

Вченому секретарю
спеціалізованої вченої ради
Д 64.052.04
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доц. Пащенко О.Г.
пр.Науки, 14, м. Харків, 61166

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію Палагіна Віктора Андрійовича

на тему: «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – **технологія, обладнання та виробництво електронної техніки**

Актуальність теми

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) – це одна з найбільш передових технологій, вона дозволяє значно покращити характеристики електронної техніки, а також розробляти пристрої для розв'язання задач в нових галузях виробництва. До основних переваг МЕМС відносять малу розбіжність параметрів в межах виробу, високу технологічність та повторюваність, мікромініатюрність, високу функціональність, покращені характеристики функціонування, високу надійність та стійкість до зовнішніх дій, низьку вартість. Ці переваги визначають ті галузі, в яких такі системи отримали найбільше розповсюдження. Це або галузі, в яких необхідні прості, але мініатюрні та повторювані вироби при великих обсягах виробництва та обмеженнях на вартість кінцевого виробу, або складні спеціалізовані високоточні, надмікромініатюрні та високонадійні вироби: автомобільна електроніка, мобільні пристрої, мініатюрні побутові пристрої,

телекомунікаційні пристрої, а також військова, медична та інша спеціалізована техніка.

Методологічні основи проектування технології виробництва компонентів МЕМС суттєво відрізняються від аналогічних за суттю технологій у інших галузях техніки. Для МЕМС необхідно враховувати особливості проектування мікророзмірних компонентів та спільне використання явищ різної фізичної природи в одному пристрої, тобто специфіку техніки мікромініатюризації композиційних пристроїв. Це значно ускладнює проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС.

Тому виникає складна науково-практична задача розробки методологічних основ проектування технології виробництва компонентів МЕМС, що повинно призвести до підвищення ефективності такого виробництва.

Тема дисертаційної роботи Палагіна В.А. «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем», яка має на меті підвищити ефективність проектування технологій виробництва компонентів МЕМС, є без сумніву актуальною та своєчасною.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається зі вступу, шести розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел із 253 найменувань.

У першому розділі проаналізовано, в яких галузях науки та техніки використовуються мікроелектромеханічні системи. Розглянуто проблеми, які виникають при застосуванні таких систем та напрямки їхнього розвитку. Наведено аналіз таких матеріалів для МЕМС: кремнію, вуглецевих форм матеріалів, феромагнітних рідин, фотонних кристалів, полімерних матеріалів, ДНК й інтелектуальних матеріалів, а також технологій МЕМС. Обґрунтовано необхідність впровадження МЕМС в усі провідні галузі техніки з одночасним підвищенням ефективності цих пристроїв. Сформульовано мету та завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі розглядається конвергенція та масштабування у мікроелектромеханічних системах. Проаналізовано зміну сил при пропорційній зміні лінійних розмірів, а також наведено електромеханічні аналогії. Визначено, що поведінка компонентів МЕМС значно відрізняється від усіх інших видів систем у зв'язку із їх розміром, що необхідно враховувати при проектуванні та використанні. Зроблений висновок, що конвергенція різних фізичних величин з урахуванням зменшення лінійних розмірів компонентів є основним принципом створення компонентів МЕМС; об'єднання електричних і механічних пристроїв на нижньому рівні інтеграції дозволяє істотно поліпшити надійність та електрофізичні властивості пристроїв.

В третьому розділі запропоновано математичні моделі таких компонентів мікроелектромеханічних систем: мікробалок, ємнісних елементів, резонаторів та п'єзоперетворювачів. Наводяться особливості розрахунків цих компонентів: 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 розрахунків деформації в матеріалах мікробалок за об'ємного напруженого стану необхідне врахування дії нормальних і дотичних напружень.

У четвертому розділі за критерієм максимізації виходу придатних виробів, який використовує рекурентні методи вибору оптимальних рішень у стохастичних системах і байєсівських перерахунків для ідентифікації матриці перехідних ймовірностей, розроблена теорія прийняття рішень для вибору стратегії моніторингу технологічних процесів у виробництві МЕМС.

У п'ятому розділі для вибору оптимального рішення серед визначеної множини можливих рішень розроблено метод прийняття статистичних байєсівських рішень, за ознакою мінімальної вартості або мінімальних технологічних втрат. Також у цьому ж розділі запропоновано метод

прогнозування виходу придатних компонентів МЕМС і багатошарових комутаційних структур

У шостому розділі доводиться ефективність запропонованих теорій, методів і моделей шляхом аналізу результатів застосування принципу конвергенції для розробки технологічної оснастки автоматизованого контролю електричних параметрів багатошарових комутаційних структур МЕМС і мікроелектронної апаратури, а також електронних компонентів з матричними кульковими выводами типу BGA/CSP.

В додатках наведені узагальнені відомості про електромеханічні аналогії, особливості фізичних явищ у функціональній електроніці, класифікацію технології МЕМС, можливості растрової акустичної мікроскопії, види зображень при ПАМ, технологічний процес HRPS, методи наноімпрінгу, а також акти про впровадження результатів дисертаційної роботи.

В цілому у тексті дисертації матеріал подається логічно, послідовно та доказово.

Степінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність

Основні наукові результати дисертаційної роботи загалом є обґрунтованими. Їх достовірність забезпечується в цілому коректним застосуванням теорії подібності та розмірностей фізичних величин, електромеханічних аналогій у математичних моделях компонентів МЕМС; матрично-векторних операцій та марківських процесів, байєсівських статистичних рішень, спряжених розподілів ймовірностей, теорії напружено-деформованого стану матеріалів і елементів МЕМС. Одержані результати підтверджуються експериментами, а також актами впровадження на таких підприємствах: ДНВП «Об'єднання Комунар» (м. Харків), ТОВ «Светодиодные технологии Украина» (м. Харків), Державному підприємстві «Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування»,

ТОВ НПФ «ВЕСТ ЛАБС ЛТД», Корпорація Тиол ООО НПО «Вертикаль», «Titan Machinery Limited».

