

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Жовнір Микола Федорович



УДК 53.082.4; 681.586.4; 531.71;
531.74; 531.77; 531.78

**АКУСТОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З БЕЗКООНТАКТНИМИ
ЕЛЕКТРИЧНО ПОВ'ЯЗАНИМИ ЧУТЛИВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ**

Спеціальність 05.27.01 – твердотільна електроніка

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електронних приладів та пристроїв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Писаренко Леонід Дмитрович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри електронних приладів та пристроїв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Осінський Володимир Іванович,
ДП «Науково-дослідний інститут мікроприладів»
НТК «Інститут монокристалів» НАН України,
головний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор
Дружинін Анатолій Олександрович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри напівпровідникової електроніки

доктор технічних наук, професор
Осадчук Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки

Захист відбудеться **22 травня 2018 р. о 14 годині 30 хв.** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корпус № 12, ауд. 412

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 29 » березня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої
ради Д 26.002.08, канд. техн. наук, доцент



В.Г.Артюхов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Необхідність у підвищенні чутливості і точності вимірювання фізичних величин (ФВ) призводить до установа таких технічних вимог до вимірювальних пристроїв та систем, які не можуть бути забезпечені традиційними вимірювальними перетворювачами (ВП) на відомих фізичних ефектах. Технічні параметри традиційних ВП (резистивних, п'єзоелектричних, ємнісних, гальваномагнітних, електромагнітних, фотоелектричних (оптоелектронних), акустооптичних та інших) практично досягли своїх граничних можливостей і подальше їх удосконалення можливо шляхом створення первинних перетворювачів (ПП) з використанням нових фізичних ефектів. Особливо зросла роль ПП при створенні сучасних інформаційно-вимірювальних і навігаційних комплексів. Крім вимог до метрологічних параметрів, до ВП та систем висуваються жорсткі умови до зменшення маси і габаритів та розширення динамічного діапазону, що призводить також до значного збільшення об'єму інформації, який необхідно виміряти, обробити та відобразити.

Проведені дослідження можливості розробки нових високочутливих методів та схемо-технічних принципів побудови ПП на основі використання надвисокочастотних електромагнітних хвиль, поверхневих магнітостатичних хвиль, випромінювання оптичного діапазону і поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) показали, що акустоелектронні перетворювачі (АЕП) з використанням пристроїв на ПАХ та системи на їх основі у багатьох випадках мають ряд переваг: мала довжина хвиль при відносно невисоких частотах, можливість розподіленого приймання сигналу, наявність ефективних методів збудження та приймання сигналів в пристроях акустоелектроніки, можливість використання сучасної мікроелектронної технології, що сумісна з технологією виготовлення інтегральних мікросхем. Тому пристрої на ПАХ активно впроваджуються при створенні активних та пасивних ПП: 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 та пасивних ПП фізичних величин з використанням пристроїв на ПАХ виконуються на основі зміни:

- фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини резонатора або лінії затримки (ЛЗ) при деформації звукопроводу балочного або мембранного типу;
- фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини резонатора або лінії затримки при дії навколишнього середовища на поверхню звукопроводу (молекулярної ваги та концентрації газу, температури, вологості, електромагнітного випромінювання тощо);
- коефіцієнта відбиття ПАХ від відбивальних решіток або зустрічно-штирових перетворювачів, що сполучені із зовнішніми чутливими елементами, на які діють температура, вологість, електромагнітне випромінювання тощо.

В той же час не приділялася належна увага теоретичному обґрунтуванню та практичній реалізації АЕП з використанням електричного поля поверхневих акустичних хвиль, що поширюються на п'єзоелектричних структурах.

Тому, тема дисертаційної роботи, в якій теоретично обґрунтовано та експериментально реалізовано новий підклас високочутливих акустоелектронних перетворювачів фізичних величин (лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень та тиску тощо) з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, які поширюються на п'єзоелектричних структурах, є актуальною.

У дисертаційній роботі запропоновані нові конструктивні рішення, проведені теоретичні та експериментальні дослідження, які підтверджують можливість створення високочутливих акустoeлектронних перетворювачів на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, що поширюються в лінійних та кільцевих п'єзoeлектричних звукопроводах та хвилеводах:

- лінійних та кутових переміщень об'єкта в широких динамічних діапазонах на основі використання фазових набігань на поверхні п'єзoeлектричних структур електричного поля кількох поверхневих акустичних хвиль з різними частотами, які приймаються безконтактним ПАХ-приймачем, що переміщується в електричному полі ПАХ;

- кутової швидкості об'єкта на основі використання ефекту Доплера при переміщенні безконтактного ПАХ-приймача в електричному полі біжучої по кільцевому п'єзoeлектричному хвилеводу поверхневої акустичної хвилі;

- мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості поверхневої акустичної хвилі в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, що поширюється в п'єзoeлектричних структурах.

АЕП на основі використання електричного поля ПАХ можливо також застосовувати і у безпровідних вимірювально-інформаційних системах, робота яких заснована на розробці та впровадженні технології радіомітки на ПАХ та поєднанні її з традиційними конструкціями пристроїв на ПАХ, що розміщені у важкодоступних місцях (в елементах несучих конструкцій будівель, на роторах електродвигунів, в автомобільних шинах тощо). Тому, розробка та експериментальні дослідження акустoeлектронних перетворювачів з поліпшеними параметрами для таких систем є також актуальними.

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

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі електронних приладів та пристроїв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках держбюджетних та госпдоговірних робіт у відповідності з напрямком наукових досліджень кафедри та Державних програм:

1. Договір про науково-технічне співробітництво між Київським політехнічним інститутом і ЦКБ ПО «Завод Арсенал» від 18.12.1990 р. на тему «Дослідження вимірювальних перетворювачів переміщень на основі акустoeлектронних ефектів».

2. Державна космічна програма України на 1994-1997 роки, Р.8. «Транспортні космічні системи», затверджена Постановою КМУ № 371 від 07.06.1994 р. ДКР «Розробка перспективних методів та пристроїв для контролю теплофізичних і механічних параметрів виробів космічної техніки», держ. реєстр. № 0194U017926, держконтракт № 8-6/94 від 10.05.1994 р.

3. НДР «Дослідження фізичних, технологічних та інформаційних засад створення електронних приладів, пристроїв та систем», шифр ЕПП-1/2012, держ. реєстр. № 0112 U 005032 від 21.05.2012 р.

4. НДР «Дослідження вимірювальних перетворювачів фізичних величин на основі використання фазових набігань поверхневих акустичних хвиль», шифр ЕПП-3/2015, держ. реєстр. № 0115U006620 від 26.11.2015 р.

5. Договір про навчально-науково-технічну співпрацю між НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і Державним підприємством завод «Генератор» № 976 Р від 27.12.2016 р., який спрямований на створення електронних приладів та пристроїв на основі нових фізичних явищ та модернізації існуючих з використанням сучасної технологічної бази.

6. Договір про навчально-науково-технічну співпрацю між НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і Товариством з обмеженою відповідальністю «Фонтек-С» № 977 Р від 27.12.2016 р., який спрямований на створення перетворювачів фізичних величин на основі нових фізичних явищ.

У виконанні згаданих тем автор брав безпосередню участь.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження і розробка наукових основ, схемо-технічних принципів побудови високочутливих акустoeлектронних перетворювачів фізичних величин з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами та створення підґрунтя для розробки нового підкласу перетворювачів на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, які поширюються на п'єзоелектричних структурах.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні наукові задачі:

1. Проведення теоретичних та експериментальних досліджень з метою обґрунтування фізичних основ використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, які поширюються на поверхні п'єзоелектричних структур, для вимірювання фізичних величин з високою чутливістю.

2. Розробка високочутливих методів вимірювання лінійних, кутових переміщень та швидкості об'єктів на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, які поширюються на п'єзоелектричних структурах, з безконтактним електрично пов'язаним ПАХ-приймачем.

3. Розробка та дослідження математичних моделей первинних перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості на основі використання електричного поля ПАХ, які дозволяли би визначати вимоги до конструктивних та електричних параметрів у залежності від заданих метрологічних характеристик.

4. Розробка модифікованої математичної моделі п'єзоелектричного хвилеводу ПАХ на основі структури оксид цинку-плаваний кварц (ZnO-SiO_2 пл.), який використовується в якості індикаторної лінійки перетворювачів фізичних величин. По результатам теоретичних та експериментальних досліджень визначити критерії забезпечення одномодового режиму поширення ПАХ у хвилеводних структурах та їх придатності для використання в акустoeлектронних перетворювачах.

5. Розробка та випробування макетів 3-х частотного генераторного блока та 3-х частотного блока підсилення та фільтрації, що застосовуються відповідно для збудження ПАХ в п'єзоелектричних структурах та підсилення і фільтрації вихідного сигналу безконтактного ПАХ-приймача акустoeлектронних перетворювачів.

6. Розробка та випробування макетів акустoeлектронних перетворювачів лінійних та кутових переміщень на основі використання фазових набігань на поверхні п'єзоелектричних структур електричного поля кількох ПАХ з різними частотами, які приймаються безконтактним ПАХ-приймачем.

7. Розробка метода вимірювання мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості поверхневої акустичної хвилі в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, яка поширюється на п'єзоелектричних структурах.

8. Розробка та дослідження математичних моделей первинних перетворювачів мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості поверхневої акустичної хвилі в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, які дозволяли би визначати вимоги до конструктивних та електричних параметрів у залежності від заданих метрологічних характеристик.

9. Розробка та випробування макету акустоелектронного перетворювача мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості ПАХ в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ.

10. Запропонувати та теоретично обґрунтувати схемо-технічні принципи побудови та конструкції пасивних ПАХ-перетворювачів з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами для безпроводних радіовимірювальних систем контролю переміщення, тиску та ідентифікації об'єктів.

Об'єкт дослідження – акустоелектронні перетворювачі фізичних величин з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, які поширюються на п'єзоелектричних структурах.

Предмет дослідження – методи вимірювання фізичних величин; математичні моделі, параметри та конструкції первинних перетворювачів фізичних величин на основі використання електричного поля ПАХ, які поширюються на п'єзоелектричних структурах; плівкові п'єзоелектричні хвилеводи; моделювання хвилеводів та перетворювачів фізичних величин.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувалися: бібліографічний аналіз науково-технічної, патентної літератури та інформаційних матеріалів в базах даних в Інтернеті; методи математичної фізики; положення теорії пружності, теорії коливань та хвиль; фізико-топологічне моделювання і чисельні розрахунки, які використані для побудови математичних моделей перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень та тиску, дослідження їх характеристик та шляхів удосконалення конструкцій. Експериментальні дослідження виконані з використанням виготовлених макетів, промислової вимірювальної апаратури, методів статистичної обробки результатів вимірювань.

Наукова новизна. В дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально реалізовано новий підклас високочутливих акустоелектронних перетворювачів фізичних величин (лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень та тиску) з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль, які поширюються на п'єзоелектричних структурах.

2. Вперше запропоновано, теоретично обґрунтовано та реалізовано метод вимірювання лінійних (кутових) переміщень з високим коефіцієнтом перетворення в діапазоні до 100 мм і вище (до 360 кут. град.) на основі використання фазових набігань на поверхні лінійних (кільцевих) п'єзоелектричних структур електричного поля кількох ПАХ на різних частотах, які приймаються безконтактним електрично пов'язаним ПАХ-приймачем. Метрологічні параметри акустоелектронних перетворювачів, які забезпечуються використанням запропонованого метода, сумірні з параметрами електромагнітних і фотоелектричних перетворювачів та пристроїв на основі інтерферометрів та, на відміну від них, мають просту конструкцію і значно менші масогабаритні показники, що особливо важливо при їх використанні в рухомих високоточних інформаційно-вимірювальних і навігаційних комплексах.

3. Вперше запропоновано та теоретично обґрунтовано метод вимірювання кутової швидкості на основі використання ефекту Доплера при обертанні ПАХ-приймача в електричному полі ПАХ, що поширюється на п'єзоелектричному хвилеводі. На основі запропонованого методу може бути створений універсальний акустoeлектронний перетворювач кутової швидкості з високим коефіцієнтом перетворення в широкому динамічному діапазоні з метрологічними параметрами, які сумірні з параметрами електромагнітних та фотоелектричних перетворювачів та, на відміну від них, буде мати просту конструкцію.

4. Вперше запропоновано, теоретично обґрунтовано та реалізовано метод вимірювання мікропереміщень та тиску з високим коефіцієнтом перетворення на основі використання дисперсії фазової швидкості ПАХ в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, яка поширюється на п'єзоелектричних структурах. Такі перетворювачі можуть створюватися на базі універсального акустoeлектронного модуля з комплектом чутливих елементів – мембран (зондів), конструкція яких визначається заданим коефіцієнтом перетворення та діапазоном фізичної величини.

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

6. Вперше створені та досліджені математичні моделі первинних перетворювачів мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості поверхневих акустичних хвиль в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, які дозволяють визначати конструктивні та електричні параметри в залежності від заданих метрологічних характеристик перетворювачів.

7. Створена модифікована математична модель плівкового п'єзоелектричного ПАХ-хвилеводу з використанням апроксимації результатів вимірювання фазової швидкості ПАХ в необмеженій плівковій структурі оксид цинку-плавлений кварц (ZnO-SiO_2 пл.), яка дозволяє визначати конструктивні параметри хвилеводу, концентратора та зустрічно-штирових перетворювачів модуля на ПАХ для забезпечення одномодового режиму поширення ПАХ. Теоретичні дослідження та результати випробувань амплітудних та фазових характеристик ПАХ на установці лазерного зондування гомодинного типу підтверджують можливість використання плівкових п'єзоелектричних структур в АЕП фізичних величин.

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

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Результати проведених досліджень вносять істотний внесок у розуміння використання електричного поля ПАХ для створення нового підкласу високочутливих АЕП фізичних величин для стаціонарних та безпроводних радіовимірювальних систем, а створені моделі таких перетворювачів та результати їх досліджень можуть бути використані для прогнозування метрологічних характеристик в залежності від конструктивних та електричних параметрів.

2. Розроблено високочутливий метод вимірювання лінійних та кутових переміщень на основі використання фазових набігань на п'єзоелектричних структурах електричного поля кількох ПАХ з різними частотами, які приймаються безконтактним електрично пов'язаним ПАХ-приймачем. При збудженні ПАХ на частотах, що не перевищують 75 МГц, запропонований метод дозволяє визначати переміщення ПАХ-приймача з коефіцієнтом перетворення, який перевищує 7,0 ел. град. / мкм (0,5 ел. град. / кут.сек) у діапазоні до 100 мм і вище (до 360 кут. град.).

3. Розроблено метод вимірювання кутової швидкості на основі використання ефекту Доплера при обертанні безконтактного електрично пов'язаного ПАХ-приймача в електричному полі ПАХ, яка поширюються в кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі. При збудженні ПАХ на частоті 70 МГц в кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі з радіусом 10 мм метод забезпечує коефіцієнт перетворення 22 Гц / об. хв. в діапазоні до 13680 об. / хв. і вище.

4. Розроблено метод вимірювання мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості поверхневої акустичної хвилі в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, що поширюється на п'єзоелектричному звукопроводі (хвилеводі), який дозволяє створювати на основі універсального акустоелектронного модуля перетворювачі з коефіцієнтом перетворення до 10 кГц / мкм і вище в діапазоні переміщення чутливого елемента-мембрани до десятків мікрометрів.

5. Розроблено комплекс математичних, фізико-топологічних моделей первинних перетворювачів на основі використання електричного поля ПАХ, що поширюються в п'єзоелектричних звукопроводах (хвилеводах), які дозволяють визначати вимоги до конструктивних та електричних параметрів в залежності від заданих коефіцієнтів перетворення та динамічних діапазонів.

6. Розроблено та експериментально досліджено макети акустоелектронних перетворювачів та їх складових елементів:

- 3-х частотний генераторний блок, який містить три генератори на основі ліній затримки на ПАХ із кварцу *ST*-зрізу з секційним ЗШП, для збудження у звукопроводі (хвилеводі) ПАХ у вигляді суперпозиції 3-х хвиль; в результаті випробувань на робочих частотах (69,52; 70,62 та 71,69 МГц) отримано перестроювання частоти близько 380 кГц при короткочасній нестабільності частоти не гірше $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ та рівнях вихідного сигналу близько 1,0 В на кожній частоті;

- 3-х частотний блок підсилення та фільтрації вихідного сигналу безконтактного ПАХ-приймача, в якому розділення сигналів з різними частотами здійснюється ПАХ-фільтрами, синтез яких проведено з використанням фазового зважування електродів ЗШП за функцією Хеммінга; в результаті випробувань отримано для робочих частот (69,52; 70,62 та 71,69 МГц) смуги пропускання близько 450 кГц та рівнях вихідного сигналу близько 100 мВ на кожній частоті;

- перетворювачі лінійних та кутових переміщень на основі використання фазових набігань на поверхні лінійних (кільцевих) п'єзоелектричних структур електричного поля 3-х ПАХ з різними частотами, які поширюються одночасно і приймаються безконтактним ПАХ-приймачем; в результаті випробувань перетворювача лінійних переміщень на основі звукопровода із ніобата літію *YZ*-зрізу отримано на точній шкалі (при частоті 70,62 МГц) коефіцієнт перетворення 7,28 ел.град./мкм, а в результаті випробувань перетворювачів лінійних та кутових переміщень на основі плівкової п'єзоелектричної структури оксид цинку-плавлений кварц ($\text{ZnO-SiO}_2\text{пл.}$) на точних шкалах (при частоті 70,62 МГц) отримано коефіцієнти перетворення відповідно 7,59 ел.град./мкм та 0,55 ел.град./кут.сек;

– перетворювач мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості ПАХ в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, яка поширюється на п'єзоелектричному звукопроводі; в результаті випробувань перетворювача на основі звукопроводу із ніобата літію YZ-зрізу на частоті 45,2 МГц отримано коефіцієнти перетворення 9,3 кГц/мкм (42,6 Гц/мм.рт.ст.) в діапазоні переміщення мембрани до 15 мкм (до 3400 мм.рт.ст.).

