

В І Д Г У К

офіційного опонента на дисертаційну роботу
на тему «**Акустoeлектронні перетворювачі з безконтактними електрично
пов'язаними чутливими елементами**», представленої
Жовніром Миколою Федоровичем на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю
05.27.01– твердотільна електроніка

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Підвищення чутливості і точності вимірювальних систем вимагає установа таких технічних вимог, які не можуть бути забезпечені в багатьох випадках традиційними первинними перетворювачами (резистивними, п'єзoeлектричними, ємнісними, гальваномагнітними, електромагнітними, фотоелектричними, акустооптичними та іншими), технічні параметри яких досягли своїх граничних можливостей. І тому проводяться дослідження по створенню мікроелектронних і наноелектронних перетворювачів, перетворювачів з використанням пристроїв на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) та інш., які забезпечували б необхідні метрологічні параметри сучасної вимірювальної техніки.

В останні роки велика увага приділяється акустoeлектронним перетворювачам (АЕП) з використання ПАХ-пристроїв як для стаціонарних, так і безпроводних радіовимірювальних систем контролю температури, вологості, сили і тиску, складу газового середовища, переміщення, швидкості та прискорення, крутного моменту, напруженостей електричного та магнітного полів тощо. В основному наукові розробки та впровадження активних і пасивних перетворювачів фізичних величин з використанням ПАХ-пристроїв виконуються на основі зміни: фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини лінії затримки або резонатора внаслідок деформації звукопроводу або дії навколишнього середовища; коефіцієнта відбиття ПАХ від відбивальних решіток або зустрічно-штирових перетворювачів, що з'єднані із зовнішніми чутливими елементами, на які діють температура, вологість, електромагнітне випромінювання тощо.

В той же час в меншій мірі приділялася належна увага обґрунтуванню та практичній реалізації перетворювачів на основі використання електричного

поля поверхневих акустичних хвиль, що поширюються на п'єзоелектричних структурах. Тому тема дисертації, в якій запропоновані нові конструктивні рішення, проведені теоретичні та експериментальні дослідження, які підтверджують можливість створення нового підкласу високочутливих АЕП на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, що поширюються в лінійних і кільцевих п'єзоелектричних звукопроводах та хвилеводах, є актуальною.

Метою дисертації є теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на створення нового підкласу високочутливих первинних перетворювачів фізичних величин з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, що поширюються на п'єзоелектричних структурах.

2. Наукова новизна одержаних результатів

2.1. Вперше запропоновано, теоретично обґрунтовано та реалізовано метод вимірювання лінійних (кутових) переміщень на основі використання фазових набігаш на поверхні лінійних (кільцевих) п'єзоелектричних структур електричного поля кількох ПАХ на різних частотах, які приймаються безконтактним електрично пов'язаним ПАХ-приймачем.

2.2. Вперше запропоновано та теоретично обґрунтовано метод вимірювання кутової швидкості з використанням ефекту Доплера при обертанні ПАХ-приймача в електричному полі ПАХ, що поширюється в кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі.

2.3. Вперше запропоновано, теоретично обґрунтовано та реалізовано метод вимірювання мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості ПАХ при збуренні мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, що поширюється на п'єзоелектричних структурах.

2.4. Вперше створені та досліджені математичні моделі первинних перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень та тиску на основі використання електричного поля ПАХ, які поширюються на п'єзоелектричних структурах.

2.5. Створена модифікована математична модель плівкового п'єзоелектричного ПАХ-хвилеводу з використанням апроксимації результатів вимірювання фазової швидкості ПАХ в необмеженій плівковій структурі оксид цинку-плаваний кварц, яка дозволяє визначати умови забезпечення

одномодового режиму поширення ПАХ в плівкових хвилеводних п'єзоелектричних структурах.

2.6. Теоретично обґрунтовано схемо-технічні принципи побудови та конструкції пасивних ПАХ-перетворювачів фізичних величин з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами для безпровідних радіовимірювальних систем контролю лінійних, кутових переміщень, мікропереміщень, тиску та ідентифікації об'єктів.

3. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків роботи забезпечено бібліографічним аналізом науково-технічної та патентної літератури, коректною постановкою задач та їх вирішенням, результатами фізико-топологічним моделюванням і чисельних розрахунків з використанням розроблених математичних моделей акустоелектронних перетворювачів, дослідження їх характеристик та шляхів удосконалення конструкцій, результатами експериментальних випробувань виготовлених макетів з використанням промислової вимірювальної апаратури та методів статистичної обробки результатів вимірювань, обговоренням результатів роботи на міжнародних та вітчизняних конференціях.

