостому ході  $1,2 \text{ Вт/см}^3$ , але протягом дуже короткого проміжку часу (до розряду через іскру або  $C_0$  (пробою діелектрика)).

Підключення паралельно  $C_0$  конденсатора  $C_1$  знижує напругу, що генерується зарядом  $Q$ :  $Q = C_0 U_0 = (C_0 + C_1) U$ , але знижується також кількість енергії, запасеної в конденсаторі  $C$ :

$$P = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}. \quad (16)$$

#### Розрахунок п'єзоперетворювачів.

Одним з альтернативних видів джерел живлення є п'єзоперетворювачі.

Відомо, що темпи мініатюризації джерел живлення в електронній апаратурі майже у 50 разів відстають від інших компонентів.

На сучасному етапі це гальмує зменшення габаритно-масових характеристик та подовження часу автономної дії мікроскопів різного призначення.

Перспективними є альтернативні джерела отримання електричної енергії: елементи сонячних батарей, п'єзоелектричні перетворювачі, паливні, електрохімічні елементи тощо.

В роботі наведена оцінка ефективності п'єзоперетворювачів механічної дії в електричну.

Особливістю п'єзоперетворювачів механічної енергії в електричну є високі напруги і малі вихідні енергії ( $U \geq 5 \text{ кВ}$ ,  $I \approx 10 \text{ мкА}$ , за довжини ПЕ  $l = 10 - 15 \text{ мм}$ ).

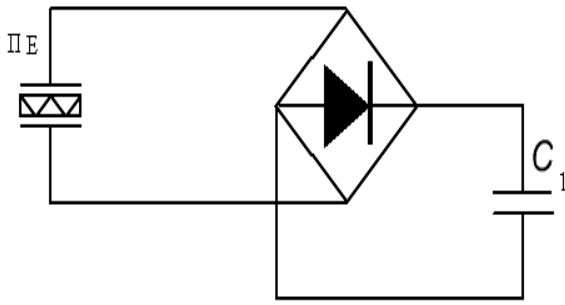


Рисунок 6 – Перетворювач з паралельним конденсатором

ження ПЕ, встановлених у колесо автомобіля з певним кутовим кроком. Використовуватися можуть, або ПЕ, розміщені між двома кільцями з конструкційної кераміки, або плівкові ПЕ пакети зі смужками різної довжини (які матимуть різну ефективність за різної швидкості руху автомобіля). Необхідна провідникова електропроводка ПЕ забезпечується багатопровою розводкою кілець з конструкційної кераміки (виготовляється за технологією «сирої кераміки»).

Дані, наведені в розділі 3, опубліковано у роботах [13, 21, 24, 26, 31, 32, 46].

**У четвертому розділі** розроблена теорія прийняття рішень для вибору стратегії моніторингу ТП у виробництві МЕМС за критерієм максимізації виходу придатних виробів, що використовує рекурентні співвідношення оптимальних рішень у стохастичних системах і байєсівських перерахунків для ідентифікації матриці перехідних імовірностей.

Дискретний ТП (або його частина, операція) подається у вигляді кінцевомірної стохастичної системи, яка визначається набором об'єктів  $\{E, Y, Q, \Pi, R\}$ , де  $E$  – множина станів (його елементи  $x_i, z_i$ );  $Y$  – множина керувань ( $Y = \{y_k\}$ );  $Q$  – множина перехідних імовірностей, що описують переходи зі стану  $x_i$  в  $z_i$  за фіксованих керувань  $y_k$ ;  $\Pi$  – множина правил вибору рішень з множини  $Y$ ;  $R$  – множина наслідків вибору управлінь (витрати, штрафи, збитки, доходи, виграші тощо).

Стратегія управління дискретними ТП за невідомої функції перехідних імовірностей являє собою послідовність управлінь  $f_1, f_2, \dots, f_m, \pi, \pi, \dots$ , під впливом яких система в момент застосування управління зі стану  $x_i$  переходить до стану  $z_i$  з імовірностями  $q_{xz}$ .

Переходи, що спостерігаються, використовуються для уточнення перехідних імовірностей, а також для розрахунку виграшу (доходу) від використання управління  $y_k \in U$  на  $i$ -му кроці управління.

$x$ -а компонента вектора безпосередніх виграшів на множині станів  $\{0, \dots, n\}$  матиме вигляд:

$$w_x(x, y_k) = \sum_{z=0}^n w(x, y_k, z) q(x, z | y_k) - C_0 = \sum_{z=0}^n (z - x) q(x, z | y_k) - C_0. \quad (17)$$

Тобто вона являє собою математичне очікування відхилення системи від вихідного стану під час вибору управління  $y_k$ .

Підвищити ефективність перетворення можливо використанням ПЕ у вигляді пакету металізованих п'єзоелектричних дисків, шайб з  $h \leq 0,5 - 1$  мм.

Диски в пакеті з'єднуються паралельно. Ємність перетворювача збільшується, напруга  $U$  зменшується, струм зростає. Вплив паралельного конденсатора зменшується.

У роботі (патент України № 108314). запропоновано рішення циклічного наванта-

Функція доходу на  $m$  кроках  $v^{(m)}(x, f^{(m)})$ , яка є умовним відносно  $\sigma$ -алгебри  $F_i$  математичним очікуванням виграшу,  $r^{(m)}(x, \pi)$  – заключним виграшем на часовому відрізку  $m+1, \dots, \infty$ , коли перехідні ймовірності залишаються незмінними, а стратегія  $\pi$ -стаціонарною і сумарний дохід  $g_m(x, f^{(m)}; \pi)$ , що розраховується на необмеженому інтервалі спостережень, визначені у вигляді векторних рівностей (18 – 20) відповідно:

$$\mathcal{G}^{(m)}(x, f^{(m)}) = \sum_{i=0}^m w_{x_i}(x_i, f_i) - mC_i, \quad (18)$$

$$r^{(m)}(x, \pi) = \lim_{L \rightarrow \infty} \left\{ M_x \sum_{l=m+1}^L w(x_l, \pi, z_l) - M_z \sum_{l=m+1}^{\infty} w(z_l, \pi, z_l) \right\} = u^{(m)}(x, \pi) - u^{(m)}(z, \pi); \quad (19)$$

$$g_m(x, f^{(m)}; \pi) = \mathcal{G}^{(m)}(x, f^{(m)}) + r_m(x, \pi). \quad (20)$$

Вектор  $r^m(x, \pi)$  – ймовірнісний вектор, усі координати якого однакові, він не залежить від вихідного стану системи  $x_0$  і є власним вектором матриці  $Q = \|q_{xz}\|$ , завжди кінцевий і сходиться зі швидкістю геометричної прогресії.

Згідно з (18, 19) виграш зменшується на суму витрат зі зростанням  $m$  і функція сумарного виграшу зростає лише, поки плата за обчислення апостеріорних параметрів і доходів не перевищує математичного очікування безпосереднього виграшу на наступному етапі. Тому необхідно визначити момент зупинки  $m < \infty$ , що максимізує отримуваний виграш, тобто визначити випадкову величину  $t=m$ , яка повністю визначається значеннями  $f_1, f_2 \dots f_m$  і не залежить від майбутніх значень  $f_{m+1} \dots$ .

Математичне очікування  $M \mathcal{G}^{(m)}$  має сенс середнього виграшу для правила зупинки  $m$ . Максимальний виграш (ціна  $S(x)$ ) дорівнює:  $S(x) = \sum_m M_x g_m$ .

Важливим положенням для визначення оптимального моменту зупинки є можливість прогнозування виграшу  $g_{m+1}(x, f^{(m+1)}; \pi)$  після виконання серії  $m$  експериментів (без виконання  $(m+1)$ -го).

З огляду на кінцеве число станів системи, можна обчислити, не роблячи нового експерименту, апостеріорну щільність розподілу параметра  $\lambda$  для кожного  $z = z_{m+1} \in E$ , тобто функцію:

$$\varphi_{m+1}(\lambda, z_m, e_{m-1}(z_{m-1}, y)) = \varphi_{m+1}(\lambda | z_m, y) = \frac{q(z_m, z_{m+1} | \lambda, y) \cdot \varphi_m(\lambda | y)}{\int_{\Lambda} q(z_m, z_{m+1} | \lambda, y) \cdot \varphi_m(\lambda | y) d\nu(\lambda)}. \quad (21)$$

Параметр  $\lambda$  є байєсівською оцінкою, тобто точкою прийняття рішення  $d$ , яке доставляє мінімум ризику  $p[\varphi(\lambda), d]$ , і з оцінкою функції втрат квадратичною функцією має значення  $d = M(\lambda)$ .

Оптимізаційна процедура полягає в обчисленні відносного виграшу  $r(x, \pi)$  і подальшому поліпшенні стратегії порівняно з початковою стратегією  $\pi$  після проведення першого та наступних спостережень.

Для отримання рекурентних залежностей загального виграшу, порівняння різних стратегій та пошуку оптимальної зупинки за допомогою методу зворотної індукції визначено ряд операторів:  $T(f_i), F(f_i), F_{C_0}(f_i), U_m, U_m^{*C_0}$ .

$$T(f_i)w(x) \stackrel{def}{=} \sum_{z=0}^n w(x, f_i, z) q(x, z | f_i) = M_x^f i w(x, f_i), \quad (22)$$

де  $T(f_i)$  – це вектор вигоди, компонентами якого є математичне очікування вигоди для  $x \in E$ , він визначається властивістю управління  $f_i$ .  $F(f_i)$  є достатньою статистикою виграшу, а послідовність лінійних операторів  $T(f_i)$  утворює напівгрупу стискувальних операторів;  $u(x)$  обмежена функція виграшів на  $E$ .

$$F(f_i)u(x) \stackrel{def}{=} w(x, f_i) + T(f_i)u(x) \text{ для } i = 0, 1, 2, \dots \quad (23)$$

$F(f_i)u(x)$  дозволяє розраховувати виграш для стратегії  $f_i \pi$ , тобто вставляє керування  $f_i$  перед стратегією  $\pi = (\pi_0, \pi_1 \dots \pi_m)$ . Тоді:

$$F(f)g^{(m)}(x, \pi) = g^{(m+1)}(x, f\pi). \quad (24)$$

Оператор  $F(f)$  реалізує крок назад у методі «зворотної індукції» в ході розрахунку виграшу.

$$F_{C_0}(f)g^{(m)}(x, \pi) \stackrel{def}{=} F(f)g^{(m)}(x, \pi) - (m+1)C_0 = g^{(m+1)}(x, f\pi) - (m+1)C_0 \quad (25)$$

Вважаючи відомими в певний момент часу  $t$ ) 0 значення  $x_t = t$ ,  $\lambda_t = \lambda$ ,  $f_t = f$ , вважатимемо його вихідним, а  $(x, \lambda, f)$  – початковими умовами. Введемо змінну  $l$ , що приймає значення  $0, 1 \dots t$  та проведитимемо відлік часу в зворотньому порядку, починаючи з  $t$ , тобто  $l = t - t'$ , де  $t$  і  $t'$  – фіксовані моменти часу та  $t' < t$ .