7. Запропоновані конструкції пасивних ПАХ-перетворювачів для безпровідних радіовимірювальних систем: пасивна радіомітка з секційним зустрічно-штировим перетворювачем та частотно-кодовою модуляцією вхідного сигналу; перетворювач мікропереміщень та тиску з відбивними структурами на основі збурення мембраною електричного поля ПАХ; перетворювач лінійних та кутових переміщень на основі керованої лінії затримки на ПАХ з безконтактним ПАХ-відбивачем.

8. Використання результатів роботи підтверджено актами відповідних організацій і підприємств.

Результати роботи впроваджені також в навчальний процес кафедри електронних приладів та пристроїв КІП ім. Ігоря Сікорського при читанні лекцій та в лабораторні практикуми по курсам «Функціональна електроніка», «Електронні системи» та «Вимірювання в електронних системах». На базі отриманих результатів сформульовані напрямки нових наукових досліджень для аспірантів (PhD студентів) кафедри.

9. Нові конструкторські пропозиції захищені патентами СРСР та України.

Отримані результати можуть бути використані для розвитку електронної та приладобудівної промисловості України.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі узагальнені результати теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних пошукачем самостійно і у співавторстві, де автору належить вибір і обґрунтування напрямків досліджень, постановка задач, розробка методів вимірювання фізичних величин на основі використання електричного поля ПАХ, розробка математичних моделей АЕП та їх дослідження. Під науковим керівництвом автора були розроблені та експериментально досліджені макети АЕП лінійних та кутових переміщень, мікропереміщень та тиску, модулі на базі акустичних кристалів та п'єзоелектричних ПАХ-хвильоводів, 3-х частотний генераторний блок, 3-х частотний блок підсилення та фільтрації вихідного сигналу ПАХ-приймача. Постановка й обґрунтування задач досліджень, усі наукові положення, що виносяться на захист, і висновки дисертації належать авторові. Основна частина приведених у дисертації результатів доповідалася особисто автором на міжнародних і вітчизняних конференціях.

У роботах із співавторами (згідно переліку посилань нижче) особистий внесок здобувача наступний:

– теоретичне обґрунтування метода вимірювання лінійних та кутових переміщень на основі використання фазових набігань електричного поля кількох ПАХ на різних частотах, які поширюються в п'єзоелектричних звукопроводах (хвильоводах) і приймаються безконтактним ПАХ-приймачем, математичні моделі та чисельні розрахунки, конструкції акустоелектронних перетворювачів, методики експериментальних досліджень та узагальнення їх результатів [2, 3, 5, 6, 8, 14, 16, 19, 28, 38–40, 42, 45, 46, 49, 50];

– теоретичне обґрунтування метода вимірювання кутової швидкості на основі використання ефекту Доплера при обертанні ПАХ-приймача в електричному полі біжучої поверхневої акустичної хвилі, математична модель перетворювача з

кільцевим п'єзоелектричним хвилеводом, результати досліджень та їх узагальнення, пропозиції щодо подальшого вдосконалення конструкції [27, 29, 37];

– модифікована математична модель плівкового п'єзоелектричного ПАХ-хвилеводу з використанням апроксимації результатів вимірювання фазової швидкості ПАХ в необмеженій плівковій структурі оксид цинку-плавлений кварц, чисельні розрахунки, конструкції ПАХ-модулів, методики експериментальних досліджень та узагальнення їх результатів [1, 10, 43, 53, 54, 61, 62];

– функціональні схеми та конструкції 3-х частотного генераторного блоку та 3-х частотного блоку підсилення та фільтрації вихідного сигналу безконтактного ПАХ-приймача, методики їх випробування та узагальнення їх результатів [55, 63];

– теоретичне обґрунтування метода вимірювання мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості ПАХ в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, математичні моделі, чисельні розрахунки, конструкції акустoeлектронних перетворювачів, методики експериментальних досліджень та узагальнення їх результатів [7, 9, 11, 12, 17, 18, 30–32, 44, 56, 57, 64];

– функціональні схеми, математичні моделі та конструкції пасивних перетворювачів фізичних величин на ПАХ для безпровідних радіовимірювальних систем [13, 15, 24, 33–36, 47, 48, 51, 52, 58–60, 65].

8. Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних, вітчизняних і галузевих науково-технічних конференціях та семінарах (Росія, Україна, Австрія), в яких автор брав безпосередню участь:

XVII Міжгалузева наук.-техн. конф. пам'яті М. М. Острякова, Ленінград, Росія, 1991; Міжн. наук.-практ. конф. «П'єзоелектричні приводи і датчики», Обнінськ, Росія, 1993; Міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми фізичної і біомедичної електроніки», Київ, 1995, 1996; III Міжн. наук.-техн. конф. «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології», Одеса, 2008; V наук.-практ. конф. з міжн. участю «Математичне та імітаційне моделювання систем», Київ, 2010; V...XI Наук.-практ. конф. «Перспективні напрямки сучасної електроніки», Київ, 2011–2017; XXXI International Scientific Conference «Electronics and nanotechnology» (ELNANO-2011), Kyiv, 2011; VIII Міжн. наук.-техн. конф. «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки», Київ, 2011; VI Міжн. наук.-практ. конф. «Математичне та імітаційне моделювання систем», Чернігів, Україна, 2011; XXXII International Scientific Conference «Electronics and nanotechnology» (ELNANO-2012), Kyiv, 2012; 35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics” (ISSE 2012), Bad-Aussee, Austria, 2012; VII Міжн. наук.-практ. конф. «Математичне та імітаційне моделювання систем», Чернігів-Жукин, Україна, 2012; XVI Міжн. наук.-практ. інтернет-конф. «Актуальні наукові дослідження в сучасному світі», Переяслав-Хмельницький, Україна, 2016; I та II Міжн. наук.-техн. конф. «Smart-технології в енергетиці та електроніці», Лазурне, Україна, 2016 та 2017; XII та XIII International Conference «Electronics and Applied Physics», Kyiv, Ukraine, 2016 та 2017; наукові семінари кафедри електронних приладів та пристроїв КІП ім. Ігоря Сікорського.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 65 наукових працях, у тому числі 8 одноосібних; зокрема: 24 статтях у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття в іноземному виданні, 12 статтях у виданнях України, які внесені до міжнародних наукометричних баз), 2 патентах на винаходи та 9 патентах на корисні моделі; 28 тезах доповідей у збірниках матеріалів міжнародних та

вітчизняних науково-технічних конференцій та 2 статтях в інших виданнях, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 8 розділів оригінальних досліджень з висновками, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації викладено на 392 сторінках, із яких основна частина викладена на 294 сторінках і містить 121 рисунок та 23 таблиць. Список використаних джерел складається із 235 найменувань вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури. Додатки викладено на 45 сторінках і містять додаткові матеріали, які не увійшли в основну частину дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** зазначено актуальність вибраної теми дисертації, сформульовано основну мету та задачі роботи, що розв'язувалися для її досягнення, показано наукове і практичне значення отриманих результатів, приведені наукова новизна, зв'язок з плановими завданнями та державними програмами. Відображено особистий внесок автора, надано інформацію про апробацію результатів досліджень, наукові публікації за темою.

Перший розділ присвячено аналізу фізико-технічних основ побудови та порівняння метрологічних параметрів перетворювачів фізичних величин. Технічні параметри традиційних ВП практично досягли своїх граничних можливостей і подальше удосконалення можливо шляхом створення перетворювачів на основі нових фізичних ефектів.

Показано, що для підвищення чутливості, роздільної здатності та точності при зменшенні масогабаритних показників перспективним напрямом в області ВП ФВ є створення активних та пасивних перетворювачів на основі пристроїв на ПАХ. Розробки таких перетворювачів здійснюються в основному на основі: зміни фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини резонатора або лінії затримки при деформації звукопроводу балочного або мембранного типу, дії навколишнього середовища на поверхню звукопроводу; коефіцієнта відбиття ПАХ від відбивальних решіток або ЗШП, що сполучені із зовнішніми чутливими елементами, на які діють температура, вологість, електромагнітне випромінювання тощо.

У той же час не приділялася належна увага теоретичному обґрунтуванню та практичній реалізації акустоелектронних перетворювачів з використанням електричного поля ПАХ, що поширюються на поверхні п'єзоелектричних структур.

Виходячи з вищенаведеного, поставлено завдання запропонувати і теоретично обґрунтувати методи вимірювання та схемо-технічні принципи побудови АЕП лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень та тиску на основі використання електричного поля ПАХ, що поширюються на поверхні п'єзоелектричних структур. Для вказаних перетворювачів розробити математичні моделі, на основі яких можна було би визначати вимоги до конструктивних та електричних параметрів у залежності від метрологічних характеристик перетворювачів. Провести теоретичні та експериментальні дослідження як складових блоків АЕП (первинних перетворювачів на основі акустичних кристалів та плівкових п'єзоелектричних структур, генераторного блоку, блоку підсилення та частотного розділення вихідних сигналів), так і макетів перетворювачів лінійних та кутових переміщень, мікропереміщень та тиску. Запропонувати та теоретично обґрунтувати конструкції та схемо-технічні принципи побудови АЕП на основі використання електричного поля ПАХ для безпроводних радіовимірювальних систем.

У другому розділі:

Запропоновано і теоретично обґрунтовано метод вимірювання лінійних та кутових переміщень на основі використання фазових набігань на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу (хвильоводу) електричного поля кількох ПАХ, які приймаються безконтактним ПАХ-приймачем.

На рис. 1 представлені функціональні схеми АЕП лінійних (а) та кутових (б) переміщень на ПАХ при збудженні хвилі у вигляді суперпозиції 3-х ПАХ з частотами f_i , де $i = 1, 2, 3$, причому $f_2 = f_1(1 - \delta_2)$ та $f_3 = f_1(1 + \delta_3)$, де δ_2 та δ_3 – частотні розстроювання відносно частоти f_1 .

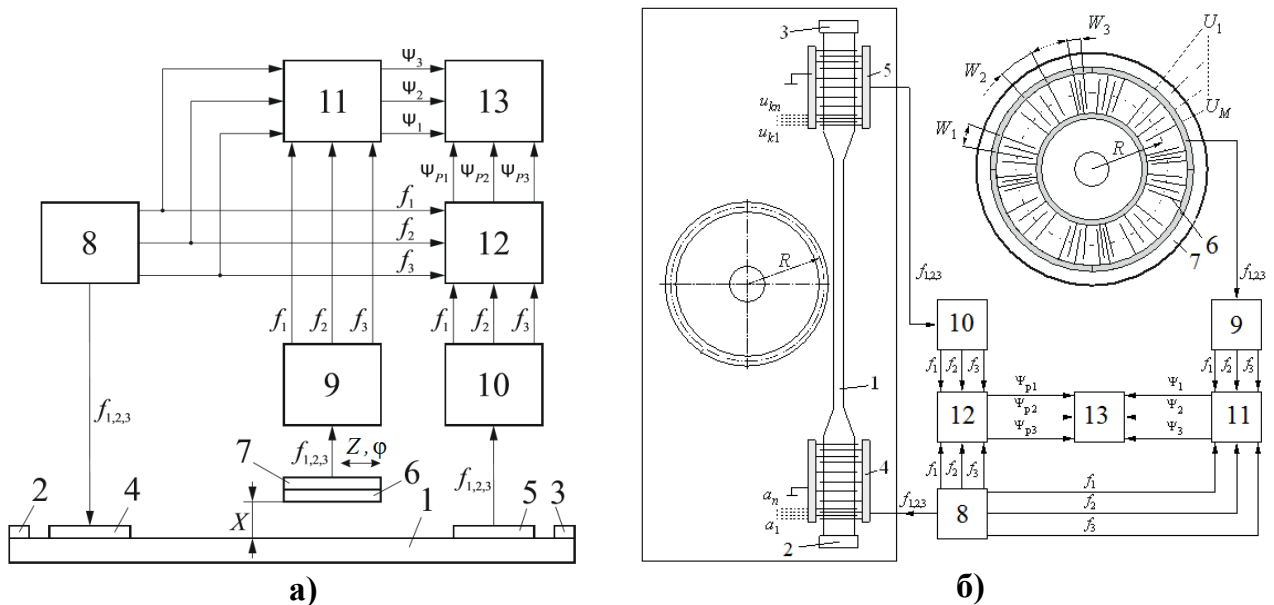


Рис.1. Функціональні схеми АЕП лінійних (а) та кутових (б) переміщень

Перетворювачі переміщень складаються із п'єзоелектричного звукопроводу (хвильоводу) 1 з поглиначами ПАХ 2 та 3, входного і контрольного ЗШП 4 та 5, сформованих на звукопроводі (хвильоводі), над яким на відстані X , не більший довжини ПАХ, переміщується ПАХ-приймач, виконаний у вигляді ЗШП 6, сформованого на діелектричній пластині 7.

АЕП кутових переміщень (рис. 1, б) містить кільцевий п'єзоелектричний ПАХ-хвильовід з радіусом R , який розміщений на відстані $d \ll \lambda_i$ відносно хвильоводу 1, де $\lambda_i = V/f_i$ – довжини ПАХ на частотах f_i ; V – фазова швидкість ПАХ, а кільцевий ПАХ-приймач (поз. 6 та 7) переміщується над кільцевим хвильоводом по дузі $Z = R \cdot \phi$, де R – радіус хвильоводу і ПАХ-приймача; ϕ – кутове переміщення приймача в радіанах.

Електричний сигнал з генераторного блоку 8, що складається із 3-х високостабільних ПАХ-генераторів та суматора, подається на входний ЗШП 4 і збуджує у вигляді суперпозиції 3-х гармонічних коливань ПАХ, що приймається ЗШП 6 ПАХ-приймача і контрольним ЗШП 5, вихідні сигнали з яких поступають в

3-х частотні блоки підсилення і фільтрації 9 та 10, що складаються із високочастотних підсилювачів та 3-х ПАХ-фільтрів відповідно на частоти f_i .

Після підсилення та фільтрації вихідні сигнали з блоків 9 та 10 поступають на фазовимірювальні блоки 11 та 12, на які подаються опорні сигнали з генераторного блоку. Результати вимірювання фаз Ψ_i сигналів з ПАХ-приймача поступають в блок обробки та формування трьох вимірювальних шкал перетворювача 13. В блок 13 одночасно поступають результати вимірювання фаз сигналів Ψ_{pi} з блоку 12 для корегування фаз Ψ_i при дії дестабілізуючих факторів на звукопровід (хвильовід).

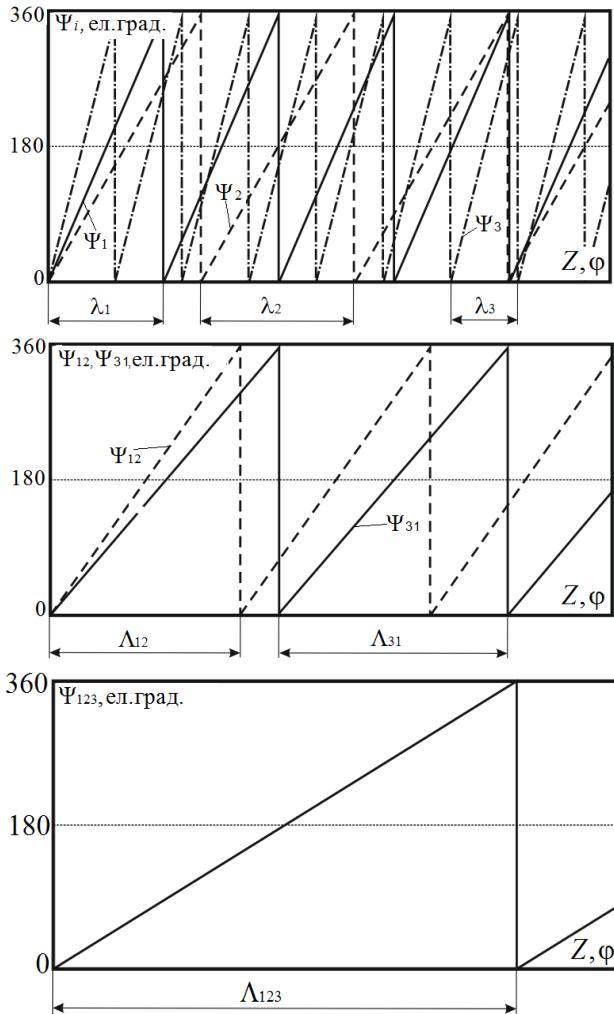


Рис. 2. Фазові характеристики (функції перетворення) 3-х частотного АЕП

Для цього визначається величина додаткового зсуву фази для частоти f_i для координати Z , в якій знаходиться ПАХ-приймач, згідно формули $\Delta\Psi_{zi} = \Delta\Psi_{pi} Z/L = \Delta\Psi_{pi} R\phi/L$, де $\Delta\Psi_{pi}$ – приріст фази на частотах f_i в результаті дії дестабілізуючих факторів; L – акустична відстань між вхідним 4 та контрольним 5 ЗШП; Z та ϕ – координати ПАХ-приймача, що визначаються попередньо в результаті вимірювання фаз Ψ_i .

На рис. 2 представлені типові фазові характеристики (функції перетворення) 3-х частотного АЕП лінійних та кутових мікропереміщень.

Для формування точної шкали використовуються результати вимірювання Ψ_1 на частоті f_1 . Результати визначення $\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2$ та $\Psi_{31} = \Psi_3 - \Psi_1$ використовуються для формування проміжних шкал з коефіцієнтами редукції $P_2 = 1/\delta_2$ та $P_3 = 1/\delta_3$.

Результати визначення $\Psi_{123} = \Psi_{12} - \Psi_{31}$ використовуються для формування грубої шкали АЕП з коефіцієнтом редукції $P_{123} = 1/(\delta_2 - \delta_3) = P_2 P_3 / (P_3 - P_2)$.