4. Оцінка змісту та завершеності дисертації

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульовані основна мета та задачі роботи для її досягнення, показано наукове і практичне значення отриманих результатів, приведені наукова новизна, зв'язок з плановими завданнями та державними програмами, зазначено особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів досліджень та наукові публікації за темою.

Перший розділ дисертації присвячено порівняльному огляду фізико-технічних основ побудови та порівняння метрологічних параметрів перетворювачів фізичних величин, в результаті якого обґрунтована доцільність створення активних та пасивних перетворювачів на основі використання пристроїв на ПАХ, які дозволяють забезпечити високі значення коефіцієнтів перетворення та роздільної здатності визначення фізичних величин в широких динамічних діапазонах.

В результаті аналізу сформульовано завдання теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих:

- на розробку методів вимірювання та схемо-технічних принципів побудови акустоелектронних перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень та тиску на основі використання електричного поля ПАХ, що поширюються на поверхні п'єзоелектричних структур;
- на розробку математичних моделей перетворювачів, на основі яких можна було би визначати вимоги до конструктивних та електричних параметрів у залежності від метрологічних характеристик перетворювачів;
- на розробку макетів акустоелектронних перетворювачів, їх складових модулів та проведення експериментальних досліджень;
- на розробку схемо-технічних принципів побудови та конструкцій пасивних перетворювачів на основі використання електричного поля ПАХ для безпроводних радіовимірювально-інформаційних систем.

У другому розділі приведено результати розробки методів вимірювання лінійних, кутових переміщень та швидкості з використанням електричного поля поверхневих акустичних хвиль, які поширюються на поверхні п'єзоелектричних структур.

Теоретично обгрунтовано метод вимірювання лінійних та кутових переміщень з високим коефіцієнтом перетворення в діапазоні до 100 мм і вище (360 кут. град.) з використанням фазових набігань на поверхні лінійних та кільцевих п'єзоелектричних структур електричного поля кількох ПАХ на різних частотах, які приймаються безконтактним ПАХ-приймачем. Показано, що метрологічні параметри таких перетворювачів близькі до параметрів індуктосинів, фотоелектричних перетворювачів та пристроїв на основі інтерферометрів та, на відміну від них, мають простішу конструкцію та значно менші масогабаритні показники.

Теоретично обгрунтовано метод вимірювання кутової швидкості з використанням ефекту Доплера при обертанні ПАХ-приймача в електричному полі ПАХ, яка поширюється в кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі. Показано, що на основі запропонованого методу можливо створювати широкодіапазонні високочутливі перетворювачі кутової швидкості, які будуть мати просту конструкцію та значно менші масогабаритні показники у

порівнянні з тахогенераторами, електромагнітними та фотоелектричними перетворювачами.

Для первинних перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості з використанням електричного поля ПАХ створені та досліджені математичні моделі на основі моделі Λ -джерел, які дозволяють визначати конструктивні параметри перетворювачів на основі лінійних та кільцевих п'єзоелектричних звукопроводів (хвилеводів), безконтактних розподілених ПАХ-приймачів та електричних параметрів задавальних генераторів у залежності від заданих метрологічних характеристик перетворювачів.

У третьому розділі дисертації надано результати розробки модифікованої математичної моделі плівкового п'єзоелектричного ПАХ-хвилеводу з використанням апроксимації результатів вимірювання фазової швидкості ПАХ в необмеженій плівковій структурі оксид цинку-плавлений кварц. Виконано математичне моделювання, в результаті якого визначено вимоги до конструктивних параметрів хвилеводу, концентратора та зустрічно-штирових перетворювачів акустоелектричного модуля на ПАХ, які забезпечують одномодовий режим поширення ПАХ. Приведені результати експериментальних випробувань лінійних та кільцевих плівкових п'єзоелектричних хвилеводів на лазерній установці гомодинного типу підтвердили можливість використання їх в акустоелектронних перетворювачах.

У четвертому та п'ятому розділах дисертації надано результати проектування та експериментального випробування 3-х частотного генераторного блоку, який призначений для збудження ПАХ в п'єзоелектричних звукопроводах та хвилеводах, та 3-х частотного блоку підсилення та фільтрації вихідного сигналу безконтактного ПАХ-приймача акустоелектронних перетворювачів. Генераторний блок побудований із 3-х ПАХ-генераторів з ЛЗ на ПАХ на основі кварцу ST -зрізу з секційним зустрічно-штировим перетворювачем, що дозволило забезпечити необхідні електричні параметри та високу термостабільність.