Знайдемо умовні математичні очікування  $M\{u(x_t) | x, \lambda, y\}$  після спостереження  $x_t, \lambda_t, f_t$ , тобто, вважаючи їх апостеріорними математичними очікуваннями, а значення  $\lambda$  і управління фіксованими для всіх в міру, що задається перехідною ймовірністю  $Q(\cdot | x, \lambda, y)$  при  $y = \pi_{t-l}$ ;  $x \in E$  і  $\lambda_{t-l} = \delta(x_0^{t-l}, \pi_0^{t-l})$ :  $Q(y, \lambda)u(x) = \sum_{z=0}^n Q(z | x, \lambda, y)u(z)$ , тоді для  $l = 0, 1 \dots t$ ,  $M\{u(x_t) | x, \lambda, y\} = Q^l(y, \lambda)u(x)$ , а для  $l = 0$ ,  $M\{u(x_0) | x, \lambda, y\} = u(x)$ .

В адаптивному процесі значення параметра  $\lambda_t$ ,  $t = 1, 2, \dots$  обираються за допомогою методу ідентифікації  $\delta$ , а керування  $y_k^t$ ,  $t = 0, 1, 2, \dots$  – за допомогою стратегії керування  $\pi(\delta) = \{\pi_0^\delta, \pi_1^\delta, \dots\}$ .

Тоді апостеріорне математичне очікування:

$$M^{\pi(\delta)}\{u(x_t) | x_0\} = \prod_{j=0}^{t-1} Q(\pi_{t-j}, \lambda_t)u(x_t), \quad l = 1, \dots, t \quad (26)$$

Це математичне очікування залежить від усієї траєкторії, що спостерігається  $x_0^t = (x_t, x_{t-1}, \dots, x_0)$ . Проте, залежність від спостереження  $x_t$  виражається в явному вигляді, а від попередніх спостережень  $x_0^{t-1} = (x_{t-1}, \dots, x_0)$  неявно, через залежність  $Q$  від оцінок, які обирають за допомогою даного методу ідентифікації  $\delta$ .

Тоді залежність апостеріорного математичного очікування від  $x_t$ :

$$M^{\pi(\delta(x_0^t))} \{u(x_l) | x_l\} = \prod_{j=1}^l Q(\pi_{t-j}, \lambda_{t-j}) u(x_t), \quad l = 1, 2, \dots, t. \quad (27)$$

Аналогічний вираз для сумарного доходу  $g_m$ , що визначений рекурентним способом через заключний виграш  $r(x, \pi)$  за допомогою  $[F_{C_0}(f_m) \cdots F_{C_0}(f_1)]$ :

$$g_m(x, f^{(m)}\pi) = F_{C_0}(f_m) F_{C_0}(f_{m-1}) \cdots F_{C_0}(f_1) g_0(x, \pi) = F_{C_0}(f_m) F_{C_0}(f_{m-1}) \cdots F_{C_0}(f_1) r(x, \pi). \quad (28)$$

Оптимальність стратегії після виконання кожного чергового експерименту забезпечує застосування оператора:

$$U_{co}(f_m): U_{co}(f_m) \stackrel{def}{=} \sup F_{C_0}(\pi_m), \quad (29)$$

де  $\pi_m$  – функція рішення за наявності інформації про процес після виконання серії  $m$  експериментів.

Розглянуті оператори  $T$ ,  $F$ ,  $F_{C_0}$ ,  $U_{co}$  – монотонні, субрегулярні, функції  $g_m(x)$ ,  $u(x)$ ,  $u^{(m)}(x, \pi)$  ексцесивні щодо операторів  $F_{C_0}$ ,  $U_{co}$ . Функція  $u(x, \pi)$  є ексцесивною мажорантою  $g(x, \pi)$ , а сама функція  $g(x, \pi)$  являє собою максимальний відносний виграш, який може бути отриманий після виконання серії  $m$  експериментів рівно, а отже стратегія  $f^{(m)}\pi$  оптимальна на перших  $m$  кроках адаптивного керування.

У точці зупинки  $t' = 0 (t = m; t' = t - l; l = 0, 1, \dots, m - 1)$ . Приймає:  $v_0(x, f^{(0)}) \equiv 0$ ,  $\lim_{m \rightarrow \infty} r^m(x, \pi) \rightarrow 0$ ,  $S(x) = \sup_m M_x g_m$ .

Визначаємо апостеріорне математичне очікування для оператора усереднення  $Q(y, \lambda)$ , що задається однією ймовірністю  $Q(x, \lambda, y)$ ,  $t = m$  – момент зупинки.

Стратегії в просторі  $V$  станів  $x \in E$  представляються функціями потенціалів точки  $x$  відносно  $z$ , а доходи у вигляді векторів  $r(x) = V(x) - V(z)$  з нормою  $\|\Delta z\| = \Delta z$ . Кожній стратегії  $\pi^{(k)}$  відповідають вектори потенціалів  $r(\pi^{(k)}) \in V_0$ . Клас вирішальних функцій  $\Pi$ , яким відповідають оператори стиснення  $Q(\pi)$  – оператори усереднення за деякою ймовірнісною мірою.

Щоб оператори  $F(\pi)$  і  $U$  не виводили вектори з області  $V_0$  фіксуємо у просторі, станів деяку точку  $z \in E$  та вважаємо:  $F^* u(x) = Fu(x) - Fu(z)$ ,  $U^* u(x) = Uu(x) - Uu(z)$ ,  $x \in E$ , які відображають  $V_\Delta \rightarrow V_\Delta$ , та є такими, що стискають  $V_\Delta$ .

Для визначення  $S$ -оптимального марківського моменту вводиться оператор  $G$ :

$$Gg_0(x) = \max \{g_0(x), U_0^{*C} g_0(x)\}. \quad (30)$$

До моменту  $\tau: G^{m+1} g_0(x) \geq G^m g_0(x)$ , а момент  $\tau = m: G^{m+1} g_0(x) = G^m g_0(x)$ .

Для побудови оптимізаційної процедури використовуються оператори  $R(f)$  та  $\Gamma(f, \pi)$ :

$$R(f)u(x) \stackrel{def}{=} F_{C_0}(f)u(x) - u(x) = (F_{C_0}(f) - I)u(x). \quad (31)$$

Оператор  $R(f)$  – субрегулярний, тобто:

$$R(f)u(x) \geq 0. \quad (32)$$

$$\Gamma(f, \pi)u(x) \stackrel{def}{=} R(f)u(x) - R(\pi)u(x) = F_{C_0}(f)u(x) - F_{C_0}(\pi)u(x). \quad (33)$$

Використавши рекурентні співвідношення:

$$r(x, f\pi) = F_{C_0}(f)r(x, \pi) = w(x, f) + T(f)r(x, \pi),$$

$$\begin{aligned}
r(x, \pi\pi) &= Fc_0(\pi)r(x, \pi) = w(x, \pi) + T(\pi)r(x, \pi), \\
\Gamma(f, \pi)r(x, \pi) &= r(x, f\pi) - r(x, \pi\pi), \\
r(x, f\pi) &= r(x, \pi\pi) + \Gamma(f, \pi)r(x, \pi).
\end{aligned} \tag{34}$$

Порівняння відносних вигравів, які отримані в ході використання двох різних стратегій  $f, \pi$ , тотожно не рівних один одному можливих з використанням однакових констант під час обчислення  $r(x, \pi)$  і  $r(x, f)$ .

Обравши цією постійною значення  $u(z, \pi) \equiv C$ , отримаємо:

$$r^\pi(x, f) = u(x, f) - u(z, \pi). \tag{35}$$

Верхній індекс  $\pi$  вказує на залежність величини відносного виграшу від вибору постійної  $C$ .

Нехай  $f$  та  $\pi$  – дві стаціонарні стратегії. Щоб  $r^\pi(x, f) \geq r(x, \pi)$ , необхідно та достатньо виконати умови:  $R(f)r(x, \pi) \geq 0$ .

Правило прийняття рішень визначено так:

$$\sigma(x) = \begin{cases} \pi(x), & \text{якщо } \Gamma^*r(x, \pi) = 0 \\ f^*(x), & \text{якщо } \Gamma^*r(x, \pi) > 0, \end{cases} \tag{36}$$

де  $\Gamma^*r(f, \pi) \stackrel{\text{def}}{=} \Gamma(f^*, \pi)r(x, \pi) = \sup_f \Gamma(f, \pi)r(x, \pi)$ .

За отриманими результатами утворюється множина:  $G_x(\pi) = \{y : \Gamma(y, \pi)r(x, \pi) > 0\}$  для  $x \in E$ .

З цієї множини вибирається управління:

$$y^* = f^*(x) \in G_x(\pi) : \Gamma(f^*\pi)r(x, \pi) = \Gamma^*r(x, \pi) = \max_{y \in G_x(\pi)} \Gamma(y, \pi)r(x, \pi), \tag{37}$$

яке є строгим поліпшенням стратегії  $\pi$ , тобто  $\sigma^{(1)} = y^* = f^*(x)$ .

Використовуючи новий вектор  $r(x, \sigma^{(1)}\pi)$ , знаходиться нове поліпшення стратегії тощо. За кінцеву кількість кроків досягається оптимальна стратегія.

У разі кінцевих множин станів і управлінь існує  $\varphi$ -оптимальна стратегія, яка є стаціонарною.

Для будь-якої нестаціонарної стратегії знайдеться стаціонарна стратегія, яка «не гірше» нестаціонарної.

Дані, наведені в розділі 4, опубліковано у роботах [1, 5, 6 – 8, 9].

**У п'ятому розділі** запропонована статистична теорія прийняття байєсівських рішень для вибору кращого варіанта з множини розглянутих альтернатив за однією з ознак – мінімальною вартістю, мінімальними технологічними втратами або іншими кількісними показниками і розроблений метод прогнозування виходу придатних компонентів МЕМС і багатозарових комутаційних структур.

У теоретико-множинному проданні процес відшукування найкращого рішення полягає в знаходженні на безлічі всіх можливих рішень  $A$  перетину розглянутої розробником підмножини рішень  $Y$ , і підмножини  $\Theta$ , що характеризується мінімальними вартостями технологічного процесу (ТП) (рис. 7).

Модель процесу дозволяє охарактеризувати область перетину  $Y \cap \Theta$  за апріорними експертними оцінками дискретних розподілів вартостей розробки шляхом «вивертання» дерев рішень.

Уточнення цих розподілів в процесі отримання конкретних вартостей на різних етапах розробки здійснюється за формулою Байєса. Для ілюстрації роботи розробленої моделі розглянемо подане у вигляді дерева рішень (рис. 8) завдання вибору найкращого варіанта ТП термообробки багат шарових структур за критерієм витрат для різних відомих методів впалення і різного обладнання для впалення.

Вершини дерева являють собою, згідно з прийнятою термінологією, операції, ребра – оператори.

Операція – рішення або множина рішень в  $n$ -вимірному просторі рішень. Оператор – множина процедур, що застосовуються до операції, щоб отримати іншу операцію, нижчого рівня, з вартістю у та ймовірністю її спостереження  $P_{ij}(y)$ .