В табл. 1 представлено результати розрахунків метрологічних параметрів 3-х частотного АЕП лінійних та кутових переміщень на основі використання фазових набігань електричного поля ПАХ на основній частоті $f_1 = 70,62$ МГц при $\lambda_1 = 46$ мкм і $R = 15$ мм та додаткових частотах $f_2 = f_1(1 - \delta_2)$ і $f_3 = f_1(1 + \delta_3)$, де $\delta_2 = 1/64$; $\delta_3 = 31/2048$.

Таблиця 1. Розрахункові метрологічні параметри 3-х частотних АЕП лінійних та кутових переміщень

Найменування параметра	Точна шкала	Проміжна шкала	Груба шкала
Діапазон вимірювання переміщень	$Z_{1m} = \lambda_1 = 46 \text{ мкм}$ $\varphi_{1m} = \frac{\lambda_1}{R} = 3,07 \cdot 10^{-3} \text{ кут.рад.} \approx$ $\approx 632,81 \text{ кут.сек.}$	$Z_{2m} = P_2 Z_{1m} =$ $= 2,944 \text{ мм}$ $\varphi_{2m} = P_2 \varphi_{1m} =$ $= 11,25 \text{ кут.град.}$	$Z_{3m} = P_{123} Z_{1m} =$ $= 94,208 \text{ мм}$ $\varphi_{3m} = P_{123} \varphi_{1m} =$ $= 360 \text{ кут.град.}$
Чутливість (коефіцієнт перетворення)	$S_1 = \frac{d\Psi_1}{dZ} = \frac{360}{\lambda_1} \approx$ $\approx 7,83 \text{ ел.град./мкм}$ $S_1 = \frac{d\Psi_1}{d\varphi} = \frac{N_1}{3600} \approx$ $\approx 0,57 \text{ ел.град./кут.сек.}$	$S_{12} = \frac{d\Psi_{12}}{dZ} = \frac{S_1}{P_2} \approx$ $\approx 122,3 \text{ ел.град./мм.}$ $S_{12} = \frac{d\Psi_{12}}{d\varphi} = \frac{S_1}{P_2} \approx$ $\approx 32 \text{ ел.град./кут.град.}$	$S_{123} = \frac{d\Psi_{123}}{d\varphi} = \frac{S_1}{P_{123}} \approx$ $\approx 3,82 \text{ ел.град./мм}$ $S_{123} = \frac{d\Psi_{123}}{d\varphi} = \frac{S_1}{P_{123}} \approx$ $\approx 1,0 \text{ ел.град./кут.град.}$
Потенційна роздільна здатність при роздільній здатності фазометра Ф5126 $\Psi_{min} = 0,1 \text{ ел.град.}$	$Z_{1min} = \frac{\Psi_{min}}{S_1} \approx$ $\approx 0,013 \text{ мкм}$ $\varphi_{1min} = \frac{\Psi_{min}}{S_1} \approx$ $\approx 0,175 \text{ кут.сек.}$	$Z_{2min} = \frac{\Psi_{min}}{S_{12}} \approx$ $\approx 0,817 \text{ мкм}$ $\varphi_{2min} = \frac{\Psi_{min}}{S_{12}} \approx$ $\approx 11,25 \text{ кут.сек.}$	$Z_{3min} = \frac{\Psi_{min}}{S_{123}} \approx$ $\approx 0,026 \text{ мм}$ $\varphi_{3min} = \frac{\Psi_{min}}{S_{123}} =$ $= 0,1 \text{ кут.град.}$
Похибка при похибці фазометра Ф5126 $\Delta\Psi = \pm 0,3 \text{ ел.град.}$	$\Delta Z_{1min} = \frac{\Delta\Psi}{S_1} \approx$ $\approx \pm 0,04 \text{ мкм}$ $\Delta\varphi_{1min} = \frac{\Delta\Psi}{S_1} \approx$ $\approx \pm 0,53 \text{ кут.сек.}$	$\Delta Z_{2min} = \frac{\Delta\Psi}{S_{12}} \approx$ $\approx \pm 2,50 \text{ мкм}$ $\Delta\varphi_{2min} = \frac{\Delta\Psi}{S_{12}} \approx$ $\approx \pm 33,80 \text{ кут.сек.}$	$\Delta Z_{3min} = \frac{\Delta\Psi}{S_{123}} \approx$ $\approx \pm 0,08 \text{ мм}$ $\Delta\varphi_{3min} = \frac{\Delta\Psi}{S_{123}} =$ $= \pm 0,30 \text{ кут.град.}$

Розроблена математична модель первинного перетворювача лінійних переміщень на основі використання фазових набігань на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу електричного поля кількох ПАХ, які приймаються безконтактним ПАХ-приймачем.

Топологічна схема 3-х частотного первинного перетворювача лінійних переміщень (ЛП) представлена на рис. 3.

Математична модель розроблена на основі моделі Δ -джерел із урахуванням наявності безконтактного ПАХ-приймача і дозволяє визначати функціональні залежності вихідних характеристик перетворювача від положення кожного Δ -джерела ПАХ-приймача відносно акустичного потоку. При розробці моделі використано наступну систему параметрів:

- центральні частоти генераторів f_i , частотне розстроювання другого та третього генераторів відносно частоти першого генератора позначаються δ_2 та δ_3 ;
- короткочасна нестабільність генераторів δ ;
- періоди ЗШП відповідно дорівнюють довжинам ПАХ, тобто $W_i = \lambda_i$;
- кількість електродів вхідного і контрольного ЗШП N та ЗШП ПАХ-приймача M для кожної частоти f_i ;
- коефіцієнт згасання ПАХ на поверхні звукопроводу α_0 ;
- коефіцієнт дисперсії фазової швидкості ПАХ під ПАХ-приймачем α ;

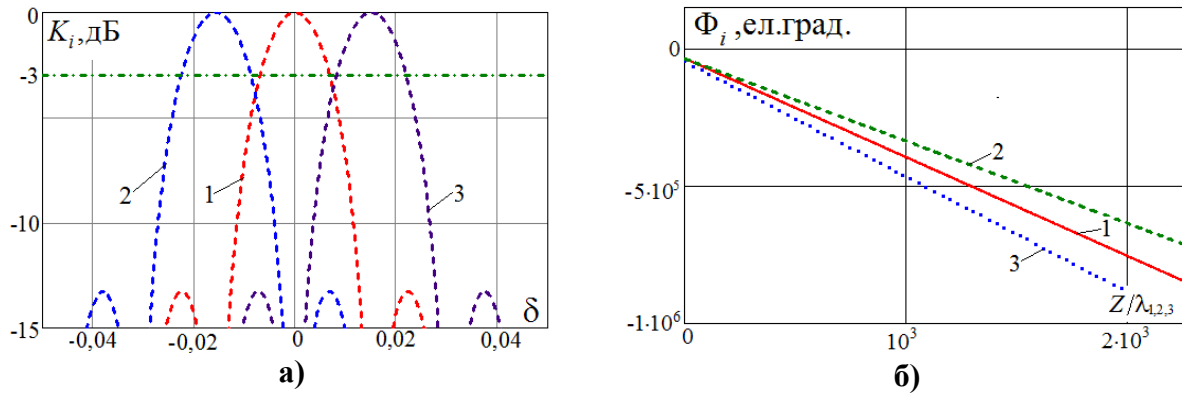


Рис. 4. Нормовані АЧХ (а) та функції перетворення (б) 3-х частотного первинного перетворювача ЛП на ПАХ

На рис. 5 та 6 представлено для точної шкали теоретичні залежності модуля F_1 та аргумента ϕ_1 коефіцієнта похибки від нормованого переміщення Z/λ_1 , кута нахилу приймача ПАХ β , нестабільності частоти генератора δ та коефіцієнта згасання ПАХ α_0 при: $\alpha = 0$, $\alpha_\Delta = 1,0$, $N = M = 128$, $\lambda_1 = W_1 = 46$ мкм, $Z_1/\lambda_1 = 100$, $X_1/\lambda_1 = 0,2$.

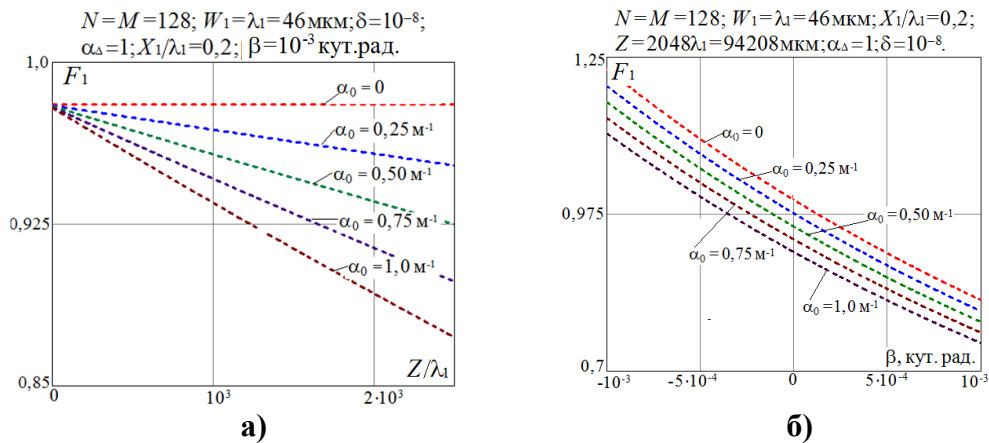


Рис. 5. Теоретичні залежності модуля F_1 коефіцієнта похибки від нормованого переміщення ПАХ-приймача Z/λ_1 (а) та кута нахилу приймача β (б)

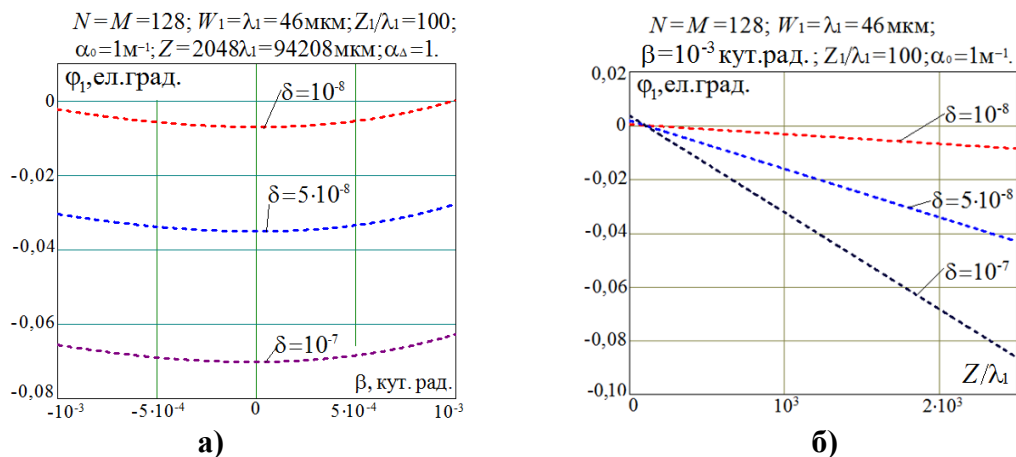


Рис. 6. Теоретичні залежності аргумента ϕ_1 коефіцієнта похибки від кута нахилу ПАХ-приймача β (а) та нормованого переміщення Z/λ_1 (б)

Із результатів теоретичних розрахунків випливає, що, при нестабільності частоти генератора $\delta = 10^{-8} \div 10^{-7}$, відносному зазорі $X/\lambda = 0,1 \div 0,3$, коефіцієнті згасання

$\alpha_0 \leq 1 \text{ м}^{-1}$ та кута нахилу ПАХ-приймача $\beta \leq 10^{-3}$ кут.рад., модуль коефіцієнта похибки при заданих параметрах змінюється в інтервалі $F_1 = 0,7 \div 1,2$, а аргумент $\varphi_1 \approx 0 \div 0,07$ ел.град. Наприклад, при $\delta = 10^{-8} \div 10^{-7}$ та $\beta = \pm 10^{-3}$ кут.рад. теоретичне значення фазової похибки буде в інтервалі $\varphi_1 = 0,007 \div 0,07$ ел.град., що значно менше роздільної здатності промислових цифрових фазометрів типу Ф5126.

Результати чисельних розрахунків дозволяють сформулювати вимоги до параметрів ПП ЛП на ПАХ: довжина ПАХ $\lambda = 30 \div 100$ мкм; діапазон вимірюваних переміщень $Z/\lambda = 0 \div 2000$; кількість електродів ЗШП ПАХ-приймача $M < 200$; відносний зазор між приймачем і поверхнею звукопроводу $X/\lambda = 0,1 \div 0,3$; кут нахилу ПАХ-приймача $\beta \leq 10^{-3}$ кут.рад.; короткочасна нестабільність частоти генераторів $\delta = 10^{-8} \div 10^{-7}$ за 1 с.

Виконання цих вимог дозволяє створення АЕП ЛП в діапазоні $Z = 0 \div 100$ мм при потенційній роздільній здатності $Z_{\text{min}} < 0,02$ мкм на точній шкалі (табл. 1), що сумірна з метрологічними параметрами індуктосинів, фотоелектричних перетворювачів та пристроїв на основі інтерферометрів та, на відміну них, мають простішу конструкцію та значно менші масогабаритні показники.

Розроблена математична модель первинного перетворювача кутових переміщень на основі використання фазових набігань на поверхні кільцевого п'єзоелектричного хвилеводу електричного поля кількох ПАХ, які приймаються безконтактним ПАХ-приймачем.

Функціональна схема 3-х частотного первинного перетворювача кутових переміщень (КП) на ПАХ представлена на рис. 1, б.

Розподілена конструкція кільцевого ПАХ-приймача дозволяє приймати сигнали на частотах f_i з компенсацією похибок, що виникають в результаті торцевого та радіального биття приймача (рис. 7).

В АЕП КП на ПАХ в якості звукопроводу доцільно використовувати плівковий хвилевід на базі п'єзоелектричних плівок оксид цинку ZnO або нітрид алюмінію AlN, топографічний хвилевід на основі п'єзоелектричної кераміки, щілинний хвилевід на основі тих же матеріалів.

При розробці моделі використано наступну систему параметрів:

- центральні частоти генераторів f_i , частотне розстроювання другого та третього генераторів відносно частоти першого генератора позначаються δ_2 та δ_3 ;
- короткочасна нестабільність генераторів δ ;
- періоди ЗШП відповідно дорівнюють довжинам ПАХ, тобто $W_i = \lambda_i$;
- кількість електродів вхідного і контрольного ЗШП N та ЗШП секції ПАХ-приймача M для кожної частоти f_i ;
- кількість секцій ЗШП ПАХ-приймача P для кожної частоти f_i ;
- коефіцієнт згасання ПАХ на поверхні хвилеводу α_0 ;
- коефіцієнт дисперсії фазової швидкості ПАХ під ПАХ-приймачем α ;
- коефіцієнт узгодження ПАХ-приймача з підсилювальним блоком α_Δ ;
- торцеве биття приймача відносно кільцевого ПАХ-хвилеводу β (рис.7, а);
- ексцентриситет приймача відносно кільцевого ПАХ-хвилеводу σ (рис. 7, б);
- початкова нормована відстань від вхідного ЗШП до ЗШП ПАХ-приймача Z_i/λ_i ;
- нормований зазор між поверхнею звукопроводу та ЗШП ПАХ-приймача X_i/λ_i .

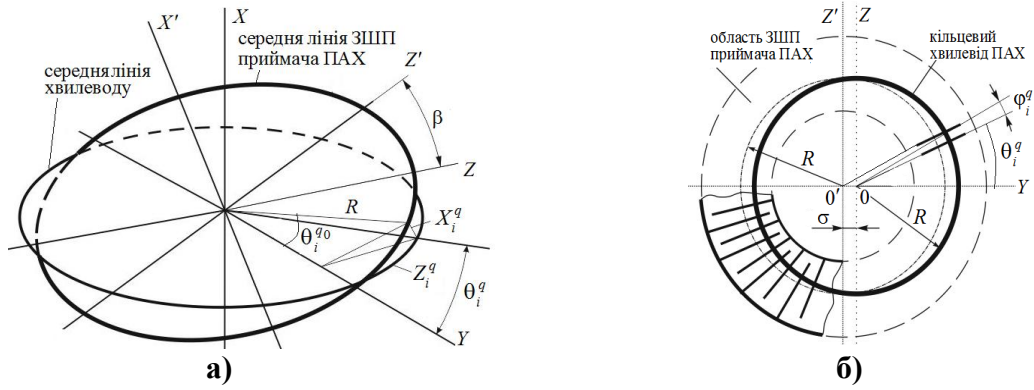


Рис. 7. Схеми урахування впливу торцевого биття (а) та ексцентриситету (б) ПАХ-приймача відносно кільцевого ПАХ-хвильоводу

В кільцевому хвильоводі, який є кільцевим резонатором біжучих хвиль, відбувається синфазне сумування хвиль при виконанні умови:

$$2\pi R = N_i^0 \lambda_i, \quad (4)$$

де R – середній радіус хвильоводу; λ_i – резонансні довжини ПАХ на частотах f_i ; N_i^0 – кількість довжин ПАХ λ_i , що розміщуються в кільцевому хвильоводі при резонансі, який досягається зміною частот генераторів.

Комплексний коефіцієнт передачі перетворювача КП визначається співвідношенням:

$$\bar{K}_i = \bar{F}_i K_i^0 \exp(j\Phi_i^0), \quad (5)$$

де K_i^0 і Φ_i^0 – модуль (амплітудно-частотна характеристика) і аргумент (функція перетворення) коефіцієнта передачі ідеального перетворювача ($\alpha = \alpha_0 = \delta = \beta = \sigma = 0$, $\alpha_\Delta = 1$).

Комплексний коефіцієнт похибки ПП КП \bar{F}_i можна представити у вигляді:

$$\bar{F}_i = F_i \exp(j\varphi_i), \quad (6)$$

де F_i і φ_i – модуль і аргумент (фазова похибка) коефіцієнта похибки, які є функціями прийнятої системи конструктивних та електричних параметрів.

Функцію перетворення ПП кутових переміщень на ПАХ з урахуванням прийнятої системи параметрів можна представити у вигляді:

$$\Phi = \Phi_i^0 + \varphi_i. \quad (7)$$

На рис. 8 представлено теоретичні нормовані АЧХ (а) та функції перетворення (б) 3-х частотного ПП кутових переміщень при $R = 2048\lambda_1/2\pi$.

