

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 дисертаційну роботу Палагіна Віктора Андрійовича  
«Методологічні основи проектування технологій виробництва  
компонентів мікромеханічних систем», що подана на здобуття наукового  
ступеня доктора технічних наук за спеціальністю  
05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

#### **Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Мікроелектромеханічні системи (MEMS) є одним з найбільш прогресивним напрямком розвитку мікросистемної техніки і, разом з нанотехнологіями, визначають сучасний розвиток електронної техніки.

Об'єднання в výroбах MEMS механічних, електронних, оптичних, акустичних, магнітних, рідинних та інших компонентів дозволяє суттєво підвищити їх характеристики, однак ускладнює технологію виготовлення, вимагає розробки ефективних методів проектування і моніторингу технологічних процесів.

Практична відсутність методологічних основ проектування технологій виробництва мікросистемних компонентів, що враховували б різноплановість фізичних явищ утворює протиріччя між традиційними підходами до проектування та новими напрямками технологічного розвитку наноматеріалів та нанотехнологій.





З цих причин тематика дисертаційної роботи Палагіна В.А., спрямована на розв'язання науково-прикладної проблеми, що полягає у необхідності підвищення ефективності проектування технологічних процесів виробництва компонентів МЕМС за рахунок врахування фізичних явищ різної природи у мікросистемних пристроях, є, без сумніву, актуальною.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій.**

Розроблені автором методологічні основи проектування технологічних процесів виробництва компонентів МЕМС переконливо обґрунтовано за допомогою аналітичних досліджень та імітаційного моделювання.

Теоретичні дослідження властивостей МЕМС проведено на основі математичної теорії подібності та розмірностей фізичних величин; моделі побудови стратегії моніторингу технологічних процесів розроблено на основі матрично-векторних та марківських методів; вибір варіантів технологічних процесів здійснено на основі методу байєсівських статистичних розрахунків.

Теоретичні положення дисертації підтверджено експериментальними дослідженнями розроблених конструкторсько-технологічних рішень, макетних та дослідних зразків МЕМС.

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

Дисертаційна робота пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт у відповідності до планів Міністерства освіти і науки України в Харківському національному університеті радіоелектроніки в рамках НДР кафедри технології та автоматизації виробництва РЕЗ та ЕОЗ за держбюджетними темами: «Теоретичні основи створення перспективних компонентів і нових технологій їх виробництва для широкого класу волоконно-оптичних систем» (№ ДР 0105U002739); «Конструкторсько-технологічні основи створення перспективних компонентів електромеханічних систем та технологій їх виготовлення» (№ ДР 0108U002216); «Теоретичні основи мікромеханічних



систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (№ ДР 0110U002594); «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями та їх впровадження» (№ ДР 0113U000358).

Також здобувач виконав низку робіт за господарськими договорами. В усіх вказаних роботах здобувач брав участь у якості виконавця та керівника. Ним розроблено теоретичні положення електромеханічних аналогій, використана теорія подібностей та розмірностей фізичних величин, досліджено конструктивно-технологічні рішення електронних і механічних компонентів МЕМС.

**Достовірність отриманих результатів** забезпечується коректним використанням математичних методів теорії подібностей та розмірностей фізичних величин, електромеханічних аналогій у математичних моделях компонентів МЕМС, матрично-векторних операцій та марківських процесів, байєсівських статистичних рішень для вибору варіанта технологічного процесу, теорії напружено-деформованого стану матеріалів і елементів МЕМС.

### **Новизна результатів дисертації**

До наукової новизни належать наступні результати:

1. Вперше мікроелектромеханічні системи пропонується розглядати на основі конвергенції різних фізичних явищ в мікромініатюрних виробках з урахуванням зменшення лінійних розмірів компонентів і зміни співвідношень дії різних видів сил, що дає можливість об'єднання декількох особливостей різних фізичних явищ в одному компоненті для створення принципово нових технічних рішень, компонентів МЕМС для поліпшення техніко-економічних показників виробництва.