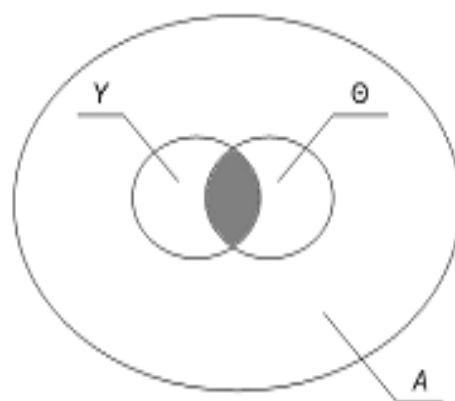


Рисунок 7 – Множина варіантів ТП

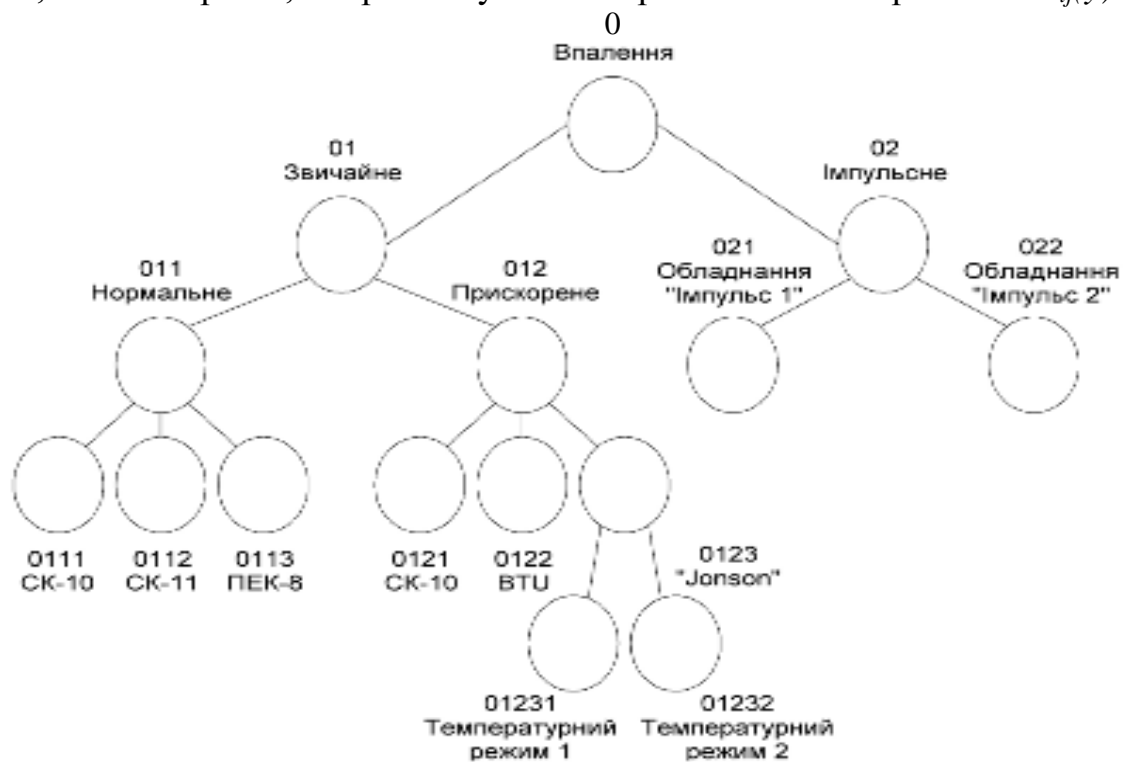


Рисунок 8 – Приклад побудови дерева рішень

В процесі порівняння варіантів ТП вирішується завдання отримання розподілу ймовірностей вартостей у вершинах нижчих рівнів за відомим розподілом ймовірностей у вершинах більш високого рівня. Для вирішення завдання необхідно формально сукупність дуг, що пов'язують кожну батьківську вершину з дочірніми вершинами, охарактеризувати оператором, множенням на який з вихідного розподілу можна отримати розподіли дочірніх вершин. Математично задача формалізації нерозв'язна, тому що дочірні вершини для операції нерозрізненні і необхідна додаткова інформація про дочірні операції, яку слід отримати у фізичному експерименті, для диференціації їх властивостей.



Вихідні дані для розрахунків подаються у вигляді експертних оцінок розподілів ймовірностей отримання дискретних значень вартості реалізації ТП –  $p(y)$ . Також у припущенні спостереження кожного з дискретних значень  $y_i$  експертам необхідно задати розподіл умовних ймовірностей отримання мінімальних вартостей  $p(\theta|y)$  (рис. 9). Ці оцінки належать до всієї підмножини варіантів ТП –  $Y$ , якій на дереві рішень відповідає вершина з індексом  $0$ .

Перетворення вихідних даних  $p(y)$  та  $p(\theta|y)$  у властивості обчислювальної мережі полягає в знаходженні розподілів  $p(\theta)$  та  $p(\theta|y)$  для універсальної операції вершини  $j=0000$  і виконується з використанням властивості симетрії спільних ймовірностей  $p(y, \theta)$  щодо елементів  $y$  і  $\theta$ , які справедливі для кожної операції  $j$  дерева.

$$p(y, \theta) = p(y)p(\theta|y) = p(\theta)p(y|\theta). \quad (38)$$

Розподіл мінімальних вартостей  $P_j'(\theta)$  можна розглядати як властивість операції  $j$ . Штрих у позначенні ймовірності позначає апріорний розподіл, отриманий експертним методом.

Якщо на операцію  $j$  впливати оператором рівня  $i - e_{ij}(y|\theta)$  (провести експеримент  $e_{ij}$ ), то отримаємо розподіл  $P_{ij}(y)$  для операції  $k$  більш низького рівня ієрархій ( $k \in j$ ), тобто властивості вершин яких визначаються властивостями включаючих операцій і можливостями операторів, що з'єднують їх. Розрахунки ведуться з формулами:  $P_{ij}(y) = \int p_i(y|\theta)p_j(\theta)d\theta$ ,  $p(\theta) = \int P_{ij}(\theta|y)dy$ ,  $p(y|\theta) = \int P_{ij}(\theta, y)/p(\theta)$ .

Прямий розрахунок  $p(y|\theta)$  за формулою (37) дає ненормоване значення умовних ймовірностей, що характеризують оператор, тому отримані апріорні розподіли мають пройти етап нормалізації. Для нормування вводиться допоміжна змінна  $m = y - \theta$ , що характеризує величину зміщення мінімальних значень вартості  $\theta$  від спостережуваного в експерименті результату, і функція  $p(m) = \sum_{\theta} p(\theta, y = m + \theta)$ .

Розподіл  $p(m)$  приймається за ймовірність  $p(y|\theta)$ .

Якщо в експерименті була отримана конкретна вартість  $y^*$  для будь-якої основної операції, відбувається уточнення апріорних оцінок за формулою Байєса, в якій для всіх операцій  $k$ , що включають дану операцію  $k^*$ , апостеріорне значення  $p''(\theta|y^*)$  визначається:

$$p''(\theta|y^*) = \frac{p'(\theta)p_i(y^*|\theta)}{\int p'(\theta)p_i(y^*|\theta)d\theta}. \quad (39)$$

Для всіх інших операцій розподіли ймовірностей залишаються без змін.

Таким чином, в процесі отриманні конкретної вартості апріорні значення в розподілі  $\theta$  уточнюються вгору за ієрархією, не зачіпаючи інших гілок дерева рішень.

|   |       | θ     |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |       | 1.700 | 1.800 | 1.900 | 2.000 | 2.100 | 2.200 | 2.300 | p(y)  |
| y | 1.800 | 0.100 | 0.600 | 0.200 | 0.100 | 0     | 0     | 0     | 0.100 |
|   | 1.900 | 0.050 | 0.150 | 0.500 | 0.200 | 0.100 | 0     | 0     | 0.100 |
|   | 2.000 | 0     | 0.100 | 0.350 | 0.500 | 0.100 | 0     | 0     | 0.300 |
|   | 2.100 | 0     | 0     | 0.100 | 0.300 | 0.200 | 0.100 | 0     | 0.350 |
|   | 2.200 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.400 | 0.300 | 0     | 0.100 |
|   | 2.300 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.500 | 0.400 | 0.300 | 0.050 |

Рисунок 9 – Вікно «помічника»  
апріорних розподілів

Для граничної точки необхідне визначення деякого еквівалентного значення, яке б визначало величину очікуваної вигоди від використання оптимальної стратегії на відсіченій гілці дерева.

Після проведення необхідних уточнень розподілів за результатами експериментів обереться серед усіх раніше отриманих операцій та, яка пов'язана з найменшими витратами –  $R$ . Чи виконувати ще один додатковий експеримент для спостереження результату  $y^{**}$ , залежить від очікуваної вигоди отримання операції з вартістю  $y^{**} < R$ . Оцінкою такої операції буде «Вигода». Вартість операції дорівнюватиме меншому з чисел  $R$  і  $y^*$ . Вартість результату визначиться з виразу:

$$u(e_{ij}, y^{**}) = c + \min(R, y^{**}), \quad (40)$$

де  $c$  – вартість експерименту.

Для обчислення очікуваних витрат у зазначеному експерименті використовуємо величину  $P_{ij}(y)$ ; тоді:

$$u^*(e_{ij}) = \int_0^{\infty} P_{ij}(y) u(e_{ij}, y^{**}) dy = c + \int_0^R y P_{ij}(y) dy + R \int_R^{\infty} P_{ij}(y) dy. \quad (41)$$

По закінченні процесу в даній точці відповідні витрати дорівнюватимуть:  $u^*(e_0) = R$ . Експеримент  $e_{ij}$  слід проводити замість закінчення процесу тільки, якщо:

$$\int_0^R (R - y) P_{ij}(y) dy > c. \quad (42)$$

У процесі дослідження розрахунки проведені в середовищі Matlab.

Процес вибору найкращого варіанта розробки за допомогою даного програмного продукту простий і може контролюватися технологом на кожному етапі пошуку. На рис 10 показана зміна розподілів у процесі роботи даної програми.

Таким чином, запропонований метод дозволяє обрати кращий з розглянутих варіантів на кожному кроці розробки з використанням формалізованої когнітивної процедури і може застосовуватися для порівняння варіантів технічних рішень на різних стадіях проектування. Метод адаптивний, тобто отримані внаслідок виконання

Щоб зменшити кількість розглянутих варіантів, необхідне введення апроксимацій, сенс яких полягає у «відсіканні» гілок дерева рішень, тобто у визначенні точки, в якій можна припинити розгляд подальшої послідовності процесу в зв'язку з тим, що виконана серія експериментів вже дала достатньо інформації, і оптимальним рішенням є припинення подальшого аналізу.

Це дозволяє виключити з подальшого розгляду цілі «піддерева». Правила, що використовуються для цього, називаються правилами «відсікання»

етапів роботи експериментальні дані використовуються для уточнення «априорних» розподілів.

«Відсікання» неперспективних за даним критерієм напрямків скорочує обсяги витрат на розрахунки.