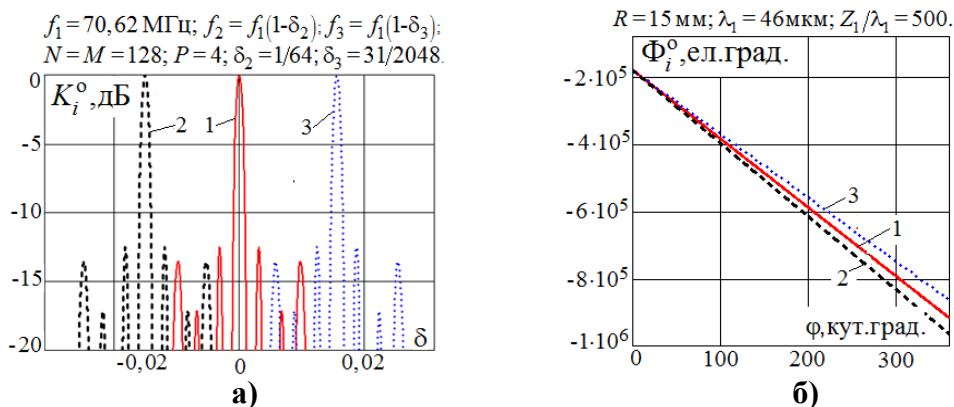


Рис. 8. Нормовані АЧХ (а) та функції перетворення (б) 3-х частотного ПП КП на ПАХ

На рис. 9 та 10 представлено для точної шкали теоретичні залежності модуля F_1 та аргумента φ_1 коефіцієнта похибки ПП КП від нестабільності частоти генератора δ при різних конструктивних параметрах.

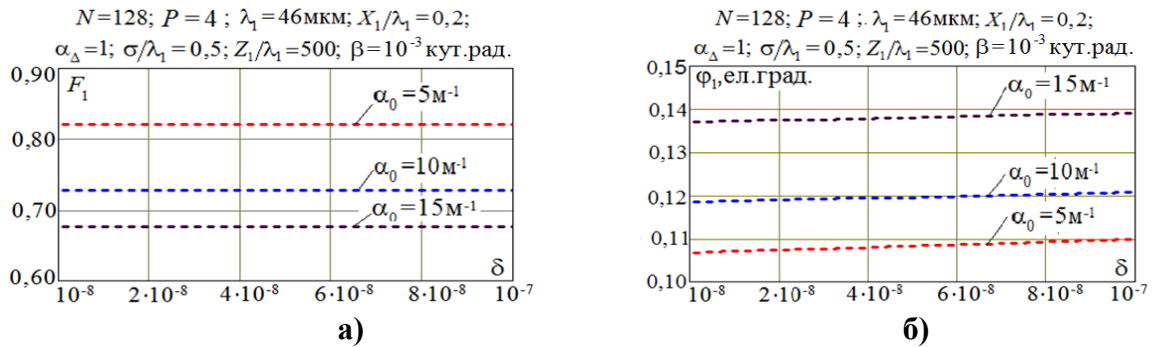


Рис. 9. Теоретичні залежності модуля F_1 (а) та аргумента φ_1 (б) коефіцієнта похибки ПП КП від нестабільності частоти генератора δ при $X_1/\lambda_1=0,2$

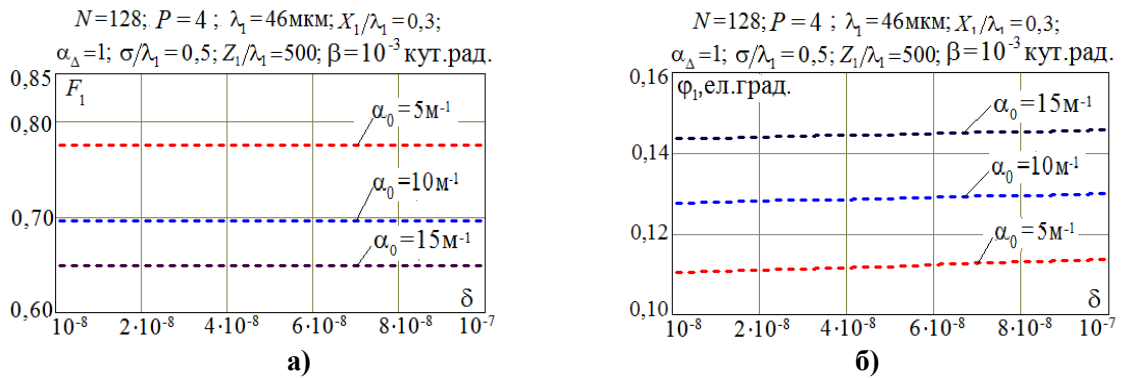


Рис. 10. Теоретичні залежності модуля F_1 (а) та аргумента φ_1 (б) коефіцієнта похибки ПП КП від нестабільності частоти генератора δ при $X_1/\lambda_1=0,3$

Із результатів розрахунків випливає, що при частотному розстроюванні в результаті нестабільності частоти генератора $\delta=10^{-8} \div 10^{-7}$ модуль коефіцієнта похибки при заданих параметрах змінюється в інтервалі $F_1=0,65 \div 0,93$, а аргумент — $\varphi_1=0,08 \div 0,15$ ел.град. Наприклад, при $\delta=10^{-8} \div 10^{-7}$, $\beta=10^{-3}$ кут.рад., $\sigma/\lambda_1=0,50$, $X_1/\lambda_1=0,2$ фазова похибка буде в інтервалі $\varphi_1=0,11 \div 0,14$ ел.град., що сумірна роздільній здатності цифрового фазометра Ф5126.

Результати чисельних розрахунків дозволяють сформулювати вимоги до параметрів ПП КП на ПАХ: довжина ПАХ $\lambda_1=30 \div 100$ мкм; діапазон вимірювання $\varphi=0 \div 360$ кут. град.; торцеве биття $\beta \leq 10^{-3}$ кут.рад.; відносний ексцентриситет приймача $\sigma/\lambda_i \leq 0,5$; відносний зазор $X_i/\lambda_i=0,1 \div 0,3$; кількість електродів секції ПАХ-приймача $M < 200$; кількість секцій приймача на кожну частоту $P=4$; радіус хвилеводу $R=10 \div 20$ мм; короткочасна нестабільність генераторів $\delta=10^{-8} \div 10^{-7}$ за 1 секунду.

Виконання цих вимог дозволяє створення АЕП КП в діапазоні $\varphi=0 \div 360$ кут. град. при потенційній роздільній здатності $\varphi_{1min} < 0,2$ кут.сек. на точній шкалі (табл. 1), що сумірна с метрологічними параметрами індуктосинів, фотоелектричних перетворювачів та, на відміну них, мають простішу конструкцію та значно менші масогабаритні показники.

Запропоновано і теоретично обґрунтовано метод вимірювання кутової швидкості об'єкта на основі використання ефекту Доплера при обертанні ПАХ-приймача в електричному полі ПАХ, яка поширюється в п'єзоелектричному хвилеводі. Розроблена та досліджена математична модель, яка пов'язує метрологічні параметри перетворювача з конструктивними та електричними параметрами акустоелектричного модуля та ПАХ-приймача.

На рис. 11 зображено функціональну схему АЕП кутової швидкості.

На підкладці 1 розміщений ПАХ-хвилевід 2 з рупорними концентраторами та поглиначами ПАХ 3, на концентраторах сформовано вхідний 4 та контрольний 5 ЗШП ПАХ, кільцевий п'єзоелектричний хвилевід 6 з радіусом R розміщений на відстані $d \ll \lambda_0$, де λ_0 – довжина ПАХ у хвилеводі, відносно хвилеводу 2. Над кільцевим хвилеводом на відстані X , що сумірна довжині ПАХ λ_0 , обертається кільцевий ПАХ-приймач 7 у вигляді кільцевого ЗШП 8 з радіусом R , який розміщений на діелектричному диску 9, що жорстко пов'язаний із валом 10 об'єкта, який обертається з кутовою швидкістю Ω . Шини ЗШП 8 з'єднані із кільцевими електродами 11 та 12. Період розміщення електродів W ЗШП 8 може змінюватись по колу в залежності від заданого динамічного діапазону вимірювання кутової швидкості.

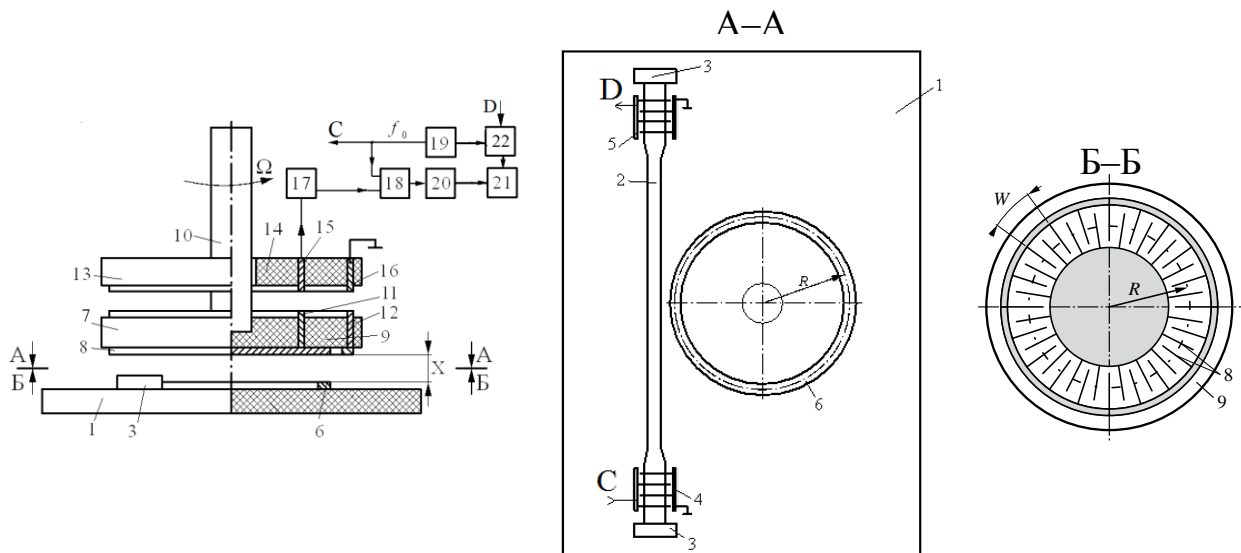


Рис. 11. Функціональна схема АЕП кутової швидкості

Над рухомим ПАХ-приймачем розміщено ємнісний знімач вихідного сигналу 13 з нерухомим діелектричним диском 14 та кільцевими електродами 15 і 16, які відповідно з електродами 11 і 12 і створюють ємнісний знімач вихідного сигналу ПАХ-приймача. Електрод 16 заземлено, а електрод 15 з'єднаний із входом високочастотного підсилювача 17, вихід якого з'єднано із першим входом змішувача сигналів 18, другий вхід якого з'єднано із виходом високочастотного генератора 19, який також з'єднано із вхідним ЗШП 4, а вихід змішувача 18 з'єднано з входом фільтра різницевої частоти сигналів генератора та ПАХ-приймача 20, вихід якого з'єднано з першим входом електронного блоку обробки інформації 21, другий вхід якого з'єднано з виходом фазометра 22, входи якого з'єднані з контрольним ЗШП 5 та генератором 19.

В електронному блоці 21 здійснюється вимірювання проміжної частоти $F = f - f_0$, по якій визначається кутова швидкість ПАХ-приймача Ω .

Амплітудно-частотну характеристику перетворювача кутової швидкості можна представити у вигляді:

$$K_{\Omega} = \gamma_{\text{вх}} \gamma_{\text{п}} \gamma_{\text{к}} \gamma_{\text{в}} N M \frac{\sin(0,5N\pi\delta)}{0,5N\pi\delta} \cdot \frac{\sin(0,5M\pi\delta)}{0,5M\pi\delta} \exp[-2\pi(1-\delta)X/\lambda_0], \quad (8)$$

де $\gamma_{\text{вх}}$ та $\gamma_{\text{п}}$ – відповідно коефіцієнти електромеханічного перетворення вхідним ЗШП та безконтактним ПАХ-приймачем; $\gamma_{\text{к}}$ – коефіцієнт компресії акустичного потоку концентратором ПАХ; $\gamma_{\text{в}}$ – коефіцієнт відгалуження акустичного потоку в кільцевий хвилевід; N – кількість електродів вхідного ЗШП; M – кількість електродів ЗШП ПАХ-приймача; X – величина зазору між поверхнею кільцевого хвилеводу та ПАХ-приймачем; $\delta = (f - f_0)/f_0$ – відносне частотне розстроювання; f_0 – частота генератора 19 (частота ПАХ у хвилеводі).

При обертанні ПАХ-приймача з кутовою швидкістю Ω [рад./сек] над поверхнею кільцевого хвилеводу в кільцевому ЗШП ПАХ-приймача індуктується змінний електричний сигнал на частоті f , яка відрізняється від частоти ПАХ (частоти генератора) f_0 в результаті ефекту Доплера на величину:

$$F = f - f_0 = f_0 \left[\sqrt{(V_0 \mp 2\pi R n) / (V_0 \pm 2\pi R n)} - 1 \right], \quad (9)$$

де $n = \Omega/2\pi$ – кутова швидкість в обертах за секунду.

Із (9) отримаємо формулу для визначення кутової швидкості:

$$n = \pm V_0 \left[f_0^2 - (f_0 + F)^2 \right] / 2\pi R \left[f_0^2 + (f_0 + F)^2 \right] \quad (10)$$

На рис.12 представлено нормовані АЧХ перетворювача кутової швидкості при $N = 50$ і $M = 1000; 1500; 2000$ (а) та залежність приросту частоти сигналу ПАХ-приймача від кутової швидкості.

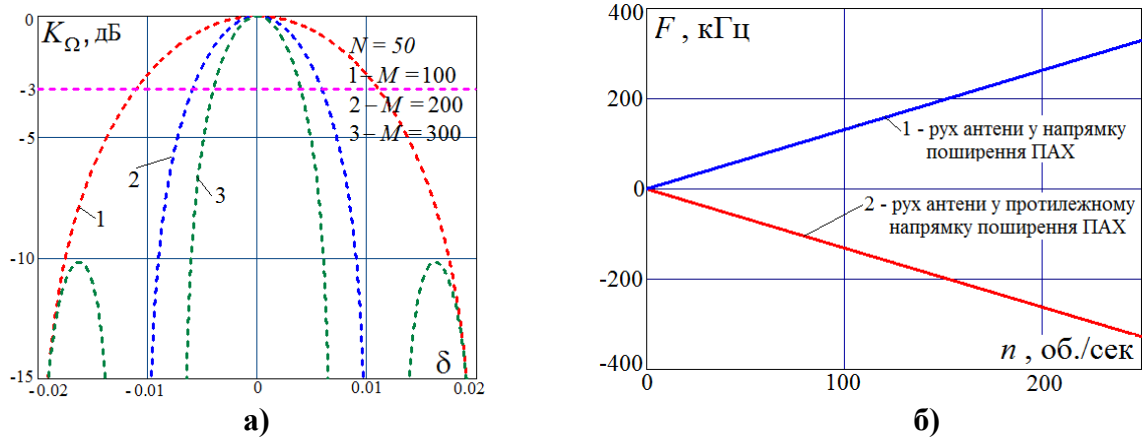


Рис. 12. АЧХ ПП кутової швидкості (а) та залежність приросту частоти вихідного сигналу від кутової швидкості ПАХ-приймача (б)

Для корегування результатів вимірювання кутової швидкості при зміні температури використовуються результати вимірювання фазометром 22 фазових зсувів Ψ_0 при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ та $\Psi(T)$ при температурі T в лінії затримки, акустична довжина якої дорівнює відстані між вхідним 4 та контрольним 5 ЗШП, що дозволяє визначити залежність фазової швидкості ПАХ від температури $\eta(T) = \Delta V(T)/V_0$, яка враховується при визначенні кутової швидкості згідно співвідношення:

$$n_{\eta} = [\pm V_0 (1 + \eta)] \left[f_0^2 - (f_0 + F)^2 \right] / 2\pi R \left[f_0^2 + (f_0 + F)^2 \right]. \quad (11)$$

При швидкості ПАХ у хвильоводі $V_0 = 3350$ м/с, частоті генератора $f_0 = 70$ МГц, радіусі хвильовода $R = 10$ мм отримаємо чутливість (коефіцієнт перетворення) $S_n = dF/dn \approx 1,32$ кГц/об./сек = 22 Гц/об./хв., що при роздільній здатності вимірювача частоти $\delta f = 1$ Гц отримаємо нижню границю (роздільну здатність) вимірювання кутової швидкості $n_{min} \approx 0,045$ об./хв.

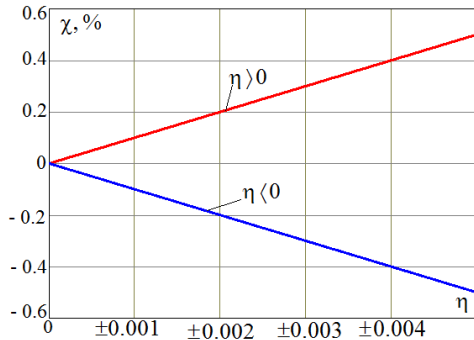


Рис. 13. Відносні відхилення кутової швидкості від параметра η

При смузі пропускання ПАХ-приймача $\Delta F \approx \pm 300$ кГц отримаємо згідно формули (10) верхню границю вимірювання кутової швидкості $n_{max} \approx 228$ об./сек = 13680 об./хв.

Залежності відносного відхилення кутової швидкості $\chi = (n_\eta - n) \cdot 100\% / n$ від параметра η представлені на рис. 13.

Таким чином, на основі використання ефекту Доплера можливо створювати широкодіапазонні високочутливі АЕП кутової швидкості, які будуть мати просту конструкцію та значно менші масогабаритні показники у порівнянні з тахогенераторами, електромагнітними та фотоелектричними перетворювачами.

