

ВІДГУК

офіційного опонента
доктора технічних наук, професора
Ситнікова Валерія Степановича
на дисертаційну роботу
Базіла Костянтина Вікторовича

“Теорія побудови дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами для комп'ютерних систем критичного застосування”,
представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Дисертація Базіла К. В. присвячена розвитку теоретичних та практичних питань з удосконалення п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування шляхом створення нових та удосконалення існуючих моделей та методів синтезу дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, що в цілому представляють собою наукові основи проектування високоефективних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

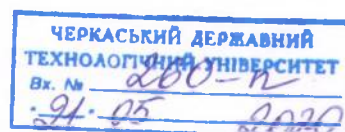
Актуальність теми досліджень, зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Однією з найпоширеніших тенденцій щодо розвитку комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування, відповідно до концепції Індустрія 4.0, є впровадження нових технологій, які мають безперечні переваги без зниження надійності в цілому. Останнє вимагає застосовувати до таких комп'ютерних систем та їх компонентів нові високоефективні методи проектування.

Основна перевага використання в комп'ютерних системах перетворювачів з п'єзокерамічних матеріалів з розділеними електродами обумовлюється їх особливою структурою, яка дозволяє реалізувати в одному такому елементі принципово різні схеми, при цьому ступінь інтеграції визначається числом функціональних елементів, об'єднаних в одному вузлі.

Існуючі підходи підвищення ефективності п'єзоелектричних перетворювачів, зокрема розширення робочого діапазону, підвищення чутливості та рівня вихідного сигналу п'єзоелектричних перетворювачів, вимагають неминучого компромісу з вимогами до мініатюризації цих перетворювачів, забезпечення яких є особливо важливим для об'єктів критичного застосування.

В дисертаційній роботі Базіла К. В. проведено розробку математичних моделей, а також методичного та технічного забезпечення процесу проектування високоефективних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування на основі п'єзоелектричних елементів з розділеними електродами.

Для контролю геометричних та механічних характеристик компонентів комп'ютерних систем використано метод атомно-силової мікроскопії, що дозволяє отримати більш повну інформацію про топологію та характеристики поверхонь компонентів комп'ютерних систем, а також дозволяє прогнозувати



термін їх надійної експлуатації та має суттєві переваги у порівнянні з іншими методами.

Тема роботи є важливою та актуальною, пов'язана з тематикою науково-дослідних робіт: “Створення та дослідження мономорфних та біморфних п'єзотрансформаторів для п'єзоелектричних перетворювачів механічних величин” (№ ДР 0109U002737), “Створення та дослідження методів та засобів розширення робочої смуги частот п'єзоелектричних перетворювачів” (№ ДР 0111U002940), “Розробка нової технології проектування і створення на її основі малогабаритних низькочастотних п'єзоелектричних перетворювачів для гідроакустики, електроакустики, комп'ютерної техніки, приладобудування” (№ ДР 0113U003349), “Розробка високоефективних багатокомпонентних електроакустичних перетворювачів з коливальними системами різної фізичної природи” (№ Ф56/GP/F56/02-2014), “Створення високоефективних мономорфних п'єзоелектричних перетворювачів для електро- і гідроакустики” (№ ДР 0115U000716), “Створення високоефективного інтелектуального комплексу для розробки та дослідження п'єзоелектричних компонентів для приладобудування, медицини та робототехніки” (№ ДР 0117U000936), “Розробка мобільного високоефективного ультразвукового хірургічного інструменту для військової та цивільної медицини” (№ ДР 0117U007474), “Розробка мобільного багатокомпонентного ультразвукового хірургічного інструменту з коливальними системами різної фізичної природи для військової та цивільної медицини» (№ GP/Ф75/201/2018).

Оцінка змісту та оформлення. Дисертаційна робота Базіла К. В. складається з анотації, змісту, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 432 сторінки, з обсягом основного тексту 310 сторінок. Дисертація містить 125 рисунків, 21 таблицю, список використаних літературних джерел з 250 найменувань, що займає 28 сторінок, та 3 додатки на 39 сторінках.

У **анотації** представлено основні результати роботи та список робіт автора за темою дисертації.

У **вступі** розкрито суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, об'єкт, предмет та методи досліджень, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, зазначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах.

У **першому розділі** проведено аналіз науково-прикладної проблеми, досліджено сучасний стан та вимоги до комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування, визначені особливості застосування п'єзоелектричних перетворювачів в комп'ютерних системах критичного застосування та тенденції їх розвитку, сформульовано мету та завдання досліджень. Показано, що стабільна робота комп'ютерних систем, особливо критичного застосування, багато в чому залежить від достовірності функціонування як програмної, так і апаратної частини

комп'ютерних систем. Невід'ємними елементами апаратної частини комп'ютерних систем, від характеристик яких значною мірою залежать точність і надійність їх роботи, є перетворювачі.