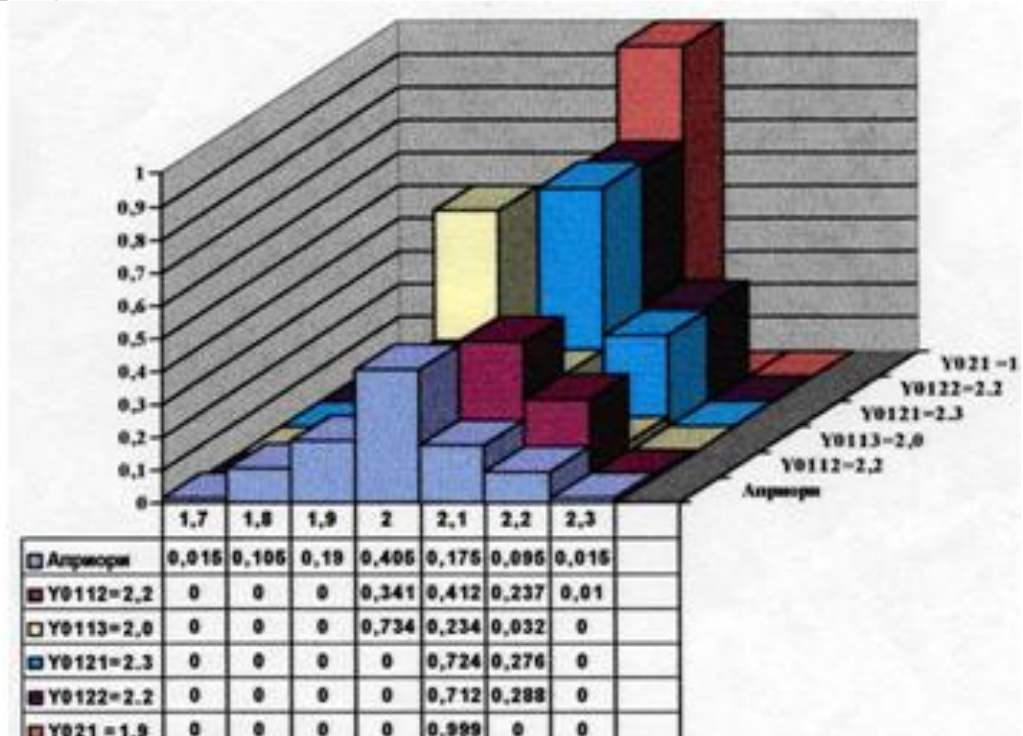


Рисунок 10 – Графік зміни розподілу  $p(\theta)$  в універсальній операції

Метод був застосований для обґрунтування ТП виготовлення кулькових виводів на МЕМС БПП та ТП провідників шлейфу БПП.

*Розрахунок і прогнозування виходу придатних компонентів.*

Розрахунок і прогнозування виходу придатних є актуальним завданням, особливо для комп'ютеризованих виробничих систем, в яких об'єднується інформація, що використовується на етапах проектування і виробництва апаратури, вирішуються завдання моніторингу життєвого циклу. Вихід придатних є важливим показником досконалості технологічного процесу і ступеня його освоєння конкретним підприємством.

Ця величина та її складові за окремими операціями є однією з основних розповсюджених оцінок технологічної точності і використовується для управління якістю продукції, що випускається. Порядок обліку браку регламентується нормативними технологічними документами.

Проте, існуючі методи не дозволяють враховувати зв'язок виходу придатних з технічними та організаційними заходами вдосконалення виробництва, у зв'язку з чим вихід придатних для важкокерованих процесів встановлюється директивно. Це може призводити до недовикористання можливостей виробництва або ставити виробництво у скрутне становище через відсутність технічних рішень для забезпечення необхідного показника. Тому розрахунок виходу придатних, заснований на доступних кожному виробництву значеннях даного показника, і прогнозування його

змін зі зміною конструкторсько-технологічних рішень, матеріалів, вдосконалення технології та інших умов являє суттєвий інтерес.

Принципом, який дозволяє врахувати вплив різнорідних чинників на вихід придатних, звести їх до єдиного показника, може слугувати імовірнісна оцінка отримання придатних конструктивних елементів (КЕ) функціонального вузла, модуля МЕМС. Маючи такі оцінки для всіх КЕ, вихід придатних для вузлів можна знайти за формулою:  $y_k = \prod_{l=1}^L y_{kl} \dots \prod_{m=1}^M y_{km} \dots \prod_{n=1}^N y_{kn}$ , де  $l, m, \dots, n$  – КЕ, що визначають вихід придатних вузла, модуля (індекс « $k$ » означає «конструктивний»);  $L, M, N$  – загальна кількість КЕ типів  $l, m, \dots, n$  відповідно у вузлах.

Під час виготовлення вузлів з однаковими КТР, але різної складності, які містять більшу або меншу кількість КЕ різних типів, вихід придатних різниться  $y_{kl}$  – для нових типів КЕ необхідно визначити експериментально, а значення  $y_{kl}, \dots, y_{kn}$ , також присутніх у модулях, взяти за даними виробництва до модернізації.

Ймовірності отримання придатних нових КЕ можуть бути досить просто встановлені шляхом виготовлення невеликих партій спеціальних тестових вузлів, що містять необхідні типи КЕ у великих кількостях. Виготовлення таких вузлів має виконуватися за тим самим же ТП, що і для реальних виробів, і в тотожних умовах. Дані наступних етапів виробництва мають дозволяти періодично уточнювати значення в довільний момент часу. Крім того, розрахований вихід придатних не повинен різко змінюватися внаслідок випадкового відхилення даного показника для окремих партій вузлів. Значення виходу придатних має бути оптимальними виходячи з рівня показників, досягнутих виробництвом, а зниження втрат має забезпечуватися конкретними технічними заходами: зміною ТП, обладнання, матеріалу, конструкції вузла, організації виробництва, кваліфікації робітників або інших умов виробництва.

Конструктивними елементами МЕМС є: консольні балки, мембрани, торсіони, плоскі пружини, луджені контактні майданчики (КМ), паяні (зварні) з'єднання з різними матеріалами пар елементів тощо. Для прикладу можна назвати: площу елементів, розділених повітряним зазором після стравлювання «жертвних шарів», золотопаладієвий провідник діаметром 30 мкм, зовнішні виводи плати і рамки герметизації, зварний шов рамки і кришки корпусу компонента МЕМС. Набори (типи) КЕ уточнюються за видами браку, що зафіксовані у виробництві конкретних компонентів.

КЕ можуть мати різні геометричні характеристики (площа, довжина, діаметр тощо). Тому для характеристики їх дефектів зручно використовувати питому щільність дефектів елементів  $i$ -го типу, пов'язану з кількістю дефектів співвідношенням:

$$D_i = \frac{\lambda_i}{NA_i}, \quad (43)$$

де  $\lambda_i$  – кількість дефектів КЕ  $i$ -го типу в партії плат;  $A_i$  – геометрична характеристика КЕ (площа ізоляції, довжина для провідників, зварних і паяних швів, кількість зварних з'єднань на платі), балок, пружин мембран і інших,  $N$  – загальна кількість КЕ  $i$ -го типу в партії плат.

Імовірність присутності дефектів, обумовлених типом КЕ, на окремому компоненті залежить від геометричної характеристики, помноженої на питому щільність дефектів. Оскільки в ТП дефекти мають бути явищем рідкісним, залежним від виходу великої кількості випадково діючих факторів, вихід придатних може бути описаний розподілом Пуасона. Можуть використовуватися й інші типи розподілів. Зокрема зручні через наявність у них достатніх статистик експоненціальні розподіли.

У розподілі Пуасона:

$$y(x, AD) = \frac{(AD)^x e^{-(AD)}}{x!}, \quad (44)$$

де  $y(x, AD)$  ймовірність наявності  $x$  дефектів на фіксованому інтервалі геометричної характеристики  $A$  за питомої щільності дефектів  $D$ . Можна стверджувати, що на модулі не буде жодного дефекту ( $x=0$ ) даного типу з імовірністю  $y(0, AD) = e^{-AD}$ .

Подальше вдосконалення моделі опису дефектів КЕ полягає в урахуванні можливих неоднорідностей щільності дефектів кожного виду КЕ за допомогою різних стандартних розподілів  $f(D)$  на площі плати, від краю до центру і так далі.

Середній вихід у цьому випадку визначиться виразом:

$$y = \int_0^{\infty} e^{-(AD)} f(D) dt. \quad (45)$$

В процесі використання для опису  $f(D)$  розподілів, спряжених основному, знає суттєвого спрощення використання результатів поточного виробництва виробів, які містять інформацію про КЕ, для уточнення ймовірностей отримання придатних елементів цих типів.

Спряженим розподілу Пуасона є  $\gamma$ -розподіл:

$$f(D) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} D^{\alpha-1} e^{-\frac{D}{\beta}}. \quad (46)$$

Тоді:

$$y = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^{\infty} e^{-\left(A+\frac{1}{\beta}\right)D} D^{\alpha-1} dD = (1 + A\beta)^{-\alpha}. \quad (47)$$

Звідси маємо:

$$\alpha = \left( \frac{\bar{D}}{\sigma} \right); \quad \beta = \frac{\sigma^2}{D}; \quad (48)$$

де  $\bar{D}$  – середня щільність дефектів;  $\sigma^2$  – дисперсія щільності дефектів.

Параметри  $\alpha$  та  $\beta$  повністю визначають розподіл щільності дефектів КЕ кожного типу, а отже, і  $y_{k,l}$   $y_{k,m}$  ... в даній партії (групи партій, виготовлених за певний календарний період). Перерахунок параметрів  $\alpha$  та  $\beta$  за результатами виготовлення чергової партії мікрокомпонентів для спряжених розподілів досить простий. Якщо апріорна щільність дефектів КЕ конкретного типу з розподілу Пуассона характеризується значенням середнього  $D$ , де  $D$  – гамма-розподіл з параметрами  $\alpha$

та  $\beta$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ , тоді апостеріорний розподіл  $D$  за  $X_i = x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) є гамма розподіл з параметрами:

$$\alpha + \sum_{i=1}^n x_i; \beta + n. \quad (49)$$

Аналогічні прості арифметичні перерахунки параметрів існують для інших пар спряжених розподілів. Перерахунок параметрів розподілу за формулою (49) дозволяє врахувати вплив результату поточного виробництва на обчислення щільності дефектів КЕ розглянутого типу і, отже, на вихід придатних. Якщо величини  $\lambda_v D_i$  в (43), визначені для нового ТП, обладнання, матеріалу, конструкції, і розрахунки за наведеним методом дозволяють оцінити вплив цих змін на вихід придатних вузлів ЕА.

Точність і об'єктивність розрахунків можуть бути підвищені збільшенням обсягу статистичних даних виробництва, а також подальшою деталізацією КЕ за допомогою складових композиційних розподілів щільності, груп обладнання, кваліфікації операторів, що виготовляють ЕА.

Таким чином, запропонована методика має такі переваги:

- дозволяє планувати вихід придатних виробів, виходячи з рівня, досягнутого виробництвом, шляхом використання конкретних організаційно-технічних заходів, з урахуванням складності конструкції вузлів;
- дає можливість оцінювати ефективність нових ТП, матеріалів, обладнання, оснащення для підвищення точності і стабільності ТП;
- може уточнюватися шляхом додавання нових КЕ по зафіксованих у виробництві видах браку;
- забезпечує перерахунок щільності дефектів кожного виду за результатами виготовлення вузлів ЕА за довільний відрізок часу простими арифметичними діями;
- може удосконалюватися шляхом обліку нерівномірності розподілів дефектів за допомогою складових розподілів щільності дефектів;
- придатна для різних видів виробництва МЕМС компонентів.