У третьому розділі представлена розроблена модифікована математична модель плівкового п'єзоелектричного ПАХ-хвильовода та результати теоретичних і експериментальних досліджень. Для моделювання хвильоводу (рис.14, а) і концентраторів ПАХ була використана експериментальна залежність фазової швидкості ПАХ в необмеженій плівковій структурі ZnO-SiO₂пл., апроксимацією якої отримана аналітична залежність фазової швидкості ПАХ V_s в інтервалі $h/\lambda = 0 \div 0,3$:

$$V_s = V_R \exp \left[-1,412 h/\lambda + 1,811 (h/\lambda)^2 \right], \quad (12)$$

де $V_R = 3400$ м/с – швидкість релеївських хвиль на поверхні плавленого кварцу SiO₂пл.

Залежність (12) представлена на рис. 14, б (графік 1).

З урахуванням (12) отримано модифіковану модель ПАХ-хвильоводу, яка описується дисперсійним рівнянням:

$$2\pi G h \sqrt{\beta^2 - 1} / \lambda = (m\pi/2) + \arctg \sqrt{[V_R^2 - \beta^2 V_s^2] / [V_R^2 (\beta^2 - 1)]}, \quad (13)$$

де $\beta = V/V_s$; V – фазова швидкість ПАХ у хвильоводі.

На рис. 14, а зображено профілі механічних зміщень ПАХ, а на рис. 14, б – залежності швидкості ПАХ у хвильоводі для симетричної моди (криві 2...5) і першої антисиметричної моди (криві 6...9) в залежності від нормованої товщини плівки ZnO h/λ при різних значеннях нормованої ширини хвильоводу $G = d/h$.

Приймаючи для першої антисиметричної моди ($m=1$) граничне значення фазової швидкості ПАХ $V = V_R$, із рівнянь (12) та (13) отримано умову для забезпечення поширення у хвильоводі фундаментальної моди ПАХ:

$$2d_{kp} \leq \lambda \left\{ 2 \sqrt{\exp \left[2,824 (h/\lambda) - 3,622 (h/\lambda)^2 \right] - 1} \right\}^{-1}. \quad (14)$$

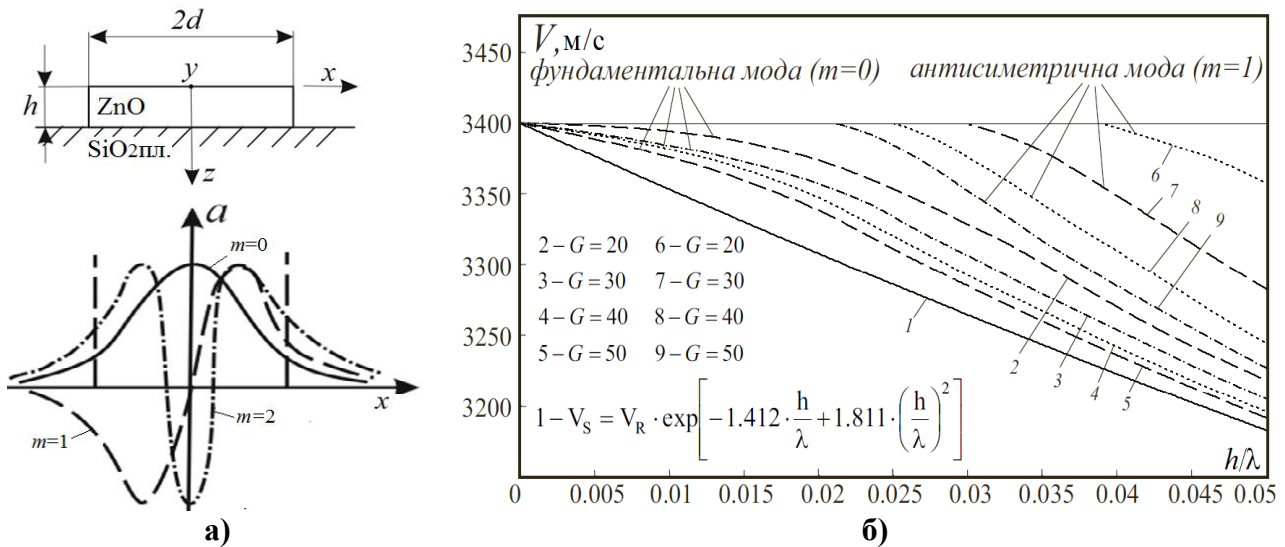


Рис. 14. Профілі механічних зміщень ПАХ для перших 3-х мод (а) та дисперсійні характеристики для перших двох мод (б) плівкового п'єзоелектричного ПАХ-хвильовода

Досліджені концентратори ПАХ, які використовуються для збудження ПАХ-хвильоводів: малоапертурний ЗШП; концентричний ЗШП; рупорний концентратор (рис.15). У випадку використання малоапертурного ЗШП (рис. 15, а) для збудження ПАХ у хвильоводі необхідно враховувати дифракційні ефекти, виникаючі за границями першої зони Френеля, границя якої визначається співвідношенням $l \approx W^2/\lambda$. Для типового значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку $k^2 = (1 \div 5)\%$ оптимальне значення апертури складає $W = (5 \div 10)\lambda$.

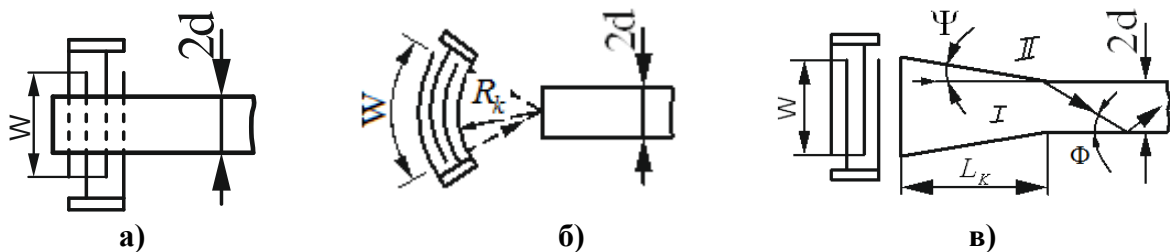


Рис. 15. Концентратори ПАХ: а – малоапертурний; б – концентричний; в - рупорний

Для концентричного ЗШП (рис. 15, б) отримано співвідношення, яке пов'язує конструктивні параметри з нормованою товщиною плівки ZnO h/λ , забезпечуючи при цьому одномодовий режим поширення ПАХ у хвильоводі:

$$W/R_k = 4 \sqrt{\exp\left[2,824(h/\lambda) - 3,622(h/\lambda)^2\right] - 1}. \quad (15)$$

Як показали експериментальні дослідження, концентричний ЗШП має високу ефективність. Однак, його застосування обмежується вимогами точного попадання точки фокуса в центр перерізу хвильоводу.

Для рупорного концентратора (рис. 15, в) критичний кут повного внутрішнього відбиття акустичного пучка визначається співвідношенням:

$$\Phi_{kp} = \arccos(V/V_{II}), \quad (16)$$

де V та V_{II} – відповідно фазові швидкості ПАХ в області хвильоводу і підкладки.

При $\Phi \leq \Phi_{kp}$ відбувається повне внутрішнє відбиття пучка у хвильоводі.

Використовуючи (13) і (16), отримана залежність критичної апертури ЗШП від довжини концентратора L_k та конструктивних параметрів хвилеводу G та h :

$$W_{kp} = 2L_k \operatorname{tg}(0,5\Phi_{kp}) + 2hG. \quad (17)$$

На рис. 16 представлено результати розрахунків критичних значень кута Φ_{kp} і апертури ЗШП W_{kp} від нормованої товщини плівки ZnO при фазовій швидкості ПАХ на поверхні підкладки $\text{SiO}_2\text{пл.}$ $V_{\Pi} = 3400$ м/с та залежностей для фазової швидкості ПАХ у хвилеводі V , представлених формулою (13) та рис. 14, б.

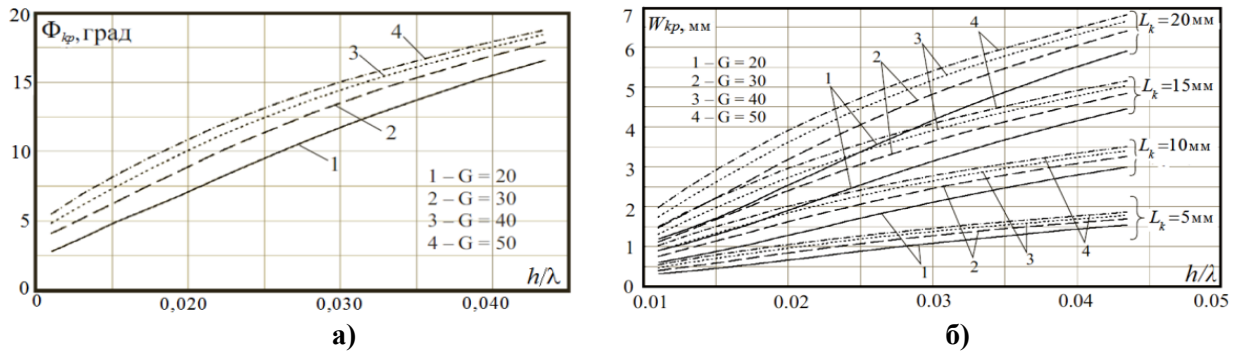


Рис. 16. Залежності критичних значень кута Φ_{kp} (а) та апертури ЗШП W_{kp} (б) від нормованої товщини плівки ZnO

Експериментально досліджені плівкові хвилеводи та концентратори ПАХ на основі структури ZnO-SiO₂пл. з використанням лазерної установки оптичного зондування гомодинного типу, в якій застосована модуляція світлової хвилі, що обумовлена періодичною зміною нормальної компоненти зміщення ПАХ, яка дозволяє досліджувати розподілення амплітуди і фази ПАХ, що поширюється по поверхні хвилеводу. На рис. 17 зображено експериментальні зразки прямолінійного та кільцевого хвилеводів ПАХ.

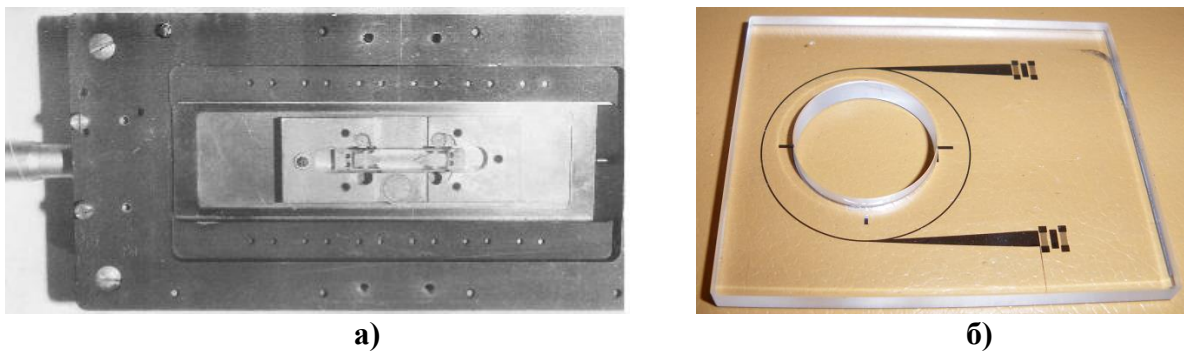


Рис. 17. Прямолінійний (а) та кільцевий (б) ПАХ-хвилеводи

Збудження хвилеводів на частотах $f = 72 \div 69$ МГц (довжина ПАХ $\lambda \approx 46,5 \div 48,55$ мкм) здійснювалося за допомогою малоапертурного ЗШП, концентричного ЗШП і рупорного концентраторів (рис.15).

За допомогою малоапертурного ЗШП з апертурою $W = 0,46$ мм та концентричним ЗШП з апертурою $W = 2,5$ мм і радіусом кривизни $R_k \approx 2,17$ мм збуджувався хвилевід з шириною $2d = 100$ мкм при товщині плівки ZnO $h = 1,0 \div 1,2$ мкм.

Рупорний концентратор ПАХ експериментально досліджувався з прямолінійним та кільцевим хвилеводом з радіусом $R = 15$ мм, шириною $2d = 100 \div 150$ мкм і товщиною п'єзоелектричної плівки ZnO $h = 1,0 \div 1,4$ мкм.

На рис. 18 зображено профілі ПАХ на вході хвилеводів при різних методах збудження: ширина хвилеводів $2d = 100$ мкм; товщина п'єзоелектричної плівки ZnO $h = 1,0$ мкм; довжина рупорного концентратора $L_k = 21,75$ мм; радіус концентричного ЗШП $R_k \approx 2,17$ мм.

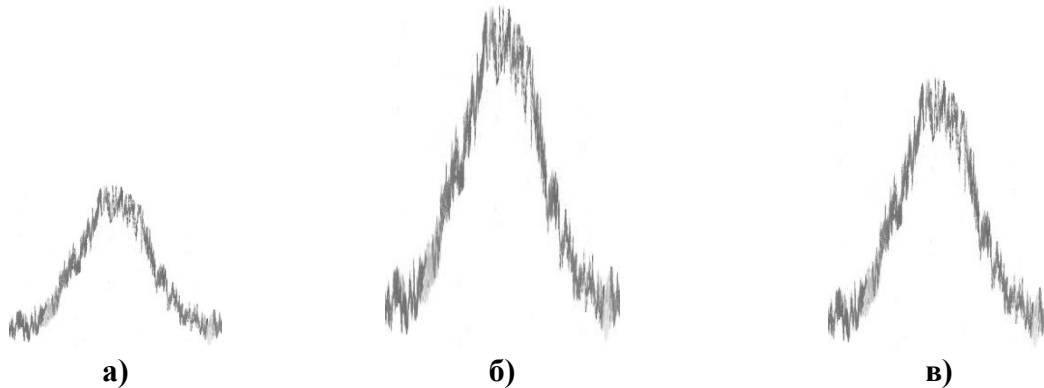


Рис. 18. Профілі ПАХ на вході хвилеводу при різних методах збудження:
а – малоапертурний ЗШП; б – концентричний ЗШП; в – рупорний концентратор

Концентричний ЗШП має найбільшу ефективність, але його використання обмежено необхідністю точного потрапляння точки фокусу на вхід кільцевого хвилеводу, що представляє собою значну технологічну складність. Використання рупорного концентратора дозволяє з достатньою ефективністю збуджувати ПАХ у хвилеводі. Його застосування у перетворювачах ЛП, а особливо КП та швидкості, є доцільним, з урахуванням конструктивних особливостей, і дозволяє отримати достатню концентрацію ПАХ, а технологія його виготовлення співпадає з технологією нанесення п'єзоелектричної плівки ZnO на плавлений кварц як для формування плівкових ЗШП, так і концентратора і хвилеводу, які виготовляються в одному технологічному процесі.

На рис. 19 зображено експериментальні залежності амплітуди (а) і фази (б) ПАХ вздовж напрямку поширення хвилі у хвилеводі.

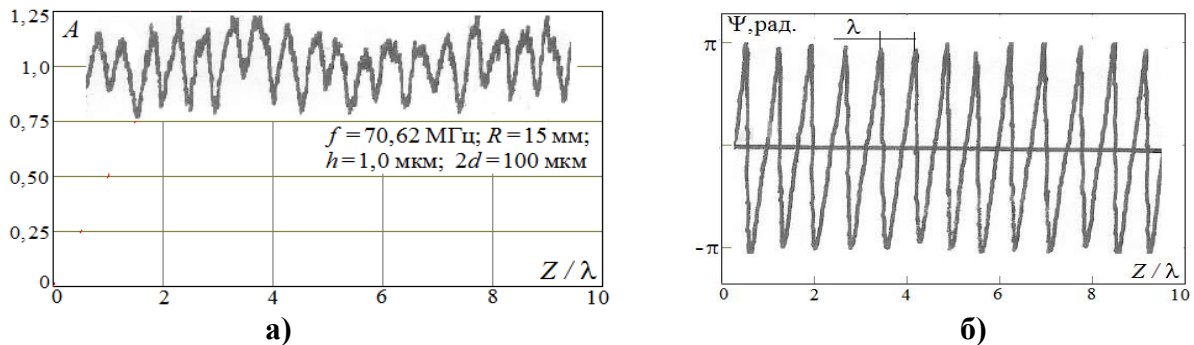


Рис. 19. Експериментальні залежності амплітуди (а) і фази (б) ПАХ у хвилеводі

В результаті експериментів отримано, що при товщині плівки ZnO $h = 1,0 \div 1,2$ мкм середнє згасання амплітуди ПАХ у прямолінійному хвилеводі складає $1,5 \div 2,0$ дБ/см. Згасання амплітуди ПАХ в кільцевому хвилеводі з радіусом $R = 15$ мм складає $2,4$ дБ/см. При зміні ширини кільцевого хвилеводу з 100 мкм до

150 мкм згасання амплітуди ПАХ збільшувалось майже до 2,8 дБ/см, при цьому спостерігалось спотворення форми профілю хвилі, що пояснюється порушенням однододового режиму. Результати досліджень показали можливість використання плівкових п'єзоелектричних хвильоводів ПАХ у АЕП лінійних, кутових переміщень та швидкості. У кожному конкретному випадку необхідно обґрунтовувати вибір того чи іншого методу збудження хвильоводу, концентратора, конструктивних параметрів, у тому числі товщини плівки ZnO.

У четвертому розділі представлено результати розробки та експериментального дослідження 3-х частотного генераторного блоку, що містить три ПАХ-генератори на основі ЛЗ на ПАХ з секційним ЗШП (рис. 20), який призначений для збудження ПАХ у п'єзоелектричному звукопроводі (хвильоводі) ПП лінійних, кутових переміщень та швидкості.