3-х частотний блок підсилення та фільтрації вихідного сигналу ПАХ-приймача побудовано з використанням 3-х ПАХ-фільтрів на основі кварцу ST -зрізу, вхідний та вихідний зустрічно-штирові перетворювачі яких сформовано за допомогою фазового зважування за функцією Хеммінга, що дозволило

приблизити розрахункові і експериментальні параметри за рахунок мінімізації різного роду вторинних паразитних ефектів і забезпечити мінімальні втрати.

Шостий розділ присвячений результатам експериментальних випробувань макетів акустоелектронних перетворювачів лінійних та кутових переміщень на основі використання фазового набігання електричного поля на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу (хвилеводу) ПАХ на 3-х частотах, які приймаються безконтактним ПАХ-приймачем.

Експериментально визначено залежності вихідного сигналу безконтактного ПАХ-приймача від зазору між поверхнею п'єзоелектричного звукопроводу і ПАХ-приймачем та градувальні характеристики, в результаті чого визначені метрологічні параметри 3-х частотних перетворювачів лінійних переміщень із звукопроводом на базі ніобат літію YZ -зрізу і плівкової п'єзоелектричної структури оксид цинку-плаваний кварц та перетворювача кутових переміщень з кільцевим ПАХ-хвилеводом на основі структури оксид цинку-плаваний кварц та секційним ПАХ-приймачем.

Результати випробувань підтвердили теоретичні обґрунтування можливості створення високочутливих акустоелектронних перетворювачів лінійних (кутових) переміщень з коефіцієнтом перетворення вище 7,0 ел.град./мкм (0,5 ел.град./кут.сек.) в діапазоні до 100 мкм і вище (до 360 кут.град.).

Показано, що при представленні результатів вимірювання 22 розрядами двійкового коду отримаємо ціну розрядів на: точній шкалі (11 розрядів) – 0,022 мкм (0,31 кут. сек); на проміжній шкалі (6 розрядів) – 46 мкм (632,81 кут. сек); на грубій шкалі (5 розрядів) – 2,944 мкм (11, 25 кут град).

У сьомому розділі надано результати теоретичних та експериментальних досліджень метода вимірювання мікропереміщень та тиску на базі використання дисперсії фазової швидкості поверхневих акустичних хвиль в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, що поширюються на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу.

Розроблені та досліджені фізико-математичні моделі акустоелектронних перетворювачів, які дозволяють обґрунтовувати вимоги до конструктивних та електричних параметрів в залежності від заданих метрологічних параметрів.

Акустоелектронні перетворювачі на основі використання дисперсії фазової швидкості доцільно проектувати на базі універсального ПАХ-модуля, а

конструкція чутливого елемента – мембрани (зонда) визначається заданим динамічним діапазоном фізичної величини. Такі перетворювачі можуть використовуватися для вимірювання мікропереміщень, прискорення, сили, тиску, а також в якості приймача акустичних сигналів.

Восьмий розділ присвячено результатам теоретичних досліджень запропонованих конструкцій пасивних перетворювачів на ПАХ та їх елементів для радіовимірювальних безпроводних систем.

Запропонована, обґрунтована конструкція та проведено дослідження можливості створення пасивної радіомітки з використанням запропонованого вхідного/вихідного ЗШП, яка забезпечує ідентифікацію великої кількості об'єктів.

Для безпроводних радіовимірювальних систем запропоновано та обґрунтовано використання: пасивного перетворювача мікропереміщень та тиску з використанням дисперсії фазової швидкості в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ; пасивного перетворювача лінійних та кутових переміщень з безконтактною відбивальною системою ПАХ, що переміщується в електричному полі ПАХ.

Робота завершується висновками, результати підтверджуються відповідними протоколами випробувань та актами впровадження.

Матеріали основної частини дозволяють зробити висновок, що дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною роботою.