Дані, наведені в розділі 5, опубліковано у роботах [2 – 4, 6, 17, 41, 44].

**В шостому розділі** наведені результати застосування принципу конвергенції для розробки технологічної оснастки автоматизованого контролю електричних параметрів багат шарових комутаційних структур МЕМС і мікроелектронної апаратури, а також електронних компонентів з матричними кульковими виводами типу BGA/CSP.

Конструктивною основою сучасної електронної та мікроелектронної апаратури і МЕМС пристроїв є багат шарові комутаційні структури. Важливою операцією їх виробництва залишається електричний контроль цілісності провідників і відсутність коротких замикань роз'єднаних ланцюгів. Зі зменшенням розмірів провідників і проміжків між ними, а також зі збільшенням ступеня інтеграції вузлів апаратури складність цієї операції зростає, оскільки на малій площі необхідно встановлювати велику кількість зондів для їх підключення до автоматизованих приладів контролю.

Контроль електричних параметрів БКП є важливою операцією виробництва електронної апаратури і забезпечується різними видами автоматизованих систем контролю і багатозондових підмикальних пристроїв (БПП).

Використовуються БПП з пружними зондами («ложе цвяхів»), з зондами з втратою стійкості, з «літаючими зондами», зі спеціально створеними для контролю периферійними майданчиками. Кожен з перерахованих БПП має свої недоліки і загальну для них усіх можливість помилок контролю першого й другого роду (пропуску браку і відбракування придатних виробів), викликаних відсутністю контакту зондів до точок контролю виробів.

Для усунення зазначених недоліків був розроблений новий метод створення МЕМС багатозондових підмикальних пристроїв і на його основі створено ряд конструкцій.

У МЕМС БПП зондами слугують кулькові матричні виводи, які розміщуються на провідниках багат шарового полімерного шлейфу. Це принципово спрощує форму зондів, оскільки замість штирів складної конфігурації використовуються кулькові виводи. Безліч пружних елементів зондів існуючих конструкцій замінено гнучкою полімерною плівкою, що рівномірно передає статичний тиск повітряного середовища на кульки-зонди.

Підмикальний пристрій створено на базі синтезу трьох відомих технологій: виготовлення шлейфу на плівковому фольгованному носії, виготовлення матричних кулькових виводів і створення тиску стисненим повітрям, що дозволило отримати різні позитивні ефекти.

У першому БПП досягнута висока щільність розміщення зондів на площині (патент України № 82405).

Як об'єкт контролю обрана багат шарова комутаційна плата апаратури УКЦОС (КРЗ, м Київ) (рис. 11).

Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій для комутаційної плати  $48 \times 60$  мм, з кроком розташування контактних майданчиків  $0,625$  мм і загальною кількістю точок контролю рівним  $2400$  виготовлено на чотиришаровому шлейфі.

Один з чотирьох однотипних топологічних провідникових шарів БПП показаний на рис. 12.

Контактні зонди для підключення до плоских майданчиків БПП виконані у вигляді кульок діаметром  $300$  мкм за технологією виробництва BGA-структур.

Провідники нижніх шарів плівкового носія в багат шаровій структурі з'єднуються між собою через вікна в полііміді методом трафаретного друку та оплавлення.

У БПП другого типу (патент України № 97583) для забезпечення перехідного опору на рівні одиниць мОм значення сили, що діє на один кульковий зонд, має знаходитися в межах  $0,03 - 0,3$  Н.

Завдяки зменшенню розмірів зонда до кожної контрольованої точки підключено по два зонди.

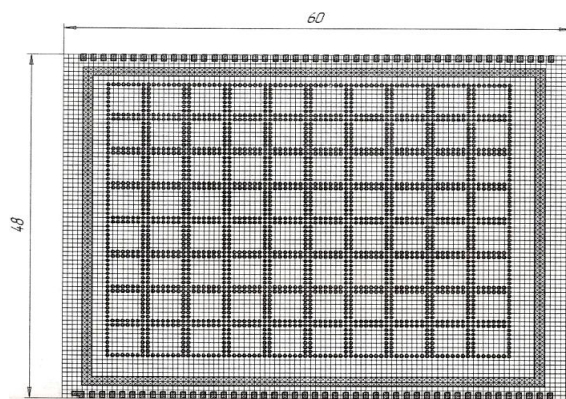


Рисунок 11 – Приклад БПП, що контролювалась

Це дозволило перевірити наявність контакту з об'єктом контролю будь-який з множини зондів, тобто кожен зонд розщеплювався на декілька електрично відокремлених частин (рис. 13).

Тільки з підключенням двох різних частин зонда для контакту виробу між ними створюється електричний контакт, що і фіксується контролюючим пристроєм.

Контроль параметрів багатошарової структури виконується за наявності всіх контактів зондів до контрольованого виробу.

Третій БПП (патент України № 95190) для підключення до автоматизованих пристроїв контролю електронних компонентів типу BGA/CSP.

Значна частина сучасних електронних компонентів, що застосовуються в РЕА, закуповується за кордоном.

Маючи високі електрофізичні характеристики, ці покупні вироби досить часто не відповідають паспортним даним, мають приховані дефекти, які через складність і високий рівень інтеграції (процесори, FPGA) важко своєчасно виявити.

Це накладає на вітчизняних виробників апаратури додаткові обов'язки з організації вхідного і функціонального контролю закордонних виробів та використання контролюючих пристроїв високого рівня автоматизації та відповідно складності.

Для контролю електронних компонентів з матричними кульковими виводами MEMS багатозондового підмикальний пристрій містить плоскі розщеплені на дві-чотири частини зонди, що дозволяють тестувати підключення будь-якого зонда до кульки компонента.

БПП для контролю компонентів BGA/CSP у корпусі FG-320 має такі технічні характеристики:

- опір переходу зонд-кульковий вивід, МОм – не більше 8;
- опір провідника у шлейфі до з'єднання з ZIF, Ом – не більше 10;
- ємність будь-якого провідника щодо усіх інших – менше 100 пФ;
- довжина шлейфу до ZIF-з'єднувача, мм – 200;
- кількість точок підключення (матриця) – 320;
- крок виводів, мм – 1;
- діаметр кулькового виводу, мкм – 600.

Моделювання підмикального пристрою у дво-тришаровому виконанні дозволяло варіювати кількість зварних з'єднань провідників різних шарів від 1260 до 300, а також значення опорів провідників (7,... 1,2 Ом), паразитної ємності виробів (30,...120 пФ).

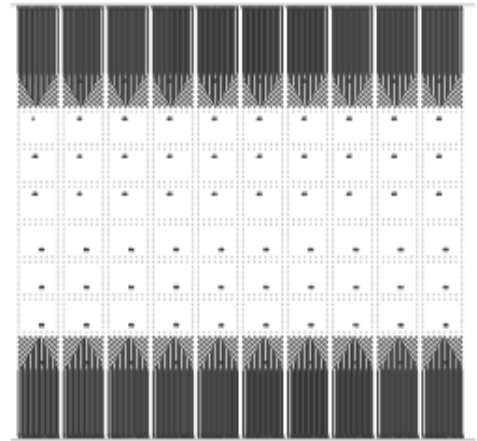


Рисунок 12 – Перший шар БПП

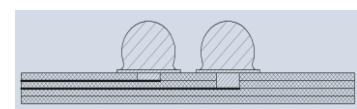
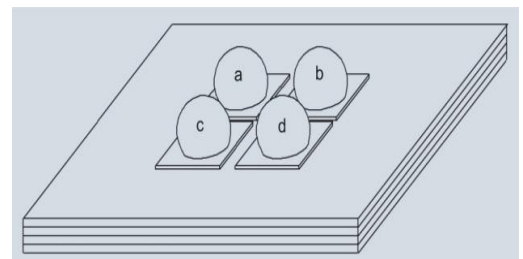


Рисунок 13 – Зонд БПП



Моделювання напружено-деформованого стану МЕМС МПП виконане за методом кінцевих елементів.

Для обчислення використовувалось середовище *Femap 10/2* та додатковий модуль мовою *VB NET*.

Числові експерименти виконувалися для рівномірного розміщення кульок та випадків, коли частина кульок була відсутня. Аналіз розподілу прогину плівки та сил реакції кульок показав (рис. 13, 14), що за відсутності окремого кулькового зонда чи зони кульок зміна тиску спостерігається тільки в першому ряді виводів навколо відсутніх зондів. Найбільші напруги були в кутових елементах кріплення, що вимагає їх округлення.

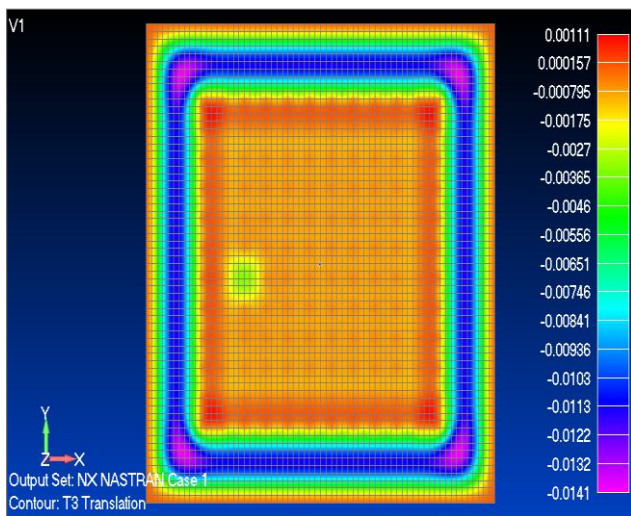


Рисунок 13 – Прогин пластини за відсутності однієї кульки

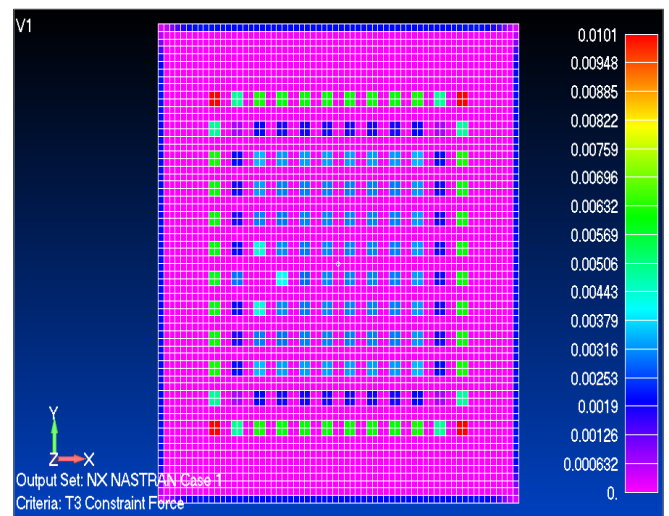


Рисунок 14 – Сили реакції кульок за відсутності однієї кульки

В цілому метод може забезпечити розрізняючу здатність провідникової системи гнучких плат до десятків мікрометрів і можливість контролю мікросхем з кульковими виводами діаметром у десятки мікрометрів.