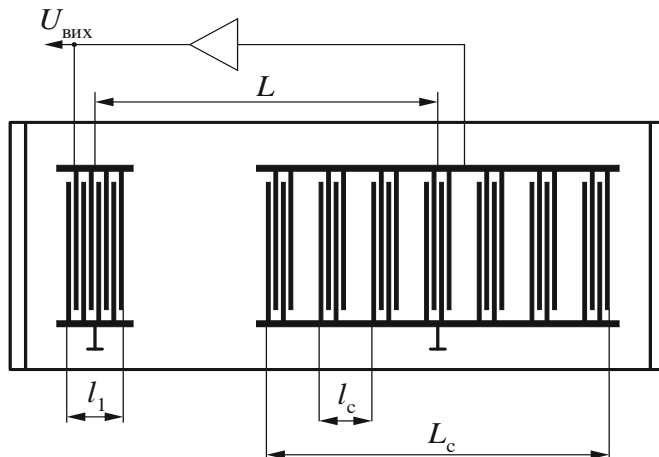


Рис. 20. Функціональна схема ПАХ-генератора

ЛЗ на ПАХ побудовані на основі звукопроводів із кварцу *ST*-зрізу, на яких сформовані еквідистантний зустрічно-штировий перетворювач з кількістю електродів $N_1 = 40$ і 7-ми секційний ЗШП з кількістю електродів в кожній секції $N_2 = 20$. На рис. 21 представлені теоретичні АЧХ та ФЧХ, конструкція та експериментальна АЧХ ЛЗ на ПАХ. Смуги пропускання ЛЗ на ПАХ на рівні -3 дБ складають 380...400 кГц при втратах 17,5 ÷ 19,0 дБ.

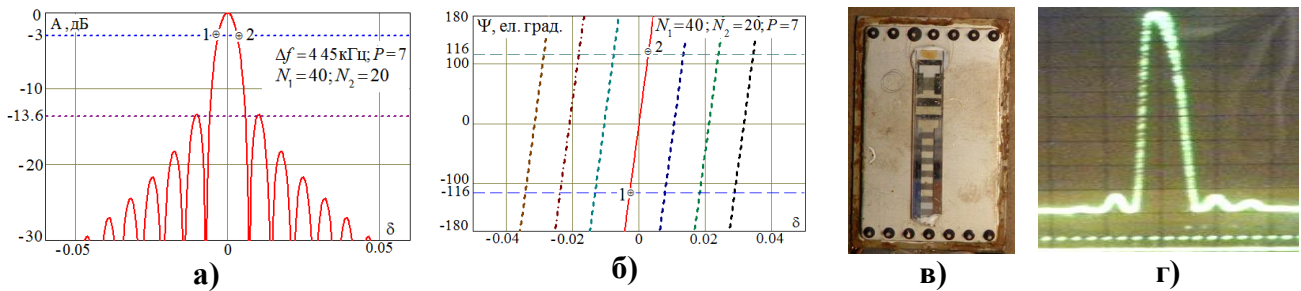


Рис. 21. Теоретичні АЧХ (а) та ФЧХ (б), експериментальні зразок (в) та АЧХ (г) ЛЗ на ПАХ з секційним ЗШП

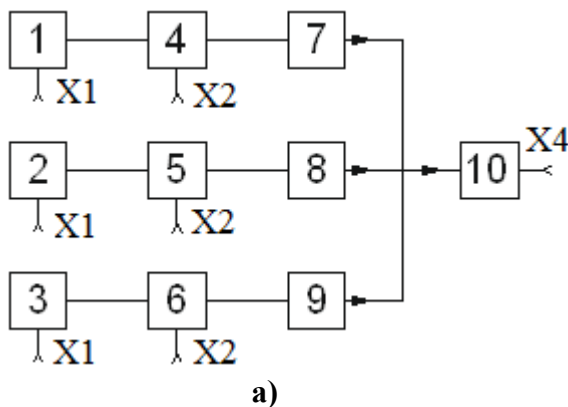


Рис.22. Структурна схема (а) та макет 3-х частотного генераторного блоку

Генераторний блок (рис.22) складається із трьох ПАХ-генераторів $1 \div 3$ на транзисторах типу 2Т 3101А-2, вихідні сигнали генераторів поступають на підсилювачі $4 \div 6$ на транзисторах типу 2Т3101А-2, вихідні підсилювачі $7 \dots 9$ побудовані на транзисторах 2Т 607А-4, вихідні сигнали яких поступають на вхід резистивного суматора 10. Перестроювання частот ПАХ-генераторів здійснюється за допомогою варикапів типу КВ 109Д шляхом зміни імпедансів вхідних та вихідних узгоджувальних контурів керуючими напругами, що подаються на роз'єм Х1. Контроль частот ПАХ-генераторів здійснюється по сигналам, що знімаються з роз'ємів Х2. На резисторі суматора 10 виділяється сигнал у вигляді суперпозиції гармонічних коливань з частотами f_i , який у подальшому поступає на вхідний ЗШП перетворювача фізичних величин на ПАХ.

В табл. 2 представлені параметри генераторного блоку, які отримані при випробуванні.

Таблиця 2. Електричні параметри 3-х частотного генераторного блоку

Найменування параметра	Генератори на частоти f_i			
	Од. вим.	f_1	f_2	f_3
Центральна частота	МГц	69,52	70,62	71,69
Діапазон перестроювання частоти	МГц	0,366	0,382	0,385
Короткочасна нестабільність частоти	с^{-1}	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Керуюча напруга	В	$0 \div 7,85$	$0,2 \div 8,89$	$3,6 \div 8,0$
Амплітуда вихідного сигналу генератора при вимкненні двох інших	В	1,4	1,4	1,5
Розв'язок між каналами	дБ	Не менше 30	Не менше 30	Не менше 30
Напруга живлення	В	-12	-12	-12

Результати розробки генераторного блоку та експериментальних досліджень підтверджують, що вибір генераторного блоку на основі ПАХ-генераторів є доцільним, електричні параметри таких генераторів достатні для забезпечення вимог, що пред'являються до АЕП на ПАХ, а також дозволяють здійснювати налаштування на робочі частоти при проведенні калібрування перетворювачів. Такі генератори мають просту конструкцію, а застосування в якості частотнозадавальних елементів ЛЗ на ПАХ на основі кварцу ST -зрізу забезпечує високу термостабільність. Результати експериментальних випробувань відрізняються від розрахункових не більше $10 \div 15$ % і підтверджують можливість використання 3-х частотного генератора в АЕП на ПАХ.

У п'ятому розділі представлено результати розробки 3-х частотного блоку підсилення та фільтрації вихідних сигналів ПАХ-приймача. Обґрунтовано вибір фільтрів на ПАХ для частотного розділення сигналів, в яких для забезпечення заданого гарантованого ослаблення сигналів за смугою прозорості запропоновано та обґрунтовано використання фазового зважування вхідного і вихідного ЗШП за функцією Хеммінга, що дозволило в найбільшій степені приблизити розрахункові і експериментальні параметри за рахунок мінімізації різного роду вторинних паразитних ефектів і забезпечити мінімальні втрати. Апертура обох ЗШП вибрана $44\lambda_0$. Відстань між центрами ЗШП складає $225\lambda_0$.

На рис. 23 представлені теоретична і експериментальна АЧХ та зразок ПАХ-фільтра. Смуги пропускання фільтрів $480 \div 500$ кГц, вносимі втрати $15,5 \div 17,0$ дБ. Гарантоване ослаблення сигналів за смугами пропускання не менше 45 дБ.

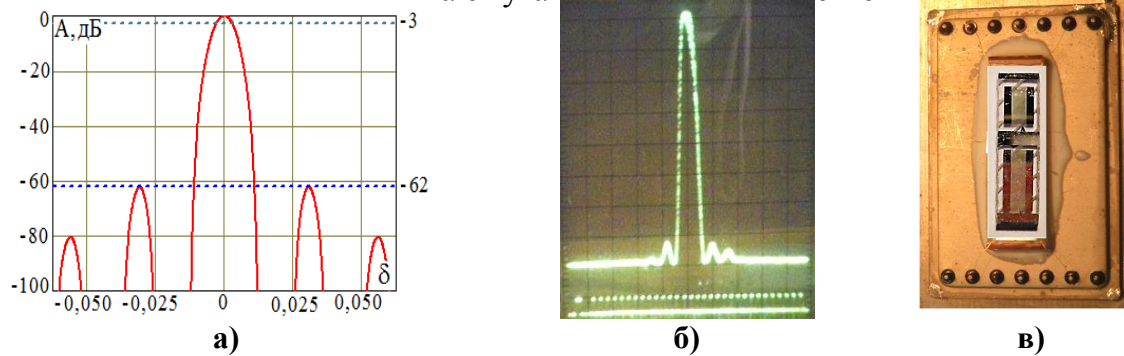


Рис. 23. Теоретична (а) і експериментальна (б) АЧХ та зразок ПАХ-фільтра (в)

На рис. 24 приведені структурна схема та макет 3-х частотного блоку підсилення та фільтрації вихідних сигналів перетворювача лінійних та кутових переміщень на ПАХ. В табл. 3 приведені результати експериментальних випробувань 3-х частотного блоку підсилення та фільтрації вихідних сигналів ПАХ-приймача.

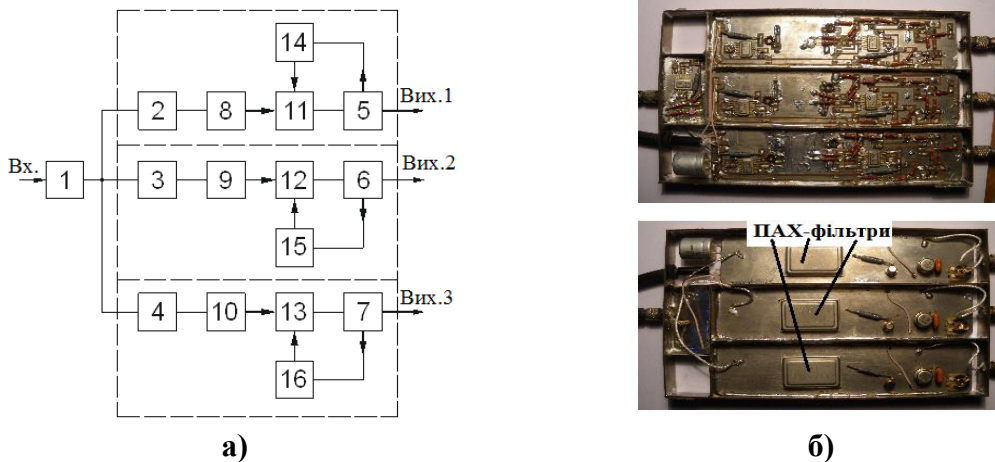


Рис. 24. Структурна схема (а) та макет (б) 3-х частотного блоку підсилення та фільтрації вихідних сигналів ПАХ-приймача

Таблиця 3. Електричні параметри макетів 3-х частотного блоку підсилення та частотної фільтрації вихідних сигналів ПАХ-приймача

Найменування параметра	Од. вим.	Значення параметра	
		Зразок № 1	Зразок № 2
Центральна частота каналів : першого; другого; третього	МГц	70,68; 69,46; 71,75	70,65; 69,53; 71,70
Смуги пропускання каналів: першого; другого; третього	кГц	460; 456; 460	458; 455; 460
Напруги входних сигналів	мВ	$0,3 \div 1,0$	$0,3 \div 1,0$
Вихідні напруги каналів	мВ	95	105
Глибина автоматичного регулювання підсилення при входному сигналі $0,3 \dots 1,0$ мВ	дБ	Не гірше -20	Не гірше -20
Напруга живлення	В	+6,3	+6,3
Струм споживання	А	0,32	0,33

Блок підсилення та фільтрації складається із входного підсилювача 3-х частотного сигналу 1 і трьох каналних підсилювачів, що містять підсилювачі 2 ÷ 7, три ПАХ-фільтри 8 ÷ 10, атенюатори 11 ÷ 13 і детектори 14 ÷ 16, які виробляють сигнали для керування атенюаторами. В якості активних елементів високочастотних

підсилювачів 1 ÷ 7 вибрана мікросхема М42177-2. Результати експериментальних випробувань відрізняються від розрахункових не більше 10 ÷ 15 % і підтверджують можливість застосування 3-х частотного блоку підсилення та фільтрації в АЕП.

У шостому розділі приведено результати дослідження макетів АЕП лінійних та кутових переміщень на основі використання фазового набігання електричного поля на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу (хвильоводу) ПАХ, що приймаються безконтактним ПАХ-приймачем.

На рис. 25 представлено конструкції 3-х частотних ПП лінійних переміщень на основі LiNbO_3 YZ-зрізу (а) і п'єзоелектричної структури ZnO-SiO_2 пл. (б) та макет перетворювача (в).

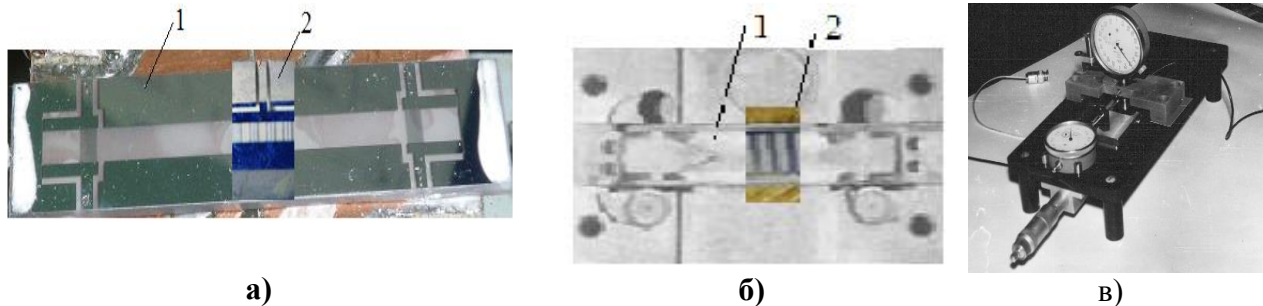


Рис. 25. 3-х частотні первинні перетворювачі лінійних мікропереміщень:
1-акустoeлектричний модуль; 2- ПАХ-приймач

На рис. 26 представлено модуль ПП кутових переміщень на основі хвильовідної плівкової п'єзоелектричної структури ZnO-SiO_2 пл. (а), кільцевий ПАХ-приймач (б) та макет 3-х частотного ПП кутових переміщень (в).

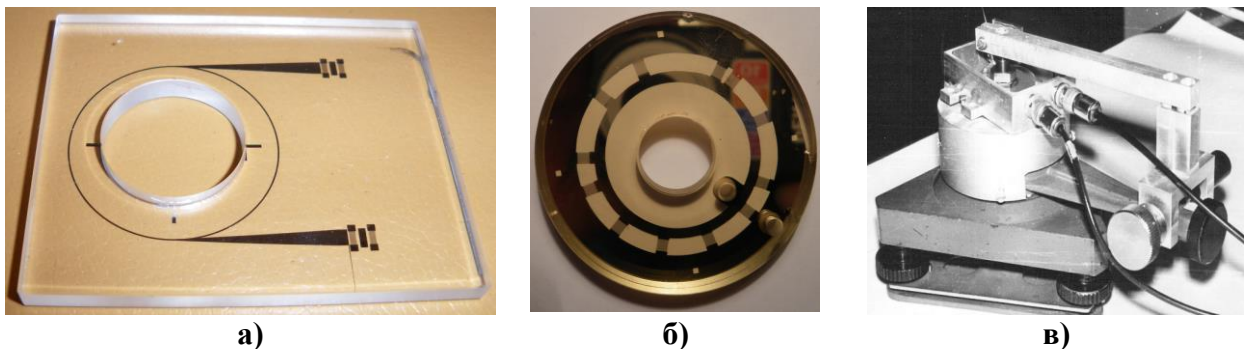


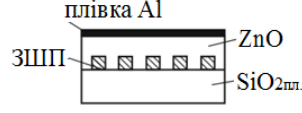
Рис. 26. Акустoeлектричний модуль (а), кільцевий ПАХ-приймач (б) та макет (в) ПП кутових переміщень на основі п'єзоелектричної структури ZnO-SiO_2 пл.

В табл. 4 представлені основні конструктивні параметри ПАХ-модулів 3-х частотних перетворювачів лінійних переміщень та кутових переміщень на ПАХ. Акустoeлектричні модулі ПП лінійних переміщень (рис. 25, а та б) розміщувались на платформі макету (рис. 25, в), яка переміщувалась відносно ПАХ-приймача за допомогою мікрометричного гвинта, а контроль величини переміщення здійснювався за допомогою індикатора 1 МИГ з ціною поділок 1 мкм. Зазор між поверхнею звукопроводу (хвильоводу) та ПАХ-приймачем і його контроль забезпечувався також за допомогою індикатора 1 МИГ.

При дослідженні метрологічних параметрів макета перетворювача кутових переміщень (рис. 26, в) ПАХ-приймач (рис. 26, б) розміщувався на вал установки над кільцевим хвильоводом ПАХ (рис. 26, а) за допомогою тонких діелектричних плівок, а кутове переміщення ПАХ-приймача контролювалося автоколیمатором АК-0,5У з

ціною поділок секундної шкали 0,5 кут.сек. і ціною поділок грубої шкали 30 кут.сек. При діапазоні вимірювання 20 кутових хвилин на валу макету розміщувалася призма з 10-ю гранями. Вимірювання виконувались на довільних ділянках хвилеводу.

Таблиця 4. Розрахункові параметри акустoeлектричних модулей 3-х частотних перетворювачів лінійних та кутових переміщень на ПАХ

Найменування параметра	ПП лінійних переміщень	ПП лінійних переміщень	ПП кутових переміщень
Матеріал п'єзoeлектричного звукопроводу (хвилеводу)	LiNbO ₃ YZ-зрізу	Структура ZnO-SiO ₂ пл.	
Тип вхідного і контрольного ЗШП	Еквідистантний	Еквідистантний плівковий <div style="text-align: center;">  </div>	
Центральні частоти f_i , МГц	70,62; 69,52; 71,69	70,62; 69,52; 71,69	70,62; 69,52; 71,69
Параметри хвилеводу: - радіус хвилеводу R , мм - ширина хвилеводу $2d$, мкм - товщина плівки ZnO, h , мкм - довжина рупорного концентратора L_k , мм			15
		100 ÷ 150	100 ÷ 150
		1,0 ÷ 1,4	1,0 ÷ 1,4
		10	21,75

На рис. 27 представлена функціональна схема та стенд для дослідження метрологічних характеристик 3-х частотних АЕП ЛПІ та КП на ПАХ.