У **другому розділі** побудовано математичну модель електричного імпедансу коливального п'єзокерамічного диску, яка враховує радіальний і аксіальний компоненти вектору зміщення матеріальних частинок п'єзокераміки, що коливається в широкому діапазоні частот, та на цій основі розроблено метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, який, на відміну від відомих методів, дозволяє в рамках одного експерименту визначити три модуля пружності, два п'єзомодулі і одне значення діелектричної проникності для отримання змістовних і достовірних кількісних оцінок параметрів фізичного стану п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

У **третьому розділі** наведено результати теоретичних досліджень побудованих математичних моделей п'єзоелектричних перетворювачів з кільцевим та дисковим електродами в первинному електричному колі та багатосекційних дискових п'єзоелектричних перетворювачів. Запропонована схема побудови багатосекційних перетворювачів зберігає свою логічну конструкцію в широкому діапазоні значень числа секцій. Розглянуто особливості побудови математичних моделей багатосекційних перетворювачів, які виникають при груповому включенні секцій.

Показано, що для первинної оцінки частот максимальних значень коефіцієнта трансформації п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами можна використовувати результати розрахунку частот електромеханічних резонансів радіально коливального п'єзокерамічного диска.

Четвертий розділ присвячений теорії побудови дискових п'єзоелектричних перетворювачів з секторними електродами, принцип дії яких заснований на невісесиметричних планарних коливаннях тонкого п'єзокерамічного диска,

Автором запропонована схема побудови математичної моделі, яка дозволяє природним чином врахувати весь набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів реальної конструкції п'єзоелектричного перетворювача з розділеними електродами.

На основі проведених експериментальних досліджень виявлено, що в міру зменшення центрального секторного кута електрода число резонансів після першого вісесиметричного радіального резонансу зростає, і все більше число невісесиметричних мод починають приймати участь у формуванні напружено-деформованого стану перетворювача.

У **п'ятому розділі** автором розглянуто конструкцію і особливості математичного опису біморфного п'єзоелектричного перетворювача, принцип дії якого оснований на використанні вісесиметричних коливань поперечного вигину. Наведено розв'язок задачі про порушення коливань поперечного вигину в біморфному п'єзоелектричному перетворювачі

генератором з вихідним електричним опором за рахунок прикладання різниці електричних потенціалів.

Розроблено та досліджено п'єзоелектричні перетворювачі з розділеними електродами на основі біморфного п'єзоелектричного перетворювача з використанням енергосилового методу синтезу та методу додаткових елементів, зокрема, чутливість датчика тиску на основі поліелектродного п'єзоелектричного диску підвищено у 1,5-2 рази у порівнянні з перетворювачем традиційної конструкції.

У **шостому розділі** представлені результати АСМ (атомно-силової мікроскопії) досліджень поверхонь п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування, аналіз яких дозволив встановити, що в процесі тривалої експлуатації відбувається руйнування їх поверхонь (збільшення мікронерівностей від 805...815 нм до 1130...1180 нм (поверхні отримані традиційним методом), а також від 180...210 нм до 680...710 нм (поверхні отримані методом термічного наплення у вакуумі), поява мікротріщин, відколів та інших мікрodefектів).

В результаті проведених досліджень та порівняння отриманих результатів було встановлено, що утворені за запропонованою технологією срібні покриття на п'єзоелектричних перетворювачах є більш рівномірними та однорідними в порівнянні з покриттями, отриманими у традиційний промисловий спосіб.

Також представлено перспективні напрямки подальшого розвитку методів та засобів проектування вискоефективних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних системах критичного застосування, проведено дослідження розроблених перетворювачів з розділеними електродами.

У **висновках** узагальнені наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

У **додатках** наведено схему побудови математичних моделей дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, а також представлено документи про практичне впровадження результатів.

Автореферат відповідає змісту дисертації та повністю відображає основні результати, які отримано здобувачам.

Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію, не виносяться на захист докторської дисертації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному.

1. Удосконалено математичну модель електричного імпедансу коливального п'єзокерамічного диску, що коливається в широкому діапазоні частот, та на цій основі розроблено метод експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, який, на відміну від відомих методів, дозволяє в рамках одного експерименту визначити три модуля пружності, два п'єзомодулі і одне значення діелектричної проникності для отримання змістовних і достовірних кількісних оцінок параметрів фізичного стану п'єзоелектричних перетворювачів.