Використання МЕМС БПП-інтерфейсу (патент України № 98539) забезпечує зменшення кількості рознімних з'єднань від точки підключення до контрольованого виробу до автоматизованого контролюючого комплексу в 2 – 3 рази в ході реалізації цілісної конструкції БПП-міжблочний шлейф.

Об'єднання технологій гнучких шлейфів, виготовлення матричних кулькових виводів і створення рівномірного тиску на плівковий матеріал у замкнутому просторі дозволяє отримати підмикальні багатозондові пристрої, які мають низку переваг порівняно з традиційними механічними системами, можливістю само тестування контактів зондів, надійністю контактування, більшою щільністю розміщення зондів на площині, простотою конструкції і є прикладом конвергенції аеростатичного тиску, гнучкості носія зондів та різних технологічних процесів для отримання якісно нових підмикальних пристроїв.

Дані, наведені у розділі 6, опубліковано у роботах [16, 18 – 20, 28, 34 – 40, 42].

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі відповідно до поставленої мети розв'язано актуальну науково-практичну проблему, а саме розробку методологічних основ проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем, що дозволяє підвищити ефективність виробництва, за рахунок:

- обґрунтування принципу конвергенції різних фізичних явищ, зокрема, електричних і механічних, як творчого методу створення МЕМС-компонентів з поліпшеними електрофізичними властивостями;
- виявлення впливу зменшення лінійних розмірів компонентів на співвідношення сил, що взаємодіють у компонентах МЕМС;
- розробки математичних моделей ряду типових компонентів МЕМС;
- розробки рекурентного методу прийняття рішень у стохастичних системах для моніторингу технологічних процесів виробництва компонентів МЕМС;
- обґрунтування методу вибору кращого технологічного процесу з альтернативних варіантів на основі байєсівських статистичних рішень;
- розробки методу прогнозування виходу придатних компонентів за їх конструктивними компонентами;
- створення на основі об'єднання різних фізичних величин методу розробки багатозондових підмикальних пристроїв для операції автоматизованого контролю електричних параметрів багатосферних структур та електронних компонентів з матричними виводами.

У роботі отримані такі наукові та практичні результати:

1. Конвергенція різних фізичних величин з урахуванням зменшення лінійних розмірів та аналогій у конкретних компонентах визначена основним принципом створення мікроелектромеханічних систем. Таке об'єднання особливостей різних явищ забезпечує поліпшення електрофізичних параметрів МЕМС, можливість подальшої мініатюризації апаратури. Вибрана низка особливостей явищ і середовищ, які є перспективними для створення МЕМС.

2. Визначені критерії геометричної, механічної, теплової подібності режимів компонентів МЕМС у вигляді відомих характеристичних чисел (Коші, Фур'є, Вебера, Фруда та інших).

3. Вперше запропоновані метод і технологія виготовлення багатозондових підмикальних пристроїв для автоматизованого контролю електричних параметрів багатосферних комутаційних плат та електронних компонентів з матричними кульковими виводами типу BGA/CSP шляхом синтезу технологій виготовлення шлейфів на гнучкому плівковому носії, технології виготовлення матричних кулькових виводів та технології тиснення через повітряну подушку, що забезпечує підвищення надійності контролю. Це виключає похибки за рахунок підмикального пристрою (які становили приблизно 5 %) та підвищує надійність контролю, зменшує ГМХ у 10 – 100 разів.

4. Розроблений метод моніторингу технологічних процесів з дискретним часом для прийняття рішень з вибору оптимальних управлінь для забезпечення максимального виходу придатних виробів, на основі теорії рекурентних оптимальних рішень у стохастичних керованих процесах. Метод передбачає визначення

операторів вигоди, ідентифікації функції перехідних імовірностей, визначення оптимального моменту зупинки, розрахунок операторів зв'язку кінцевої вигоди з загальною вигодою стратегії та операторів порівняння різних керувань. Метод визначений на множинах станів  $E$  системи, множині керувань  $U$ , ймовірностей переходу із стану в стан  $Q$ , вигод  $R$  від переходів, правил  $\Pi$  призначення керувань шляхом застосування марківського процесу в комп'ютеризованих технологічних процесах.

5. Розроблено метод визначення кращого варіанта технологічного процесу шляхом поєднання апріорної інформації, отриманої експертними оцінками, та експериментальними даними, отриманими шляхом фізичного експерименту або розрахунками на послідовних етапах розробки, за критерієм мінімальної вартості або найменших технологічних втрат. Розрахунки апостеріорних розподілів (вартості або втрат) базуються на теорії Байєса.

6. Математичний метод прогнозування виходу придатних виробів, що застосовує поняття питомих значень щільності дефектів конструктивних елементів, які були причиною браку виробів у минулому, та внесені до класифікатора браку. Вихід придатних усіх видів конструктивних елементів визначає загальний вихід придатних виробів. Прогноз виходу придатних нових виробів враховує конкретні кількості конструктивних елементів у них. Метод пов'язує зміни показника виходу придатних із зміною матеріалів, обладнання, режимів обробки та інших показників технологічного процесу.

7. Синтезом положень аналітичної механіки, електроніки та врахуванням масштабних факторів узагальнені положення електромеханічних аналогій у термінах узагальнених сил, мас, координат.

8. Показано, що врахування законів зміни сил у МЕМС дозволяє підвищити швидкодію механічних та теплових актюаторів і датчиків обернено пропорційно довжині, чутливість і добротність мікромеханічних резонансних систем, ефективність електростатичних та п'єзовібраційних двигунів.

9. Показано, що для МЕМС-актюаторів та пристроїв мікророботів перспективним напрямком є безскладальні гнучко-жорсткі конструкції, прототипами яких є живі істоти (черв'яки, плазуни, хоботи у слонів) та технічні макроконструкції з зосередженою або розподіленою пружністю, змінною структурою та формою. Такі конструкції забезпечують групове виготовлення.

10. Визначені такі перспективні конструктивно-технологічні рішення МЕМС :

- реалізація інформаційно-керуючих систем у мікрвиконанні для різних областей застосування, в т.ч. для інтелектуальних технологічних процесів;
- використання матричних мультисенсорів для контролю різних фізичних величин, комплексних функціональних мультисенсорів газових середовищ;
- використання МЕМС компонентів як інтерфейсу для реалізації квантово-механічних ефектів у РЕА;
- використання консольних мікробалок як високочутливих датчиків прискорень, температури, тиску та інших, в тому числі для інфрачервоного бачення, дистанційного вимірювання високих температур;
- використання електростатичних двигунів замість електромагнітних;
- підвищення швидкодії і надійності електрофізичних величин у виробках МЕМС;

- мікропотужні джерела живлення, що утилізують невикористовувані види енергії: вібрації, трясіння, ударів, коливань тощо;
- підвищення ККД елементів сонячних батарей шляхом їх покриття плівками перовскітів;

- виготовлення напівпровідникових приладів на основі бездефектних органічних полімерів, отриманих стереоскопічним каталізом і матричним синтезом;
- створення складових і мікророботів для космічної техніки.

11. Перспективним напрямком МЕМС є конвергенція декількох (більше 2-х) специфічних властивостей різної фізичної природи в одному пристрої.

12. Практичне застосування знайшли мікроелектромеханічні багатозондові підмикальні пристрої для електричного контролю багатозондових плат та електронних компонентів з матричними виводами, створені шляхом об'єднання технологій гнучких шлейфів, матричних кулькових виводів і пресування з повітряної прокладкою, що на 1 – 2 порядки зменшує ГМХ пристроїв.

13. Створена науково-практична база для підготовки фахівців за напрямом виробництва мікросистемної техніки, створено спільний науково-навчально-виробничий центр ХНУРЕ – «Хартрон-Енерго ЛТД», створено кооперацію ряду підприємств м. Харкова у напрямку МЕМС; 2 підручники використовуються рядом університетів України у навчальному процесі.

14. Результати роботи використано на підприємстві ДНВП «Об'єднання Комунар» (м. Харків), ООО «Светодиодные технологии Украина» (м. Харків), Державному підприємстві «Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування», ООО НПФ «ВЕСТ ЛАБС ЛТД», Корпорація Тиол ООО НПО «Вертикаль», «Titan Machinery Limited», про що зазначено у відповідних технічних актах впровадження.

15. Результати досліджень впроваджено у навчальний процес і науково-дослідну роботу ХНУРЕ, а також навчальний процес Конотопського інституту Сумського державного університету, Запорізького національного технічного університету, Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, Вінницького національного технічного університету, Криворізького коледжу НАУ, що підтверджується відповідними актами.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у фахових наукових виданнях України:*

1. Невлюдов И. Ш. Концепции оптимального управления в гибких производственных системах. Обзор лит. за 1980-1990 гг. / И. Ш. Невлюдов, В. М. Зубков, В. А. Палагин, Б. Н. Дедух // ЦНТИ-24: Поиск, ГОНТИ-24, 1991.– 82 с.

2. Палагин, В. А. Расчет выхода годных функциональных узлов электронной аппаратуры / В. А. Палагин, Н. В. Милютин // Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. «Радиотехника» – Харьков: 1997. – Вып. 103. – С. 16 – 21.

3. Невлюдов И. Ш. Последовательный выбор лучшего варианта разработки / И. Ш. Невлюдов, В. М. Зубков, В. А. Палагин// Радиоелектроника, информатика, управління. – 1999. – №1. – С. 72 – 79.

4. Невлюдов И. Ш. Методика оценки вариантов разработки по критерию стоимости /И. Ш. Невлюдов, В. М. Зубков, В. А. Палагин // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды гос. аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского.* – Х.: 2000.– Вып. 14. – С. 87 – 89.

5. Невлюдов И. Ш. Поиск оптимальной стратегии управления технологическими процессами с дискретным временем И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, А. А. Андрусевич // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды гос. Аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского.* – Х.: 2001. – Вып. 24. – С. 207 – 219.

6. Невлюдов И. Ш. Принятие технических решений в условиях неопределенности при выборе технологического процесса / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, А. А. Андрусевич, В. А. Макаренко// *Технология приборостроения.* – 2002, №1. С 27 – 33.

7. Невлюдов И. Ш. Идентификация переходной функции при адаптивном процессе принятия решений / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, О. Г. Шинкаренко // *Технология приборостроения.* – 2002. –№2. – С. 34 – 36.

8. Невлюдов И. Ш. Методика автоматизированного проектирования технологических процессов / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. А. Макаренко // *НТЖ «Технология и конструирование в электронной аппаратуре».* – 2002. – № 4 – 5. – С. 29 – 33, [*Ulrich's Periodicals Directory*].

9. Невлюдов И. Ш. Технология поиска оптимальной стратегии управления дискретными технологическими процессами: Всеукр. межвед. Научн-техн. сб. / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, О. Г. Шинкаренко // *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики.* – 2004.– Х. Вып. 127. – С. 124 – 137.

10. Невлюдов И. Ш. Микросистемная техника/ И. Ш. Невлюдов, П. Ф. Поляков, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков, Я. Ю. Королева // *НТЖ «Радіоелектронні і комп'ютерні системи».* – 2006. – №4 (16). – С. 12 – 30.

11. Поляков П. Ф. Элементы и устройства функциональной микроэлектроники / П. Ф. Поляков, А. В. Бородин, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сб. науч. трудов Харьковского национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского.* – Х.: 2007. – С. 49 – 59.