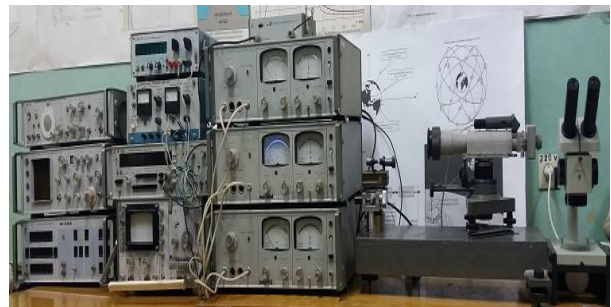
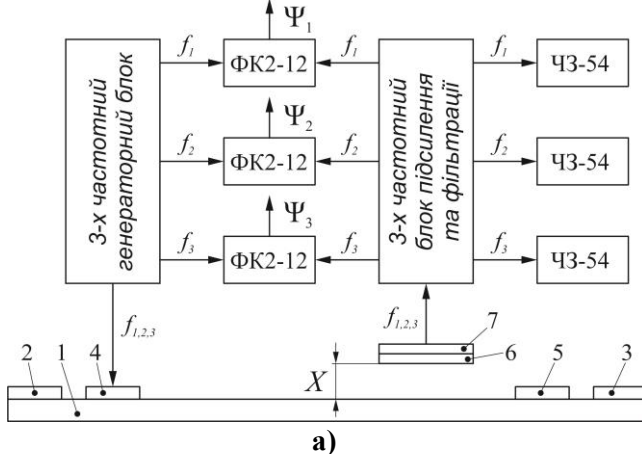


Рис. 27. Функціональна схема (а) та стенд (б) для випробування метрoлогічних характеристик 3-х частотного АЕП лінійних та кутових переміщень на ПАХ:
1 – п'єзoeлектричний звукопровід (хвилевід); 2 і 3 – поглиначі ПАХ – шар компаунду;
4 і 5 – відповідно вхідний та контрольний ЗШП; 6,7 – ПАХ-приймач

Електричний сигнал від 3-х частотного генераторного блоку у вигляді суми трьох високочастотних коливань з частотами f_i ($i = 1, 2, 3$) поступав на вхідний ЗШП і збуджував в п'єзoeлектричному звукопроводі (хвилеводі) ПАХ, яка приймалася ПАХ-приймачем, сигнал з якого поступав на блок підсилення та фільтрації, вихідні сигнали з якого у вигляді трьох окремих сигналів з частотами f_i поступали на фазометри ФК2-12, на які з генераторного блоку поступали опорні сигнали з тими же частотами.

Візуальне спостереження форми, вимірювання напруги та частоти вихідних сигналів здійснювалось за допомогою осцилографа С1-75 і цифрового вимірювача частоти ЧЗ-54.

На рис. 28 представлено результати вимірювання напруги U та приросту фази $\Delta\psi$ вихідного сигналу ПАХ-приймача від нормованого зазору X/λ між поверхнею звукопроводу (хвильоводу) та ЗШП ПАХ-приймача. Зменшення рівня вихідного сигналу та приросту фази для макету на основі плівкового хвильоводу пояснюється меншим коефіцієнтом електромагнітного зв'язку структури ZnO-SiO_2 пл.

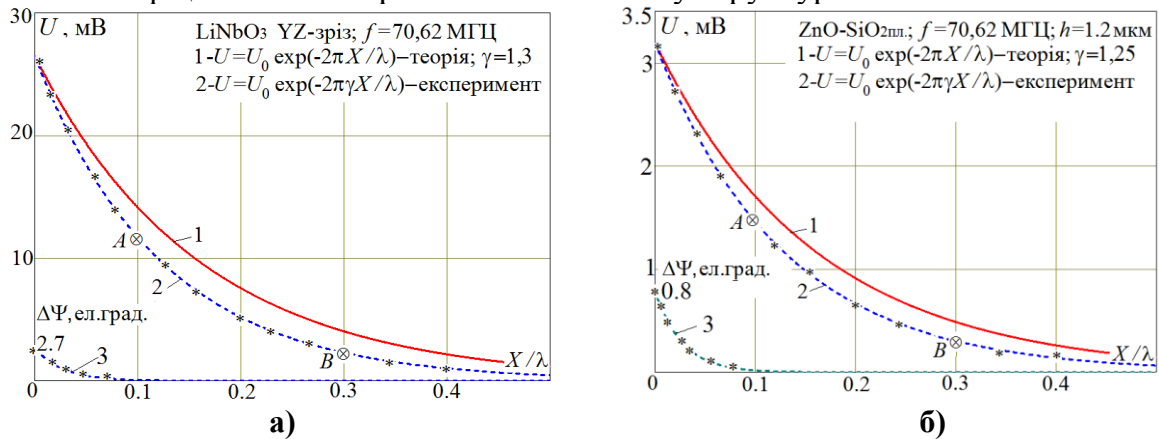


Рис. 28. Залежності напруги та приросту фази вихідних сигналів ПАХ-приймача ЛП на основі ніобат літію LiNbO_3 YZ-зрізу (а) та КП на основі хвильовідної плівкової п'єзoeлектричної структури ZnO-SiO_2 пл. від нормованого зазору

Із результатів випробувань випливає, що по мірі приближення ПАХ-приймача до поверхні п'єзoeлектричного звукопроводу виникає додатковий фазовий зсув $\Delta\psi$ у вихідному сигналі в результаті дисперсії фазової швидкості хвилі, що викликається збуренням електричного поля ПАХ. Це вимагає високої точності виготовлення ЛП для забезпечення переміщення ПАХ-приймача паралельно поверхні звукопроводу (хвильоводу). Рекомендований діапазон зазору між приймачем та поверхнею звукопроводу знаходиться в інтервалі $X/\lambda = 0,10 \div 0,30$.

Вносимі втрати по напрузі при $X/\lambda = 0$ на центральній частоті $f_1 = 70,62$ МГц перетворювача ЛП на основі LiNbO_3 YZ-зрізу склали $K_1 = -15,1$ дБ. При зміні нормованого зазору в інтервалі $X/\lambda = 0,1 \div 0,3$ (ділянка А-В на рис. 28, а) вносимі втрати змінювалися в межах $K_1 = -(18,6 \div 25,7)$ дБ.

Вносимі втрати по напрузі при $X/\lambda = 0$ на центральній частоті $f_1 = 70,62$ МГц перетворювача на базі хвильовідної плівкової п'єзoeлектричної структури ZnO-SiO_2 пл. при нормованій товщині плівки $h = 1,2$ мкм та ширині хвильоводу $2d = 120$ мкм склали $K_1 = -24$ дБ. При зміні нормованого зазору в інтервалі $X/\lambda = 0,1 \div 0,3$ (ділянка А-В на рис. 28, б) втрати змінювалися в межах $K_1 = -(24,4 \div 34,2)$ дБ.

Вимірювання градувальних характеристик $\Phi_i = \Phi(Z)$ та $\Phi_i = \Phi(\varphi)$ і розрахунок метрологічних параметрів проводилися для сигналів на трьох частотах f_i макетів АЕП лінійних та кутових переміщень з параметрами, приведеними в табл.4.

ПАХ-приймач переміщувався уздовж п'єзoeлектричного звукопроводу (хвильоводу) на відстані $X/\lambda_1 \approx 0,15$ від його поверхні.

Вимірювання проводились на окремих ділянках діапазонів: лінійних переміщень $Z = 0 \div 30$ мм; кутових переміщень $\varphi = 0 \div 360$ кут.град.

Осередненні градувальні характеристики перетворювачів переміщень на кожній частоті (точні вимірювальні шкали, рис. 29...31, а) мають лінійний характер в інтервалі $-180...+180$ ел.град. з періодами, що дорівнюють довжинам ПАХ λ_i . Градувальні характеристики для проміжних (рис. 29...31, б) та грубих вимірювальних шкал (рис. 29...31, в) побудовані по результатам вимірювання на точних шкалах.

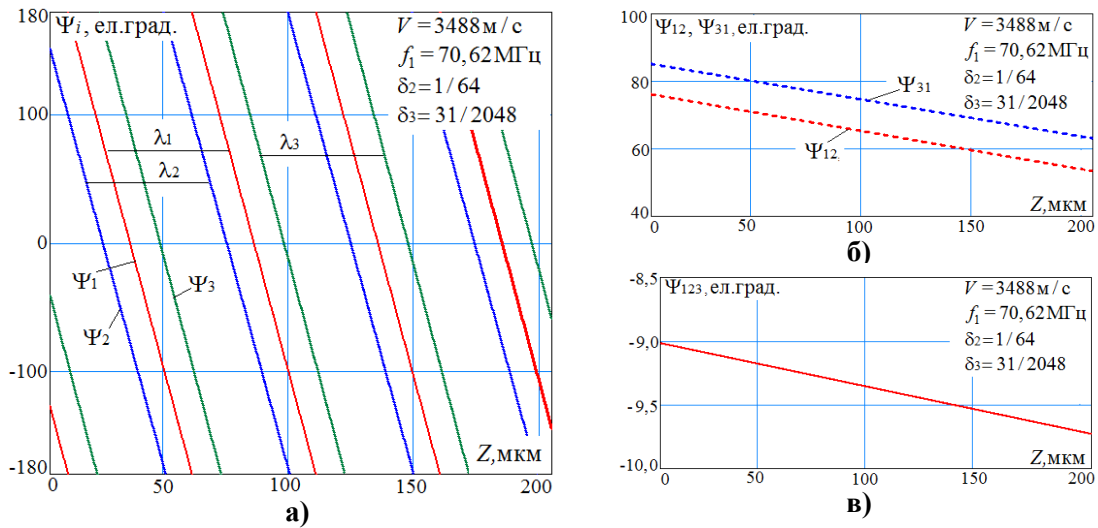


Рис. 29. Градувальні характеристики 3-х частотного АЕП лінійних переміщень на базі LiNbO₃ YZ-зрізу

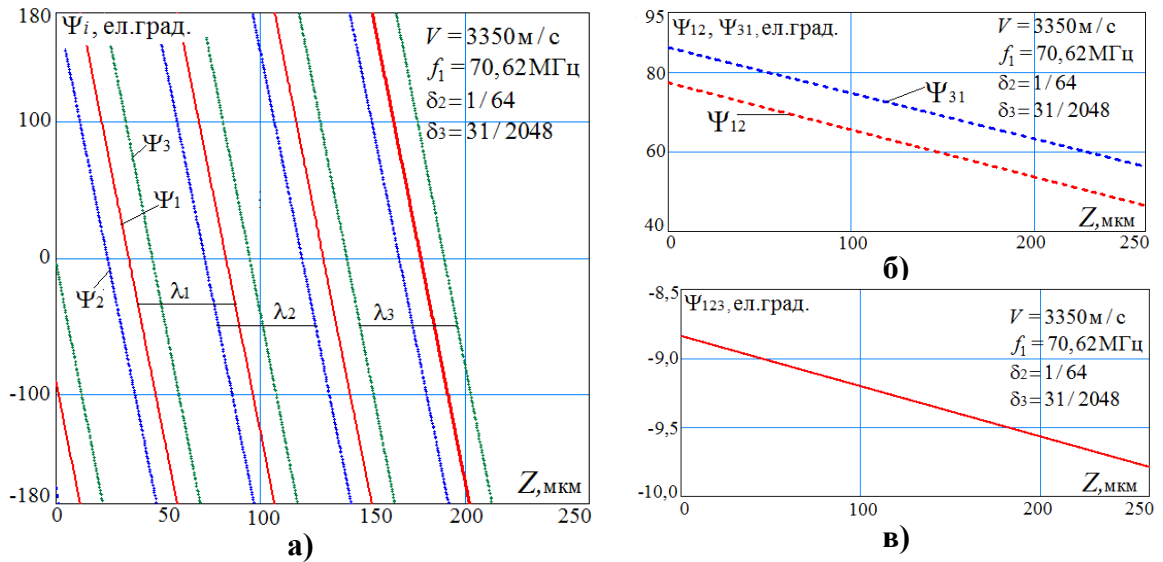


Рис. 30. Градувальні характеристики 3-х частотного АЕП лінійних переміщень на базі структури ZnO-SiO₂/ПЛ

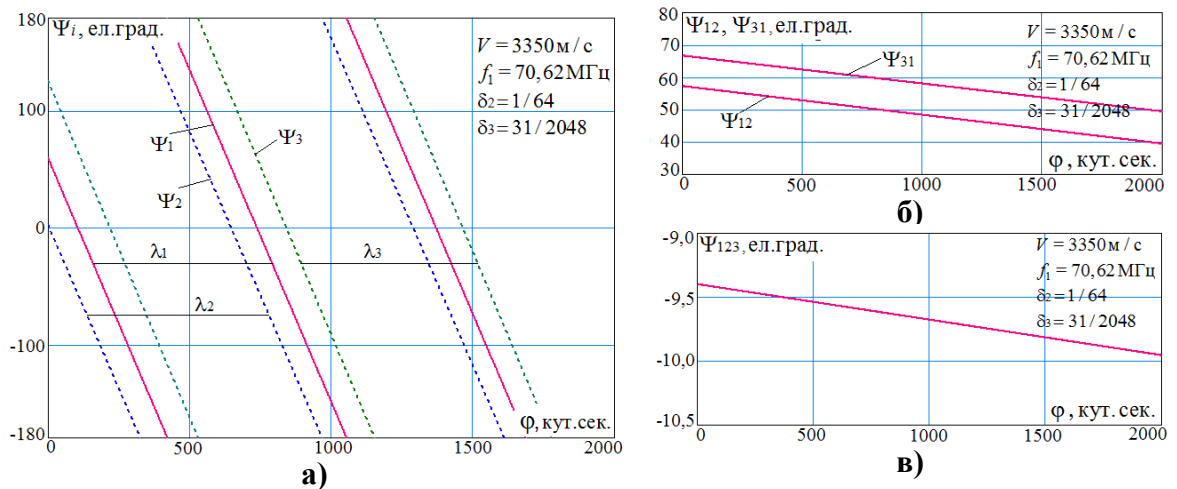


Рис. 31. Градувальні характеристики 3-х частотного перетворювача кутових переміщень на основі структури ZnO-SiO₂/ПЛ

В табл. 5 представлено осередненні по 16 ділянкам метрологічні параметри досліджених АЕП лінійних та кутових переміщень на ПАХ.

Таблиця 5. Метрологічні параметри макетів АЕП лінійних та кутових переміщень з безконтактним ПАХ-приймачем

Найменування параметрів	Акустoeлектронний перетворювач		
	лінійних переміщень		кутових переміщень
Матеріал звукопровода (хвилевода)	Ніобат літію LiNbO ₃ YZ-зрізу	Плівкова структура ZnO-SiO ₂ пл.	
Діапазон переміщень : Z, мм ; φ, кут.град.	0...30	0...30	0...360
Коефіцієнт перетворення в границях одної довжини хвилі, ел.град/мкм, ел.град./кут.сек:			
$S_1 = \bar{S}_1 \pm \delta_t$	7,28 ± 2 %	7,59 ± 2 %	0,55 ± 0,5 %
$S_2 = \bar{S}_2 \pm \delta_t$	7,17 ± 2 %	7,47 ± 2 %	0,54 ± 0,5 %
$S_3 = \bar{S}_3 \pm \delta_t$	7,41 ± 2 %	7,71 ± 2 %	0,56 ± 0,5 %
Основна похибка в границях одної довжини ПАХ:			
1. Найбільше значення основної приведенної похибки :			
$\gamma_{пр.1}^{осн}, \%$	0,75	0,83	0,52
$\gamma_{пр.2}^{осн}, \%$	0,80	0,72	0,51
$\gamma_{пр.3}^{осн}, \%$	0,72	0,79	0,48
2. Найбільше значення основної відносної похибки, що визначається за формулою $\delta^{осн} = \pm \left[c + d \left(\frac{Z_{кр} n}{Z} - 1 \right) \right] \cdot 100\%$			
$c_1, \%$	0,80	0,82	0,65
$d_1, \%$	0,43	0,48	0,30
$c_2, \%$	0,90	0,85	0,72
$d_2, \%$	0,46	0,42	0,35
$c_3, \%$	0,85	0,87	0,68
$d_3, \%$	0,42	0,45	0,32
3. Найбільше значення приведенної нелінійності функції перетворення:			
$\gamma_{пр.1}^H, \%$	0,25	0,28	0,30
$\gamma_{пр.2}^H, \%$	0,27	0,35	0,27
$\gamma_{пр.3}^H, \%$	0,30	0,25	0,33
4. Найбільше значення приведенної варіації (гістерезису) вихідного сигналу:			
$\gamma_{пр.1}^F, \%$	0,35	0,40	0,35
$\gamma_{пр.2}^F, \%$	0,38	0,36	0,36
$\gamma_{пр.3}^F, \%$	0,30	0,37	0,32

Примітка. Довірча вірогідність результатів вимірювання метрологічних параметрів не менше 0,95.

Результати випробувань підтвердили теоретичні обґрунтування можливості створення високочутливих акустoeлектронних перетворювачів лінійних (кутових) переміщень з коефіцієнтом перетворення вище 7,0 ел.град./мкм (0,50 ел.град./кут.сек.) в діапазоні до 100 мм і вище (до 360 кут.град.).

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 мм (11, 25 кут град).

У цьому розділі запропоновано, теоретично обґрунтовано та практично реалізовано метод вимірювання мікропереміщень та тиску з використанням дисперсії фазової швидкості в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, що поширюється на поверхні п'єзoeлектричного звукопроводу.

Розроблена та досліджена математична модель, яка пов'язує метрологічні параметри перетворювача з конструктивними параметрами ПАХ-модуля з п'єзoeлектричним звукопроводом та мембрани (зонда) (рис. 32).