Наукова методологія та прикладні результати, викладені у дисертаційній роботі, дозволили вирішити важливу проблему підвищення ефективності проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем, що застосовуються у найбільш важливих галузях техніки.

Наукова новизна роботи

До наукової новизни дисертаційної роботи слід віднести такі положення:

– вперше запропоновано визначати конвергенцію фізичних явищ у мікромініатюрних виробках з урахуванням зменшення лінійних розмірів компонентів і зміни співвідношень дії різних видів сил, як творчого методу створення МЕМС компонентів з поліпшеними електрофізичними властивостями;

– для підвищення надійності контролю електричних параметрів багат шарових комутаційних структур вперше запропоновані метод і технологія створення МЕМС багатозондових підмикальних пристроїв;

– подальшого розвитку набув метод проектування мікроелектромеханічних систем, що дозволило скласти єдину систему рівнянь для статичного та динамічного режиму роботи;

– для вибору оптимального варіанта технологічного процесу застосовані положення теорії байєсівських статистичних рішень;

– для оптимізації стратегії моніторингу складних технологічних процесів подальшого розвитку набули положення теорії рекурентних методів прийняття рішень у стохастичних процесах з прибутками;

– для забезпечення можливості врахування впливу технологій виготовлення, конструкцій, матеріалів, обладнання та організаційних вимог виробництва на вихід придатних набув подальшого розвитку метод прогнозування та розрахунку виходу придатних компонентів.

Практична цінність дисертаційної роботи у тому, що запропоновані теорії, методи та моделі створюють методологічну основу для проектування технологічних процесів виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем, що дозволяє здійснити вибір кращого варіанта технологічного процесу за показниками мінімальних витрат, вибір оптимальної стратегії моніторингу технологічного процесу, а також прогнозування виходу придатних компонентів.

Одержані практичні результати підтверджуються відповідними актами про впровадження як у навчальний процес низки навчальних закладів так і у виробництво на серії підприємств.

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 з орієнтацією на створення МЕМС; видано два підручники, у яких дисертант є соавтором і які використовуються низкою університетів України у навчальному процесі.

Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих працях

Основні результати роботи достатньо повно висвітлені в таких наукових працях: 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. В цілому опубліковані роботи в достатній мірі відображають основні положення дисертації.

Використання результатів дисертаційної роботи

Запропоновані теорії, методи та моделі використовуються при проектуванні технологічних процесів виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем, дають змогу обирати кращий варіант технологічного процесу за показниками мінімальних витрат, забезпечують оптимальну стратегію моніторингу технологічного процесу, а також прогнозують вихід придатних компонентів.

Недоліки та зауваження по роботі

Незважаючи на загальну позитивну оцінку дисертації, вона містить ряд недоліків:

1. завеликий обсяг першого розділу, який має становити близько 25% основного змісту роботи;
2. недостатньо повно розкрито, чому вибір стратегії керування здійснюється за допомогою марківських процесів;
3. починаючи з другого розділу і далі у тексті дисертації критерії подібності звуться числами (Коші, Вебера і інші), хоча число Рейнольдса, наприклад – це числове значення критерія Рейнольдса, яке притаманно стану потоку рідини у момент, що розглядається;
4. недостатньо обґрунтовано вибір середовища моделювання;
5. з тексту дисертації залишається незрозумілим, якого саме економічного ефекту досягнуто;
6. рисунок 1.3 не є “читабельним”, що погіршує сприйняття матеріалу;
7. рисунок 1.8 повинен мати пояснення зображених на ньому змінних та числових значень;
8. у другому розділі не всі формули мають необхідні пояснення, що ускладнює доступність викладеного матеріалу;
9. на рисунок 3.2 відсутнє посилання, а також не зовсім точно зрозуміло, що позначають стрілки на ньому;
10. на рисунку 3.9 наявні пояснення не всіх позначених змінних;

11. замість терміну “математичне очікування” необхідно застосовувати “математичне сподівання”.

Вказані недоліки не знижують у цілому позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновки

Дисертаційна робота Палагіна Віктора Андрійовича є завершеною науковою працею, спрямованою на підвищення ефективності проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем за рахунок розробки методологічних основ, які враховують зміни електрофізичних характеристик виробів внаслідок конвергенції явищ різної фізичної природи, зміни співвідношення діючих сил в процесі масштабування, можливість прогнозування виходу придатних компонентів, вибір варіанта та моніторингу технологічного процесу.

Наукові положення, які сформульовані в роботі, повністю обґрунтовані.


Достовірність і новизна висновків і рекомендацій сприймаються без заперечень. Викладення результатів теоретичних та експериментальних досліджень, моделювання та фізичних експериментів відповідає вимогам до наукових публікацій. Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, а їх основні положення ідентичні.

Основні теоретичні положення роботи, висновки та рекомендації відображені в монографіях автора, публікаціях в науково-технічних журналах, доповідях на вітчизняних та міжнародних науково-технічних конференціях.

Вважаю, що за актуальністю теми, ступенем обґрунтованості і достовірності результатів, науковою новизною і практичним значенням дисертаційна робота Палагіна В.А. «Методологічні основи проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем» є завершеною самостійною науковою працею, яка відповідає вимогам

п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015), а її автор Палагін Віктор Андрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Професор кафедри радіоконструювання і
виробництва радіоапаратури
доктор технічних наук, професор
Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут”

 Б.М. Уваров

Підпис професора Уварова Б.М. засвідчую:

Учений секретар НТУУ „КПІ”  А.А. Мельниченко