12. Невлюдов, И. Ш. Нанолитография – наноимпринтинг И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Фризюк, О. Г. Шинкаренко// *всеукр. межвед. научн.-техн. сб. «Радиотехника».* – Х.: ХНУРЭ, 150, 2007. – С. 151-158.

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

14. Поляков П. Ф. Мини-, микро- и нанороботы П. Ф. Поляков, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков. Я. Ю. Королева // *сб. науч. трудов. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии.* – 2007 – Вып. 35. – Х.: Нац. аэрокосмический университет «ХАИ» – С. 104 – 113.

15. Невлюдов И. Ш. Элементы солнечных батарей на основе коллоидного нанокристаллического полупроводника  $TiO_2$ / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин,

В. И. Степаненко, К. Н. Клиценко, Е. А. Разумов-Фризиук, О. Е. Деменко // НТЖ «Технология приборостроения». – 2008. – №2. – С. 7 – 10.

16. Невлюдов И. Ш. Многозондовое контактное устройство / И. Ш. Невлюдов, Ю. П. Мачехин, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризиук, И. Т. Тымчук // НТЖ «Технология приборостроения». – Х.: 2009. – №2. – С. 43 – 45.

17. 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-Фризиук // «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». Спец. выпуск «Новые технологии в машиностроении». Сб. науч. трудов. Вып. №3 (63). Юбилейный. Х.:2010. С.173 – 180.

18. Невлюдов И. Ш. Подключающее МЭМС-устройство для контроля VGA-компонентов / И. Ш. Невлюдов, Р. М. Мартынян, В. А. Палагин, Б. С. Слободян Е. А. Разумов-Фризиук, И. В. Жарикова, М. И. Дмитрев, А. С. Беляев // НТЖ «Технология и конструирование в электронной аппаратуре». – Одес. – 2012. – №1. – С. 54 – 56, [*Ulrich's Periodicals Directory*].

19. Невлюдов И. Ш. Топология гибкого шлейфа для подключения к автоматизированным измерительным комплексам микросхем в корпусе FM-320 / И. Ш. Невлюдов, В. Н. Борщев, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризиук, И. В. Жарикова, И. Т. Тымчук, О. Б. Лукачов, М. А. Проценко // НТЖ «Технология приборостроения». – 2012. – №1. – С. 21 – 25.

20. Невлюдов И. Ш. Метод подключения электронных компонентов к автоматизированным измерительным комплексам / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, И. В. Жарикова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 1/9 (61). – С. 4 – 7, [*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, PИИЦ та інші*].

21. Невлюдов И. Ш. Особенности проектирования компонентов микроэлектромеханических систем / И. Ш. Невлюдов, Палагин В. А., Богдан Ю. И. // «Технология приборостроения». – 2014. №2. – с 35 – 39.

22. Невлюдов, И. Ш. Технологии микросистемной техники / И. Ш. Невлюдов, Палагин В. А., Чалая Е.А. // «Технология приборостроения». – 2014. №3. – С 7 – 10.

23. Невлюдов И. Ш. Влияние масштаба на электрофизические параметры компонентов микроэлектромеханических систем / И. Ш. Невлюдов, Палагин В. А., Богдан Ю. И., Томанова Е. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія Автоматика та приладобудування. – 2014. № 67(1109). – С 38 – 48, [*Ulrich's Periodicals Directory*].

24. Невлюдов И. Ш. Технологии микросистемной техники (часть II) / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е.А. Чалая // НТЖ «Технология приборостроения». – 2015. – №2. – С. 5 – 11.

25. Невлюдов І. Ш. Ефективність застосування конвергенції для МЕМС актюаторів І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, В., Р.Ю. Аллахверанов // НТЖ «Технология приборостроения». – 2015. – №2. – С. 14 – 16.

26. Невлюдов І. Ш Energy Harvesting: огляд п'єзоелектричних перетворювачів І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, Є.А. Разумов-Фризиук, Ю.І. Богдан // НТЖ «Технология приборостроения». – 2015. – №2. – С. 43–6.

*Міжнародні конференції*

27. Nanoimprinting – Nanolithography [Electronic source] / V. A. Palagin, A. E. Frizuk; The International Workshop on Optoelectronic Physics and Technology. – Режим доступу: [www/ URL: http:// photonics. Kture.Kharkov.ua/OPT/OPTann1en. html](http://www.URL: http:// photonics.Kture.Kharkov.ua/OPT/OPTann1en.html). – June 20 – 22, 2007. Kharkov, Ukraine. – P. 63-67. – Загл. з екрану[Scopus].

28. Невлюдов И. Ш. Многозондовое подключающее устройство для контроля BGA-компонентов / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, И. Т. Тымчук, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова // Сб.нт 3-й МНК «Функциональная компонентная база. Микро- опто- и наноэлектроника» Харьков – Кацевели, 28.09.2010, С. 191 – 194.

29. Классификация технологий микроэлектромеханических систем: тез. докл. 2-го междунар. радиоэл. форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (сент 2005), г. Харьков, Украина / И. Ш. Невлюдов, В. М. Свищ, В. А. Палагин // Том 1. – С. 111 – 114.

30. Some solutions for manufacturing microdevices: тез. сб. науч. тр. 1-ой МНТК «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» в рамках 3-й МРФ «Прикладная РЭ. Состояние Электронной базы и перспективы развития», (30 сент – 3 окт. 2008, Харьков – Судак)/ А. І. Filipenko, І. Sh. Nevlyudov, V. A. Palagin // Том 3. – С. 195 – 197.

31. Исследования возможности изготовления лакофольговых диэлектриков повышенной точности для изготовления МЭМС устройств: тез. докл. сб. науч. тр. 1-й междунар. науч. конф. «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития»,(30 сент – 3 окт. 2008) – Харьков – Судак.: В. И. Степаненко, К. Ю. Харенко. В. А. Палагин, Е. А. Фризюк // Том 3. – С. 219 – 223.

32. Математическая модель плоских пружин актюаторов МЭМС: тез. докл., сб. науч. трудов 2-ой междунар. науч. конф. «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития», (30 сент – 3 окт. 2009).– Харьков – Кацевели: И.Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов, В. А. Палагин. – С. 53 – 56.

33. Компоненты функциональной электроники, микросистемной техники и нанотехнологии в РЭА: тез. докл., сб. науч. трудов 4-ой междунар. науч. конф. «Функциональная база наноэлектроники», (30 сент – 3 окт. 2011). Харьков – Кацевели: Н. И. Слипченко, И. Ш. Невлюдов, А. И. Филипенко, В. А. Палагин, В. А. Хорунжий. – С. 19 – 26.

34. Nevliudov I. Sh. MEMS Intellect Multiprobes Contacting Devices for Electrical Checking-Up of Multilayers Commutative Boards and BGA/CSP Electronic Components [Text]/ I. Sh. Nevliudov, V. A. Palagin, E. A. Razumov-Frizjuk, I. V. Sharikova // Proceedings of IEEE East-West Design, Test Symposium (EWDTS`2012). IEEE Computer Society – Kharkov, Ukr. September 14 – 17, 2012. – P. 483 – 485.

35. Технологические особенности изготовления многозондовых подключающих устройств для контроля компонентов BGA/CSP: тез. докл. МН Практика «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», (вересень 2012 р.) – И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова – Запоріжжя: С.272 – 274.

36. Слипченко Н. И. Изоморфизм и электромеханические аналогии в микросистемной технике / сб. н. тр. 5 МНК «Функциональная база наноэлектроники»,

2012 г. / Н. И. Слипченко, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин – Харьков – Крым: С. 289 – 292.

37. Палагин В. А. Многозондовые подключающие устройства для контроля коммутационных плат и электронных компонентов / В. А. Палагин, И. Ш. Невлюдов, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова // *Материалы 7 международн. симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки»*. – 2012 – Т.1, М. РАН., С. 186 – 194.

38. Микроэлектромеханические многозондовые подключающие устройства для контроля изделий техники: тез. докл. науч. конф. XXI International conference «New leading technologies in machine building». (Sept. 2013) I. Sh. Nevliudov, V. A. Palagin, I. V. Sharikova – Rybachie: P. – 20 – 24.

39. Проектирование топологии гибкого полиимидного шлейфа многозондового устройства контроля электронных компонентов: тез. докл. 9-й Международной молодежной НТК РТ-2013 «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (апрель 2013) В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова. – Севастополь: 2013. – С. 262.

40. Трассировка подключающей пластины многозондового устройства контроля BGA- компонентов: тез. докл. 4-я МНПК «Функциональная база нанoeлектроники» (сентябрь – октябрь 2013) / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова – Харьков – Крым: 2013.– С. 79-80.

41. Выбор варианта ТП на основе теории Байеса: тез. докл. 12 МНТК «Физические процессы и поля технических и биологических объектов» (ноябрь 2013) / И.Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова – Кременчук: 2013. – С.175-177.

42. Моделирование топологии подключающей пластины многозондового устройства для контроля микросхем с матричным расположением выводов: тез. докл. 12 МНТК «Физические процессы и поля технических и биологических объектов» (ноябрь 2013) / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова – Кременчук: 2013. – С. 177 – 179.

43. Особенности проектирования компонентов микроэлектромеханических систем: тез. докл. 13 МНТК «Физические процессы и поля технических и биологических объектов» (7- 9 ноября 2014) / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Ю. И.Богдан – Кременчук: 2014.– С.176 – 177.

44. Невлюдов И. Ш., Использование байесовских статистических решений для выбора варианта технологического процесса / И. Ш. Невлюдов, М. А. Омаров, Е. А. Разумов-Фризюк/ тезисы доклада XX Intern. Cjnferens «New leading technologies in Machin Burding» Rybachie, Uk, September, 2010, P. 12.

45. Невлюдов И. Ш. МЭМС актюаторы / И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин // *Сборник научных трудов VIII «Функциональная база нанoeлектроники»*, Харьков – Одесса, 2015, сентябрь – октябрь, С. 204-207.

*Монографії та підручники:*

46. Технология межсоединений электронной аппаратуры: учебник для студ. ВУЗ (рекомендовано МОНУ), В. В. Семенец, Джон Кратц, И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин. – Х.: «Компания СМІТ», 2005. – 432 с.



47. Невлюдов И. Ш. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии:/ И. Ш. Невлюдов, А. А. Андрусевич, В. А. Палагин. – Х.: «Коллегиум», 2007.– 268 с.

48. Семенец В. В. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології: підручник для ВНЗ (рекомендований МОНУ) / В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін. – Х.: Видавн. «Компанія СМІТ», 2011. – 416 с.

#### *Патенти*

49. Спосіб автоматичної фіксації колінного вузла протеза та пристрій для його здійснення: патент України 49079: МПК А61F2/64/ Г. В. Красюк, В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, Б. В. Дзюндзюк, В. В. Молчанов, В. В. Бублій, В. А. Палагін, О. А. Чернишенко, С. Е. Горлевський; заявники ХНУРЕ та НДІ Соц. захисту населення; заявл. 15.02.2000; опубл. 16.09.2002. Бюл. №9.