2. Вперше побудовано математичні моделі п'єзоелектричних перетворювачів з кільцевим і дисковим електродами в первинному електричному колі та багатосекційних дискових п'єзоелектричних перетворювачів з можливістю групового включення секцій та з урахуванням негативного зворотного електроакустичного зв'язку та значень імпедансу електричного навантаження, що розширює можливість побудови багатофункціональних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

3. Вперше побудовано математичну модель дискового п'єзоелектричного перетворювача з секторними електродами, що містить мінімальне число спрощуючих реальну ситуацію припущень, і дозволяє виконувати прогнозування характеристик перетворювача, який працює на невісесиметричних планарних коливаннях.

4. Удосконалено математичну модель біморфного дискового п'єзоелектричного перетворювача з симетричним електричним навантаженням у вторинному електричному колі, що, спираючись на фундаментальні принципи механіки та електродинаміки, дозволяє враховувати геометричні, фізико-механічні та електричні параметри реальної конструкції п'єзоелектричного перетворювача, принцип дії якого заснований на використанні вісесиметричних коливань поперечного вигину.

5. Отримали подальший розвиток методи модифікації дискових п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування шляхом використання поліелектродної конструкції, технології додаткових елементів, просторової енергосилової структури п'єзоелектричних перетворювачів, технології термовакuumного наплення, що забезпечує можливість синтезу таких п'єзоелектричних перетворювачів з покращеними характеристиками.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації. Викладені в дисертаційній роботі положення, а також отримані автором теоретичні та практичні результати роботи мають належний ступінь обґрунтованості. Достовірність викладених в дисертації основних наукових положень висновків та результатів, отриманих здобувачем, забезпечується коректними постановками задач, методами розв'язку та експериментальною перевіркою розроблених моделей, а також даними, отриманими при впровадженні результатів дисертаційної роботи, достатньою апробацією на науково-практичних конференціях.

Практичне значення наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації. Результати дисертаційного дослідження становлять наукову основу для технічної реалізації та впровадження у виробництво та навчальний процес методичного, математичного та технічного забезпечення процесу проектування перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування на основі п'єзоелектричних елементів з розділеними електродами. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблені методи та моделі, схемні та конструктивні рішення розширили науково-технічну базу проектування дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами для комп'ютерних систем критичного застосування;

- розроблено метод проведення та обробки результатів експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки (спосіб визначення фізико-механічних констант п'єзокерамічних матеріалів захищений патентом України на корисну модель № 119993), що дозволило отримати змістовні і достовірні кількісні оцінки параметрів фізичного стану п'єзоелектричних елементів та підвищити точність їх характеристик у 2-2,5 рази;

- створено алгоритм та програмно реалізовано математичні моделі дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, що дозволило оцінювати характеристики п'єзоелектричних перетворювачів з урахуванням негативного зворотного електроакустичного зв'язку та значень імпедансу електричного навантаження, які раніше не враховувалися, та зменшити відносну похибку на 2 – 3%;

- запропоновано нові схемотехнічні рішення п'єзоелектричних перетворювачів поліелектродної конструкції (трансформаторного типу) з використанням технології додаткових елементів та просторової енергосилової структури (п'єзоелектричні перетворювачі захищені патентами України на корисну модель №№ 67640, 97752), використання яких дозволило підвищити рівень вихідного сигналу на 15-20 дБ порівняно з перетворювачами, побудованими за традиційною схемою;

- отримано зразки дискових п'єзоелектричних перетворювачів з нанесеними методом термовакуумного напилення струмопровідними електродами, якість та експлуатаційні характеристики яких підтверджено методом АСМ.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, а також розроблене методичне та технічне забезпечення знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах ПрАТ “Укрп’єзо” (м. Черкаси), ТОВ “Лілея” (м. Київ) та ПП “Сенсорна електроніка” (м. Черкаси).

Використання технологічних рекомендацій та розроблених методів експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки,

енергосилового методу синтезу п'єзоелектричних перетворювачів, технології додаткових елементів, побудованих математичних моделей розроблених п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами дозволило підвищити точність їх характеристик у 2-2,5 рази, зменшити відносну похибку на 2 – 3%, підвищити чутливість датчику у 1,5-2 рази; підвищити рівень вихідного сигналу на 15-20 дБ, а також отримати річний економічний ефект 250 тис. гривень.

Отримані у дисертаційній роботі результати використовуються у навчальному процесі при читанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять, виконанні курсових та дипломних проектів з дисциплін "Спеціальні технології виробництва приладів", "Методологія наукових досліджень", "Процеси та обладнання мікротехніки", "Діагностика та надійність автоматизованих систем", "Основи моделювання технічних систем", "Проектування електромеханічних вузлів робототехнічних систем", "Механічні, електричні та магнітні вимірювання", "Автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи" у НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" та Черкаському державному технологічному університеті (підтверджено актами впровадження).