5. Значення одержаних результатів для науки і практики та рекомендації щодо їх можливого використання

Отримані результати характеризуються теоретичною та практичною значущістю. Запропоновані методи, конструкції, математичні моделі, результати випробувань, висновки та рекомендації можуть бути використані:

– для розробки дослідницьких зразків високочутливих акустoeлектронних перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, які поширюються на п'єзoeлектричних структурах, з безконтактним ПАХ-приймачем;

– для розробки дослідницьких зразків високочутливих перетворювачів мікропереміщень, прискорення, сили, тиску, акустичних сигналів з

використанням дисперсії фазової швидкості ПАХ в результаті збурення мембраною електричного поля ПАХ;

– для проектування пасивних ПАХ-перетворювачів мікропереміщень, тиску, прискорення, сили, лінійних та кутових переміщень для безпроводних радіовимірювальних систем.

6. Повнота викладення в опублікованих працях

За темою дисертації здобувачем опубліковано 65 наукових праць, у тому числі 8 одноосібних; зокрема: 24 статті в наукових фахових виданнях (з них 1 стаття в іноземному виданні, 12 статей у виданнях України, які внесли до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти на винаходи та 9 патентів на корисні моделі; 28 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференцій та 2 статті в інших виданнях, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист.

Обсяг результатів наукової роботи є достатнім. Кількість публікацій, обсяг, якість, повнота висвітлення результатів та розкриття змісту дисертації відповідає вимогам Міністерства освіти України. Зазначені публікації повною мірою висвітлюють наукові положення дисертації.

Результати роботи апробовані на міжнародних та вітчизняних наукових конференціях та семінарах.

Тематика наукових конференцій, на яких відбувалась апробація дисертаційного дослідження, характер статей здобувача, в яких відображено наукові положення дисертації і результати проведених досліджень повною мірою розкривають дослідницьку задачу.

Дисертація пройшла належну апробацію, є самостійною науковою працею, що має завершений характер.

7. Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

Автореферат за структурою та змістом відповідає вимогам, що ставляться МОН України до авторефератів дисертаційних робіт. У тексті автореферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого Жовніром М.Ф. дисертаційного дослідження. Зміст автореферату та основних положень дисертації є ідентичним.

8. Загальні зауваження по роботі

1. Об'єм дисертації можна було би зменшити за рахунок скорочення порівняльного аналізу традиційних перетворювачів фізичних величин (розділ 1, підрозділ 1.1).

2. Недостатньо висвітлено технологічні проблеми забезпечення необхідного зазору між ПАХ-приймачем та поверхнею п'єзоелектричного звукопроводу (хвилеводу).

3. На сучасному рівні техніки бажано було би розробляти електронні блоки (3-х частотний генераторний блок, 3-х частотний блок підсилення та фільтрації вихідного сигналу рухомого ПАХ-приймача) не на дискретних елементах, а з використанням сучасної мікроелектронної технології.

4. Недостатньо розглянута робота електронного блоку обробки інформації перетворювачів лінійного та кутового переміщення (рис. 2.1, поз. 13), в якому здійснюється формування точної, проміжної та грубої вимірювальних шкал.

5. Для покращення роздільної здатності та зменшення похибки при проведенні випробувань перетворювачів лінійних та кутових переміщень необхідно було би використати не аналогові фазометри, а цифрові вимірювачі фазових зсувів, які мають значно кращі метрологічні характеристики.

6. В тексті дисертації зустрічаються незначні огріхи в її оформленні. В літературних посиланнях зустрічається деяка невідповідність до правил бібліографічних скорочень.

Однак, це не зменшує значимість виконаної роботи – результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень показують перспективи використання запропонованого підкласу акустоелектронних перетворювачів і дозволяють розширити галузі їх застосування, а розробка та впровадження всіх електронних блоків перетворювачів може в подальшому базуватися на сучасних технологічних процесах.

9. Загальна оцінка дисертації

Дисертація на тему «Акустоелектронні перетворювачі з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами» є закінченим науковим дослідженням і містить нові теоретичні і практичні результати розв'язання актуальної проблеми створення малогабаритних високочутливих перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень

та тиску для стаціонарних та безпроводних радіовимірювально-інформаційних систем.

Вважаю, що дисертація «Акустоелектронні перетворювачі з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами» в повній мірі відповідає вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, що висуваються до докторських дисертацій, а здобувач **Жовнір Микола Федорович** заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Офіційний опонент,

Завідувач кафедри напівпровідникової електроніки

Національного університету «Львівська політехніка»,

Заслужений діяч науки і техніки України,

Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,

доктор технічних наук, професор

А.О. Дружинін

Підпис проф. Дружиніна А.О. засвідчую:

Вчений секретар НУ «Львівська політехніка»

кандидат технічних наук, доцент



Р.Б. Брилинський