50. Колінний механізм протезу стегна: патент України 49929 С2: МПК 6А61F2/38/ Г. В. Красюк, В. В. Молчанов, А. Є. Ватолинський, І. Ш. Невлюдов, О. А. Чернишенко, В. А. Палагін, В. В. Бублій; заявники ХНУРЕ та НДІ Соц. захисту населення; заявл. 25.05.1999, опубл. 15.10.2002. Бюл. №10.

51. Автоматизований склад: Деклараційний патент України на корисну модель 2788: МПК 7В65G1/02/ І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, Є. А. Фризюк; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 17.11.2003, опубл. 16.08.2004. Бюл. №8.

52. Багатозондовий контактний пристрій: патент України 82405: МПК Н05 1/00/ І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, В. В. Семенець, С. В. Сотник, Є. А. Фризюк; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 15.05.2006, опубл. 10.04.2008. Бюл. №7.

53. Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій: патент України 95190 С2: МПК Н05К 1/11/ В. Н. Борщев, Л. Д. Коцій. О. А. Лістратенко, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, М. А. Проценко, Є. А. Разумов-Фризюк, С. М. Тертишний, І. Т. Тимчук; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 21.05.2010, опубл. 11.07.2011. Бюл. №3.

54. Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій: патент України 97538: МПК Н05К 1/11 (2006.01)/ В. Н. Борщев, Л. Д. Коцій. О. А. Лістратенко, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, М. А. Проценко, Є. А. Разумов-Фризюк, С. М. Тертишний, І. Т. Тимчук; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 19.03.2010, опубл. 26.09.2011. Бюл. №18.

55. МЕМС-інтерфейс багатозондовий автоматичних контролюючих комплексів: патент України 98539: МПК Н05К 3/40 (2006.01)/ І. В. Жарікова, З. І. Костенко, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, Є. А. Разумов-Фризюк; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 24.09.2010, публ. 25.02.2011. Бюл. №4.

56. Пристрій для циклічного перетворення механічної енергії в електричну: патент України 108314 МПК Н02 N 2/18, Н01L 41/04; F03D 9/02 (2015.0)/ І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, Є. А. Разумов-Фризюк, І. В. Жарікова, Ю. І. Богдан; заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 19.12.2013, публ. 10.04.2015 Бюл. № 7.

57. Плоский з'єднувач електронних пристроїв з нульовою силою вставки: патент на корисну модель № 103402. МПК Н01R 12/82 (2011/01/) Богдан Ю.І., Демська Н. П., Невлюдова В. В., Палагін В. А., Разумов-Фризюк Є. А., Роменський В.І. Заявник та власник ХНУРЕ; заявл. 10.07.2015, публ. 10.12.2015 Бюл. № 23.

## АНОТАЦІЇ

**Палагін В. А.** Методологічні основи проектування технологій компонентів мікроелектромеханічних систем. – На правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню проблеми створення методологічних основ проектування технологічних процесів компонентів мікросистемної техніки з урахуванням зменшення розмірів компонентів, сумісного використання специфічних властивостей різних фізичних явищ під застосування в одному мікропристрої для цілеспрямованого покращання електрофізичних параметрів експлуатаційних характеристик та економічних показників МЕМС.

В основу вирішення проблеми покладені:

- аналіз співвідношення сил різної фізичної природи в компонентах мікроелектромеханічних систем;
- розробка методу моніторингу технологічних процесів у динамічних системах з дискретними станами;
- розробка методу вибору кращого технологічного процесу з альтернативних варіантів;
- розробка методу прогнозування виходу придатних виробів з застосуванням конструктивних елементів та співпряжених розподілів імовірності;
- проектування технологічного оснащення для електричного контролю параметрів багат шарових структур та компонентів з матричними кульковими виводами.

На базі теорії подібностей та розмірностей фізичних величин встановлені умови подібностей теплових режимів, дії сил тяжіння, пружності та інерції в макро- та мікросистемах.

Встановлена тенденція підвищення швидкодії мікромеханічних і мікротермічних компонентів, зростання ефективності електростатичної взаємодії у протилежність її зменшення в електромагнітних структурах.

Аналіз електроелектричних фізичних та інших аналогій дозволив встановити співвідношення елементів електричних кіл у системах «струм-сила» та «напруга-сила» елементам механічних структур, а також показав широкі можливості як сенсорів консольних мікробалок, електростатичних конструкцій. Використання мікромеханічних компонентів забезпечує надзвичайно високу добротність коливальних систем (десяти тисяч), та чутливість сенсорів температури, тиску тощо.

Аналіз особливостей явищ різної фізичної природи (газових та рідинних середовищ, механічних, оптичних, магнітних, термічних) дав можливість сформулювати загальний підхід для створення мікросистемних пристроїв методом конвергенції цих особливостей в одному конкретному пристрої.

Моніторинг технологічних процесів базується на методі рекурентних оптимальних рішень у стохастичних системах. Побудова методу виконана на множинах управління системи, станів ймовірностей переходу системи із стану в стан, під дією

конкретного керування, множини прибутків та правил вибору рішень. Введені означення операторів прибутків від застосувань конкретних керувань на окремому кроці процесу, протягом процесу ідентифікації матриці ймовірностей за результатами спостережень до моменту зупинки (максимального прибутку), та на заключному етапі процесу експлуатації. Показана досяжність оптимальної стратегії керування.

Метод вибору кращого варіанта технологічного процесу з множини процесів, які розглядаються, використовує когнітивну байєсівську теорію статистичних рішень та перерахунків імовірностей за результатами спостережень (результатів фізичних експериментів та (або) розрахунків). Сформульоване правило зупинки процесу ідентифікації перехідних імовірностей.

Важливою характеристикою технологічного процесу є вихід придатних виробів.

Запропонований метод забезпечує розрахунок виходу придатних зі змінами різних факторів виробництва: матеріалів, обладнання, режимів, конструкції виробів, що робить його універсальним для цілої низки виробництв, а також для прогнозу виходу придатних нових виробів. Новим елементом методу є застосування спряжених розподілів імовірностей під час перерахунків виходу придатних за результатами поточного виробництва.

Практичне застосування методу конвергенції в процесі розробки компонентів МЕМС знайшло під час створення низки засобів контактування на операціях електричного контролю МЕМС, багатозарових структур, компонентів з матричними кульковими виводами. Розроблені багатозондові підмикальні пристрої забезпечують:

- зонди у вигляді кулькових виводів, розташованих на гнучкому носії;
- високу щільність розташування зондів на площині;
- створення однакового тиску зондів на контактні майданчики плат за рахунок його здійснення стисненням повітрям;
- можливість перевірки контакту будь-якого зонду до контактної площинки.

В цілому в ході контролю усуваються похибки першого та другого роду (пропуск браку та забракування придатних).

Технологічні процеси виготовлення багатозондових пристроїв базуються на технологіях виготовлення гнучких шлейфів, створенні тиску через повітряну подушку та виготовлення матричних кулькових виводів.

Проведений аналіз визначив широкий спектр застосування МСТ виробів для отримання сенсорів, актюаторів, інформаційно-керуючих систем, мікророботів.

*Ключові слова:* мікроелектромеханічні системи (МЕМС), методологія проектування, метод статистичних рішень, метод оптимальних рекурентних рішень, контактуючі пристрої, МЕМС-актюатори, сенсори; мікробалки, вихід придатних МЕМС-компонентів.

**Палагин В. А.** Методологические основы проектирования технологий компонентов микроэлектромеханических систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.06 – технология, оборудование и производство электронной тех-

ники. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению проблемы создания методологических основ проектирования технологических процессов компонентов микросистемной техники с учетом уменьшения размеров компонентов, совместного использования специфических свойств различных физических явлений при применении в одном микроустройства для целенаправленного улучшения электрофизических параметров эксплуатационных характеристик и экономических показателей электронных аппаратов.

В основу решения проблемы положены:

- анализ соотношения сил различной физической природы в компонентах микросистемной техники;
- разработка метода мониторинга технологических процессов в динамических системах с дискретными состояниями;
- разработка метода выбора лучшего технологического процесса из альтернативных вариантов;
- разработка метода прогнозирования выхода годных изделий с применением конструктивных элементов и сопряженных распределений вероятности;
- проектирование технологической оснастки для электрического контроля параметров многослойных микроплат и компонентов с матричными шариковыми выводами;
- анализ различий технологических процессов МЭМС от полупроводниковых компонентов.

Практическое применение метод конвергенции нашел при создании ряда многозондовых контактирующих устройств для операций электрического контроля компонентов с матричными шариковыми выводами. Разработанные многозондовые подключающие устройства обеспечивают:

- зонды в виде шариковых выводов, расположенных на гибком носителе;
- создание одинакового давления зондов на контактные площадки плат за счет его осуществления сжатым воздухом;
- возможность проверки контакта любого зонда к контактной площадке;
- уменьшение сложности устройства по сравнению с аналогами, соответственно, надежности и стоимости.

В целом при контроле устраняются ошибки первого и второго рода.

*Ключевые слова:* микроэлектромеханические системы (МЭМС), методология проектирования, метод статистических решений, метод оптимальных рекуррентных решений, контактирующие устройства, МЭМС-актюаторы, сенсоры; микробалки, выход годных МЭМС.

**Palagin V. A** Methodological foundations of technology components Microelectromechanical systems. – The manuscript.

A Thesis for a Doctor of Technical Sciences degree in the specialty 05.27.06 – technology, equipment and production of electronic equipment. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The theses are devoted to the problem of laying the methodological foundations of design processes Microsystem Technology components considering reducing the size of components, sharing specific properties of various physical phenomena in the application to one microdevice for targeted improvement of electrical parameters and economic performance of electronic devices.

The basis of the solutions of the problems' put:

- analysis of the balance of forces in different physical nature components of microsystem technology;
- develop a method for monitoring processes in dynamic systems with discrete states;
- development a method for selection of the best process from alternatives;
- development a method for predicting output valid products using structural elements and conjugate probability distributions;
- design of technological equipment for electric testing parameters of multilayer microplate and matrix components with ball terminals.

Analysis of different physical phenomena (gas and liquid media, mechanical, optical, magnetic, thermal) made it possible to formulate a common approach to create microsystems these devices by the convergence of these features in one particular device.

Monitoring processes based on the method of recurrent optimal solutions in stochastic systems. Construction method performed on the pluralies of the system states, controls, transition probabilities from state to state under specific control, set profits and selection policy decisions.

Reach optimal management strategy is shown.

The method of choosing the best variant of the process from the plurality of processes are considered with using cognitive Bayesian statistical decision theory and probability recalculations based on observations (results of physical experiments and (or) calculations). Defined rules stop the identification process of transition probabilities.

An important feature of the process is yield products.

The proposed method provides calculation yield exit at changes of various factors of production materials, equipment, modes of product design, making it versatile for a variety of industries, as well as to forecast yield of new products. A new element of the method is the using of conjugated Probability Distributions. In terms yield the results of yield current production.

Practical application of convergence method found in creation of number MEMS-test fixtures for electrical testing operations multilayer thick and thin communication boards, BGA/SCP components.

Keywords: Microelectromechanical systems (MEMS, a method of statistical decision-making, method of optimum recurrence, test fixture, MEMS- actuators, sensors; mikrobeams, yield MEMS.