Повнота викладу основних результатів у наукових виданнях та їх апробація. Основні результати дисертаційної роботи відображено у 60 наукових працях, у тому числі: 2 монографіях, 35 статтях у наукових фахових виданнях (з яких 4 статті у виданнях іноземних держав та 4 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science), 8 патентах України на корисну модель, 14 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 1 статті у інших виданнях.

Відповідність дисертаційної роботи спеціальності. Зміст дисертаційної роботи відповідає паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, та напряму досліджень: теоретичні основи створення та вдосконалення високоефективних технічних і програмних компонентів комп'ютерних систем.

Загальна оцінка дисертації. Загальний зміст і структура дисертації Базіла К.В. має чітке теоретико-практичне спрямування на створення нових та удосконалення існуючих моделей та методів синтезу високоефективних дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами для комп'ютерних систем критичного застосування.

Дисертація містить коректно отримані та обґрунтовані нові наукові положення. Це підтверджується кількістю публікацій (60 найменувань).

Наукова робота добре оформлена і відповідає правилам та вимогам, що висуваються до докторських дисертацій. Усі наукові положення опубліковані і повністю розкривають зміст дисертації. Автореферат оформлено належним чином, а його зміст відповідає змісту дисертаційної роботи.

Зважаючи на це, дисертаційна робота Базіла К.В. повністю відповідає

вимогам Міністерства освіти і науки України до докторських дисертацій.

Зауваження до роботи

До недоліків та зауважень щодо дисертаційної роботи К.В. Базіла можна віднести наступні.

1. У першому розділі дисертаційної роботи не в достатній мірі формалізовано цілі дисертаційного дослідження.

2. Автором роботи не у всіх пунктах практичної цінності представлено чисельні показники технічних переваг отриманих результатів, що не дозволяє в повній мірі оцінити їх ефективність.

3. У роботі розглядається варіант створення енергосилової структури дискових п'єзоелектричних перетворювачів з поляризацією по товщині. Разом із тим вважається доцільним розглянути й інші варіанти поляризації.

4. Для п'єзоелектричних перетворювачів, що працюють на невісесиметричних планарних коливаннях, не визначено процедуру вибору величини центрального кута сектора.

5. Підписи блоків структурних схем пристроїв, які розробляються в роботі, не є уніфікованими, що ускладнює їх розуміння (наприклад, рис. 2.12 стор. 148, рис. 6.3 стор. 329).

6. Бажано було б більш детально підтвердити факт і повноту розв'язання поставленої в дисертації проблеми, за рахунок використання отриманих результатів роботи. Наведення певних кількісних показників досягнутого ефекту дало б більш наочне представлення про ступінь розв'язання проблеми створення високоефективних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування.

7. В дисертаційній роботі недостатньо відображені наочні результати апаратної реалізації розроблюваного методу експериментального визначення матеріальних констант п'єзокерамічних перетворювачів (не наведені зображення зовнішнього вигляду).

8. Деякі матеріали дисертаційної роботи (наприклад, за п. 5.1), що відносяться до відомих фактів з теорії поперечного вигину круглих пластин, доцільніше було б навести у додатках.

9. Серед зауважень до тексту автореферату слід виділити наступне: на стор. 12 автореферату в описі запропонованого методу експериментального визначення матеріальних констант п'єзокерамічних перетворювачів відсутній докладний опис результатів проведеного дослідження.

Проте зазначені зауваження не стосуються принципових положень дисертаційної роботи Базіла Костянтина Вікторовича, не зменшують значимість отриманих наукових результатів і не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

Відповідність дисертації встановленим вимогам і загальні висновки.

На підставі вивчення дисертації, автореферату та наукових праць здобувача, які опубліковано за темою дисертації, наукові результати та висновки, що отримано автором, можна вважати вірними та оцінити позитивно.

Дисертаційна робота Базила К.В. є ґрунтовним науковим дослідженням, в якому вирішується важлива науково-прикладна проблема створення високоефективних п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування з одночасним підвищенням ступеня інтеграції та гібридизацією експлуатаційних властивостей шляхом створення нових та удосконалення існуючих моделей та методів синтезу дискових п'єзоелектричних перетворювачів з розділеними електродами, що в цілому представляє наукові основи проектування п'єзоелектричних компонентів комп'ютерних систем критичного застосування.

Робота відповідає спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертаційної роботи.

Вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, які висуваються до докторських дисертацій, а її автор – Базило Костянтин Вікторович заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри комп'ютерних систем
Одеського національного політехнічного університету
д-р техн. наук, професор

В.С. Ситніков

Підпис професора Ситнікова В.С. засвідчую

Царенко О.М.

Александров В.В.