2. Вперше запропоновано фізико-технологічний метод створення багатозондових контактних пристроїв (БКП) для контролю електричних параметрів багатошарових комутаційних плат, а також вихідного і



функціонального контролю електронних компонентів з матричними кульковими виводами, який ґрунтується на поєднанні технологій полімерних шлейфів, матричних кулькових виводів і пресування через повітряну подушку, забезпечує підвищення щільності розміщення зондів на площині, надійність контактування і інтелектуальні властивості, що виключає помилки контролю.

3. Вперше запропоновано принципово нову технологію виготовлення БКП для автоматичного контролю МКП і електронних компонентів з матричними кульковими виводами типу BGA / CSP шляхом синтезу технології виробництва шлейфів на плівковому носії, технології виробництва матричних кулькових виводів і технології пресування з повітряною подушкою, що дозволяє підвищити надійність контролю.

4. Отримали подальший розвиток:

– метод створення МЕМС шляхом синтезу положень аналітичної і теоретичної механіки, електроніки і врахування впливу масштабних факторів, що створює практичну базу для розрахунку компонентів МЕМС з використанням положень механіки і електротехніки;

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

– положення теорії байєсівських статистичних рішень для вибору кращого варіанту серед альтернативних при розробці технологічних процесів;

– положення теорії марківських процесів з доходами, що дозволило оптимізувати стратегії моніторингу складних випадкових процесів;

– науково-обґрунтований метод прогнозування і розрахунку виходу придатних компонентів МСТ на основі базових елементів конструкції, який дозволяє враховувати вплив технологій виготовлення, конструкцій, матеріалів, обладнання та організаційних вимог виробництва на вихід придатних;

– математичні моделі чутливих елементів на основі балок складної конструкції, резонаторів у вигляді зустрічно-штирьових систем,



п'єзоперетворювачів механічної енергії в електричну, що дозволяють поліпшити електрофізичні властивості компонентів.

Результати та висновки кандидатської дисертації здобувача не включено до результатів докторської дисертаційної роботи.

### **Повнота викладення основних результатів дисертації в наукових виданнях**

Всі результати дисертації опубліковані в 57 наукових працях здобувача, з яких 1 монографія та 2 підручника для ВНЗ (у співавторстві), 34 статті у фахових виданнях з технічних наук (26 – в фахових виданнях України з технічних наук, 4 входять до міжнародних наукометричних баз (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, РИНЦ), 19 публікацій у збірниках матеріалів і тез доповідей науково-технічних конференцій, 9 патентів України.

### **Апробація наукових результатів**

Результати пройшли апробацію на низці конференцій в Україні та за кордоном, з яких можна виділити The International Workshop on Optoelectronics, Physics and Technology (м. Харків), Радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (м. Харків, м. Одеса, м. Судак), міжнародну наукову конференцію «Функціональна база наноелектроніки» (м. Кацівелі, м. Харків), The International Workshop East-West Design and Technology Systems (Харків), VII Міжнародний симпозіум «Фундаментальные и прикладные проблемы науки» (м. Москва) – всього на 19 МНК. Матеріали дисертаційної роботи також обговорювалися на науково-технічних семінарах Харківського національного університету радіоелектроніки.

### **Важливість для науки одержаних автором результатів**

Теоретична цінність отриманих В.А. Палагіним результатів полягає в розробці методологічних основ розробки мікромеханічних систем, що ґрунтуються на конвергенції фізичних явищ, враховують зменшення лінійних



розмірів та зміну співвідношення дії внутрішніх сил, і, як результат, дозволяють розробляти нові технічні рішення поліпшення електрофізичних характеристик мікрокомпонентів та їх техніко-економічних показників.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблені методологічні основи проектування технологічних процесів виробництва компонентів МЕМС забезпечують ефективний вибір технологій виготовлення МЕМС за показниками мінімальних втрат, вибір оптимальної стратегії моніторингу ТП, прогнозування виходу придатних компонентів.

Впровадження теоретичних та практичних результатів дисертаційної роботи дозволяє підвищити ефективність проектування технології виробництва компонентів МЕМС.

#### **Рекомендації щодо використання результатів дисертації**

Запропоновані автором методологічні основи розробки МЕМС доцільно використати для розробки нових конструкторсько-технологічних рішень виробів мікросистемної техніки для поліпшення електрофізичних характеристик мікрокомпонентів та їх техніко-економічних показників.

Розроблені метод і технологію створення МЕМС багатозондових підмикальних пристроїв доцільно використати для контролю електричних параметрів багат шарових комутаційних структур, вихідного та функціонального контролю електронних компонентів. Отримані результати також можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці спеціалістів у галузі мікросистемної техніки.

#### **Відповідність дисертації встановленим вимогам**

При загальній оцінці докторської дисертаційної роботи, слід зазначити, що вона є завершеним і цілісним дослідженням з чіткою структурою і логічним викладом матеріалу, узагальнює дослідження автора, написана сучасною науково-технічною мовою.



Оформлення дисертації проведено згідно з вимогами п. 11, п. 12, п. 14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника». Стиль викладу матеріальних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність її сприйняття.

#### **Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації**

Оформлення автореферату за своїм обсягом, структурою та змістом відповідає чинним вимогам п. 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника».

Зміст автореферату повністю розкриває зміст основних наукових положень дисертаційної роботи.

#### **Зауваження по роботі.**

Дисертація має такі недоліки:

1. Надто великим є об'єм оглядової частини 1-го та, частково, 2-го розділів дисертаційної роботи.

2. Розділ 1 має назву «Аналіз рівня розвитку мікроелектромеханічних систем», але переважно містить огляд матеріалів МЕМС, увага конструктивно-технологічним рішенням приділяється недостатньо.

3. З викладу у розділі 3 математичної моделі мікробалок не зрозуміло, чи є така модель характерною для МЕМС і чим вона відрізняється від опису більших об'єктів.

4. Значне місце в роботі займає опис методу прийняття рішень для вибору стратегії моніторингу ТП, але вона не підкріплюється прикладами, які пояснюють сутність та переваги обраного методу.

5. У підрозділі 6.4 «Моделювання напружено-деформованого стану...» наводяться лише вихідні дані для моделювання, в той же час результати описано в недостатній мірі.



6. Викликає сумнів використання терміну «незвичайні фізичні явища» в авторефераті та тексті дисертації, зокрема у формулюванні наукової новизни.

7. В тексті дисертаційної роботи присутні окремі похибки та друкарські помилки, відхилення від стандартів оформлення.

Але, незважаючи на вказані зауваження, здійснені в дисертаційній роботі дослідження є новими, змістовними і корисними.

### **Загальні висновки по дисертаційній роботі.**

Тема і зміст дисертації В.А. Палагіна відповідають паспорту спеціальності 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки, зокрема п. 1, п. 2, п. 3.

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням і містить нові науково обґрунтовані результати, що є суттєвим внеском у галузі проектування технологій виробництва компонентів мікроелектромеханічних систем.

Отримані наукові результати мають важливе значення для розв'язання практичних задач проектування мікросистемної техніки.

Автореферат оформлений згідно діючих вимог, що висуваються до докторських дисертацій, повністю розкриває сутність дисертації та коректно описує одержані наукові результати та висновки у дисертаційній роботі.

Вважаю, що за актуальністю теми, ступеню обґрунтованості і достовірності результатів, наукової новизни і практичному значенню дисертаційна робота Палагіна Віктора Андрійовича «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.

Вважаю, що за актуальністю теми, ступеню обґрунтованості і достовірності результатів, наукової новизни і практичному значенню 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.

Заступник Генерального директора

ДП «Науково-дослідний технологічний інститут

приладобудування» м. Харків,

Заслужений діяч науки і техніки України,

доктор технічних наук, професор



В.Є. Овчаренко