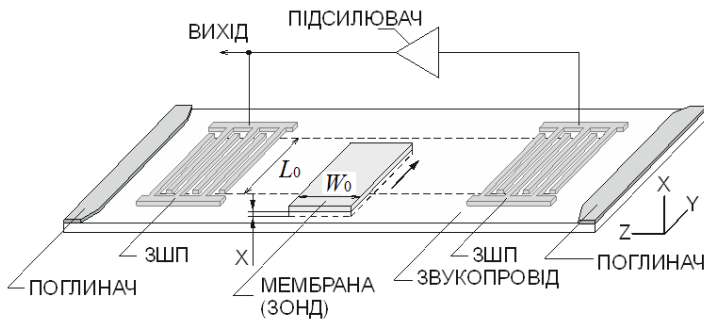


Рис. 32. Функціональна схема АЕП мікропереміщень та тиску

Усі елементи перетворювача розміщуються у корпусі, який герметично закритий мембраною, що переміщується в електричному полі ПАХ, потенціал якого змінюється при віддаленні від поверхні звукопроводу за формулою $\varphi = \varphi_0 \exp(-2\pi\rho)$, де φ_0 – потенціал електричного поля на поверхні звукопроводу; $\rho = x/\lambda_0$ – нормований зазор; x – відстань від п'єзoeлектричної поверхні до мембрани; $\lambda_0 = V_0/f_0$; V_0 та λ_0 – фазова швидкість та довжина ПАХ на вільній поверхні звукопроводу; f_0 – частота ПАХ (частота генератора).

Показано, що збурення електричного поля мембраною призводить до додаткового набігання фази на збуреній ділянці, яке визначається співвідношенням:

$$\Psi_x = \pi N k \exp(-2\pi\rho), \quad (18)$$

де $N = W_0/\lambda_0$ – число довжин ПАХ на збуреній ділянці звукопроводу; $k = -2[V(x) - V_0]/V_0$ – коефіцієнт електромеханічного зв'язку; $V(x)$ – фазова швидкість ПАХ на збуреній ділянці звукопроводу.

При частотному методі вимірювання фізичних величин частота ПАХ-генератора із врахуванням дисперсії фазової швидкості ПАХ при збуренні електричного поля хвилі:

$$f \approx \left(n - \frac{\Psi_x}{2\pi} \right) \frac{V_0}{L}, \quad (19)$$

де n – ціле число, що визначає моду коливань, звичайно $n = 100 \dots 250$; L – відстань між центрами ЗШП.

На рис. 33 зображені теоретичні (графіки 1...3) залежності фазового зсуву вихідного сигналу ЛЗ на ПАХ при збуренні мембраною електричного поля для різних матеріалів. Експериментальна залежність фазового зсуву вихідного сигналу (графік 4 на рис.33) для ніобат літію YZ-зрізу була апроксимована співвідношенням:

$$\Psi_E = 0,033\pi N \exp(-2\pi\rho). \quad (20)$$

Використовуючи співвідношення (18) та (19) приріст частоти ПАХ-генератора

(функцію перетворення) при переміщенні мембрани перпендикулярно поверхні п'єзоелектричного звукопроводу можна представити у вигляді:

$$F_x = -Nf_0 k \exp(-2\pi\rho) / 2n. \quad (21)$$

На рис. 34 представлені теоретична (графік 1) та експериментальна (графік 2) функції перетворення АЕП мікропереміщень та тиску.

Для забезпечення одномодового режиму роботи ПАХ-генератора необхідно вибирати робочу ділянку А-В таким чином, щоб діапазон зміни фазового зсуву не перевищував 180° (рис. 34 та 35).

Наприклад, для ніобата літію LiNbO_3 YZ - зрізу (при $N=50$, $\lambda_0=77$ мкм, $f_0=45,2$ МГц і $n=100$) при переміщенні мембрани в діапазоні $\rho=0,3 \div 0,1$ приріст частоти ПАХ-генератора змінювався в інтервалі $F_x \approx 57 \div 200$ кГц, тобто середній коефіцієнт перетворення мікропереміщень $S_x \approx \Delta F_x / \Delta x \approx 9,3$ кГц/мкм при потенційній роздільній здатності $\delta x = \delta f / S_x \approx 10^{-4}$ мкм, де $\delta f = 1$ Гц – роздільна здатність вимірювача частоти.

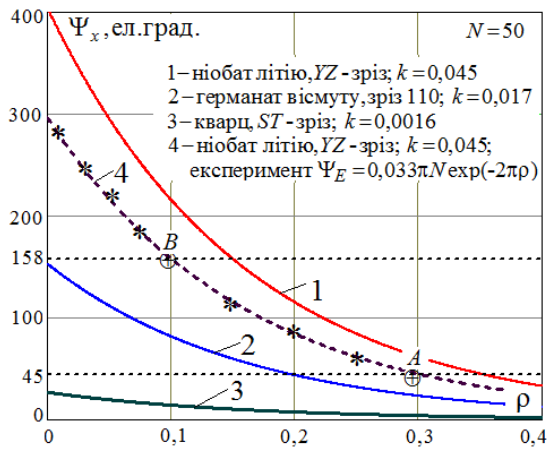


Рис. 33. Додаткове набігання фази ПАХ на збуреній ділянці звукопроводу

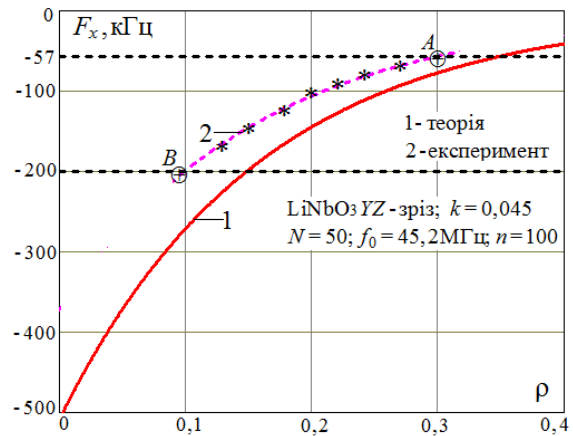


Рис. 34. Функції перетворення АЕП мікропереміщень та тиску на ПАХ

Залежність прогинання мембрани x від тиску P визначається типом мембрани та її конструктивними параметрами. У випадку мембрани з жорстким центром прогинання визначається співвідношенням:

$$x = AR^4 P / Eh^3, \quad (22)$$

де $A = 3(1-\mu^2)(c^4 - 1 - 4c^2 \ln c) / 16c^4$; $c = R/r$; R та r – робочий радіус мембрани та радіус її жорсткого центру; μ і E – коефіцієнт Пуассона та модуль пружності матеріалу мембрани; h – товщина мембрани.

Із розрахунку для мембрани із сталі при ($\mu=0,28$; $E=2,2 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $r=2 \cdot 10^{-3}$ м; $h=10^{-3}$ м; $R=15 \cdot 10^{-3}$ м) впливає, що її переміщення в інтервалі $\rho=0,3 \div 0,1$ буде здійснюватися під тиском в діапазоні $P \approx 0 \div 4,53 \cdot 10^5$ Н/м² $\approx 0 \div 3400$ мм.рт.ст. При цьому частота ПАХ-генератора змінюється в інтервалі $F_p = F_x \approx 57 \div 200$ кГц, а середній коефіцієнт перетворення тиску $S_p \approx \Delta F_p / \Delta P \approx 0,32$ Гц/Н·м⁻² $\approx 42,6$ Гц/мм.рт.ст. при потенційній роздільній здатності $\delta P = \delta f / S_p \approx 0,23$ мм.рт.ст.

При переміщенні зонда паралельно поверхні п'єзоелектричного звукопроводу у напрямку вісі ОУ (рис. 32) коефіцієнт дисперсії в результаті збурення електричного поля представляється у вигляді, $\bar{G}_n = G_n \exp(j\Psi_n)$, де G_n та Ψ_n – відповідно

коефіцієнт зміни амплітуди і приріст фази вихідного сигналу ЛЗ на ПАХ, що змінюються згідно співвідношень:

$$G_{\Pi} = \sqrt{1 - 4\rho_{\Pi}(1 - \rho_{\Pi})\sin^2\beta_{\Pi}}; \quad (23)$$

$$\Psi_{\Pi} = -\arctg \frac{\rho_{\Pi} \sin(2\beta_{\Pi})}{1 - 2\rho_{\Pi} \sin^2\beta_{\Pi}}, \quad (24)$$

де $\rho_{\Pi} = Y/L_0 = 0 \div 1$ – нормоване переміщення зонда; $\beta_{\Pi} = 0,5\pi N k \exp(-2\pi r)$ – параметр дисперсії фазової швидкості; L_0 – ширина акустичного потоку.

Тоді приріст частоти ПАХ-генератора (функцію перетворення) при переміщенні зонда у напрямку вісі ОУ визначається співвідношенням:

$$F_{\Pi} = \frac{f_0}{2\pi n} \arctg \frac{\rho_{\Pi} \sin(2\beta_{\Pi})}{1 - 2\rho_{\Pi} \sin^2\beta_{\Pi}}. \quad (25)$$

На рис. 35 представлені залежності модуля (а), аргумента (б) коефіцієнта дисперсії та приріст частоти генератора (функції перетворення) (в).

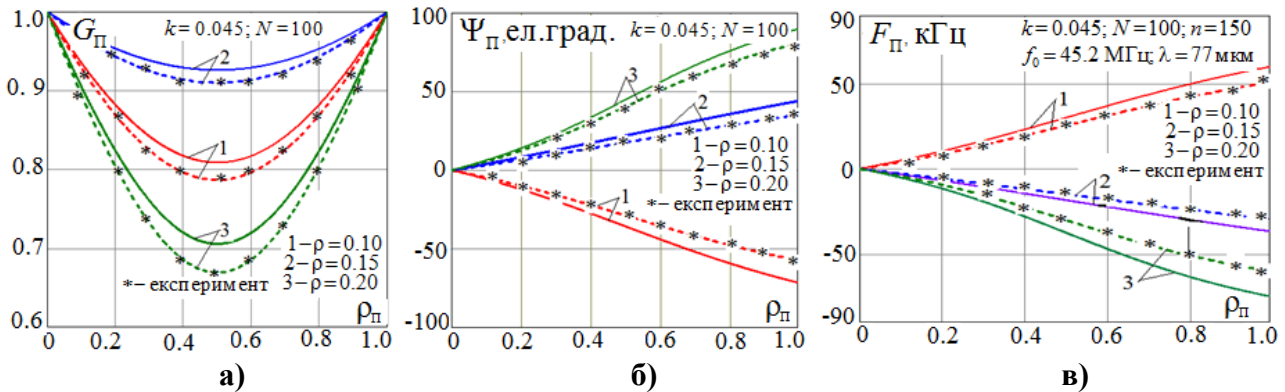


Рис. 35. Залежності модуля (а), аргумента (б) коефіцієнта дисперсії та приріст частоти генератора (функції залежності) (в)

Наприклад, для ніобата літію LiNbO_3 YZ - зрізу (при $N=100$, $\lambda_0=77$ мкм, $L_0=5$ мм, $f_0=45,2$ МГц, $\rho=0,1$ і $n=150$) при переміщенні мембрани в діапазоні $\rho_{\Pi}=0 \div 1$ отримаємо приріст частоти генератора $\Delta F_{\Pi} \approx 0 \div 51,3$ кГц, а середній коефіцієнт перетворення $S_Y \approx \Delta F_Y / \Delta Y \approx 10,25$ Гц/мкм при потенційній роздільній здатності $\delta Y \approx \delta f / S_Y \approx 0,1$ мкм.

Таким чином, при переміщенні зонда у напрямку вісі ОУ АЕП має набагато менший коефіцієнт перетворення у порівнянні з перетворювачем з переміщенням мембрани у напрямку вісі ОХ, але динамічний діапазон збільшується у $100 \div 200$ разів і визначається шириною акустичного потоку.

Запропоновані конструкції АЕП дозволяють застосовувати універсальний акустoeлектронний модуль, а чутливий елемент (мембрану, зонд) виготовляти для конкретного виду вимірювальної величини та заданого динамічного діапазону.

Розглянутий АЕП може бути застосований для вимірювання мікропереміщень, прискорення, сили, тиску, а також в якості детектора акустичних сигналів.

У восьмому розділі запропоновано і теоретично обгрунтовано схемо-технічні принципи побудови перетворювачів на ПАХ для безпровідних радіовимірювальних систем. Обгрунтована конструкція вхідного/вихідного ЗШП ПАХ для безпровідних пасивних перетворювачів фізичних величин на ПАХ, який забезпечує можливість використання технологій множинного доступу при частотно-кодовій модуляції вхідного сигналу. Особливістю цього вхідного/вихідного ЗШП є те, що він забезпечує

стиснення вхідного сигналу радіозапиту та дозволяє забезпечувати режим множинного доступу у вимірювальних системах з перетворювачами на ПАХ. Це досягається тим, що ЗШП виготовляється у вигляді секцій електродів різного періоду, з'єднаних спільною шиною, і є узгодженим фільтром для приймання та стиснення частотно-модульованого сигналу радіозапиту. Кількість секцій електродів (частот кодування) та порядок їх слідування може змінюватись для забезпечення унікальної адреси перетворювача та режиму множинного доступу у вимірювальних системах, побудованих на основі цих сенсорів. Такий вхідний/вихідний зустрічно-штировий перетворювач може бути використаний при створенні безпроводних систем ідентифікації об'єктів та радіовимірювальних систем на базі пасивних акустoeлектронних перетворювачів температури та вологості, параметрів електромагнітного поля, переміщень та тиску тощо.

Пасивна радіомітка на ПАХ (рис. 36) представляє собою ретранслюючий одновходовий пристрій на ПАХ, що містить п'єзоелектричний звукопровід 1, на поверхні якого сформовані вхідний/вихідний ЗШП для стиснення ЧМ-сигналу 2, що з'єднаний з антеною 3, та масив електродів 4. Для зменшення впливу сигналів, що відбиваються від торців звукопроводу, нанесено поглинаючі покриття 5 та 6. Вхідний/вихідний перетворювач 2 та масив електродів 4 конструктивно формують радіомітку на ПАХ.

Узгоджений сигнал радіозапиту (рис. 37) поступає у вигляді набору сигналів з різною частотою, тривалість яких однакова, а порядок слідування визначається топологією вхідного/вихідного перетворювача ПАХ. При надходженні такого сигналу на ЗШП 2 відбувається його стиснення з коефіцієнтом стиснення n , де n – кількість частот кодування. Результируюча ПАХ на виході ЗШП має амплітуду в n разів більшу за амплітуду ПАХ, створеної окремою групою електродів.

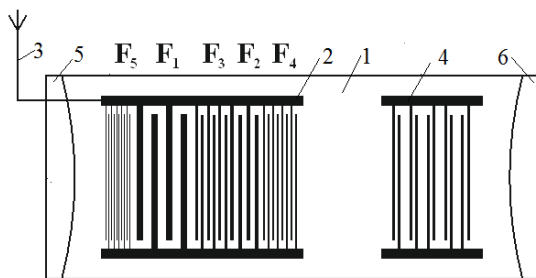


Рис. 36. Конструкція пасивної радіомітки на ПАХ

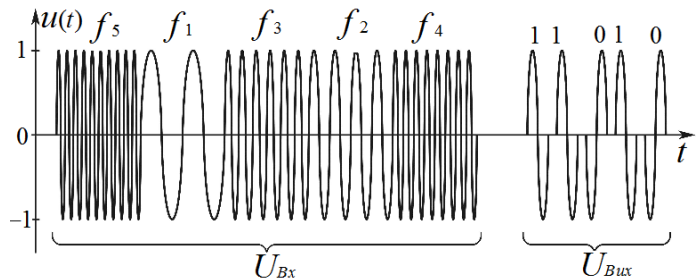


Рис.37. Сигнал радіозапиту та відгуку безпроводної пасивної радіомітки на ПАХ

У масиві електродів 4, який може бути і безконтактним, кодова послідовність формується за рахунок того, що впорядкованість електродів протилежної полярності (+ - + - + - + -) місцями змінюється (наприклад, + - + - - + - - +). Таким чином, можна довільно задавати фазу високочастотної несучої всередині сигналу радіовідгуку.

Зворотна хвиля, проходячи під структурою електродів 2, завдяки прямому п'єзоэффекту збуджує вихідну кодовану послідовність, з подальшим її випроміненням через антену 2. Приймач, що через радіоканал зв'язаний з радіоміткою на ПАХ, після надходження на нього сигналу радіовідгуку здійснює його обробку (підсилення, фільтрацію, кореляційний аналіз тощо).

Порядок чергування електродів та кількість розрядів у масиві електродів 4 можуть змінюватись для реалізації довільної кодової послідовності. Так, для

представленої радіомітки з n – розрядами (n – кількість секцій електродів вхідного/вихідного перетворювача 2) можливо реалізувати 2^n різноманітні коди, що дозволяє використовувати запропоновані пасивні радіомітки на ПАХ для ідентифікації великої кількості об'єктів.

Пасивний перетворювач мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ (рис. 38) містить п'єзоелектричний звукопровід 1, на поверхні якого розташований з'єднаний з антеною 2 вхідний/вихідний ЗШП ПАХ 3, дві відбивні решітки (відбивачі) 4 та 6. Усі ці елементи утворюють лінію затримки на відбивачах, час затримки якої залежить від значення вимірювальної величини. Елементи розташовані у корпусі 8, який герметично закритий кришкою 9 з мембраною 7, що розташована над зоною взаємодії 5 на відстані від поверхні звукопроводу, сумірній довжині ПАХ.

В якості сигналу радіозапиту запропоновано та теоретично обгрунтовано використання частотно-кодованого сигналу з тривалістю t_{pz} та кількістю дискретних частот n . Вхідний/вихідний перетворювач 3 збуджує у звукопроводі 1 ПАХ, виконуючи при цьому стиснення вхідного сигналу. Частина енергії ПАХ відбившись від першого відбивача 4, повертається на перетворювач 3 і за рахунок прямого п'єзоефекту перетворюється в електричний сигнал, що випромінюється в простір антеною 2, формуючи при цьому опорний сигнал радіовідгуку.

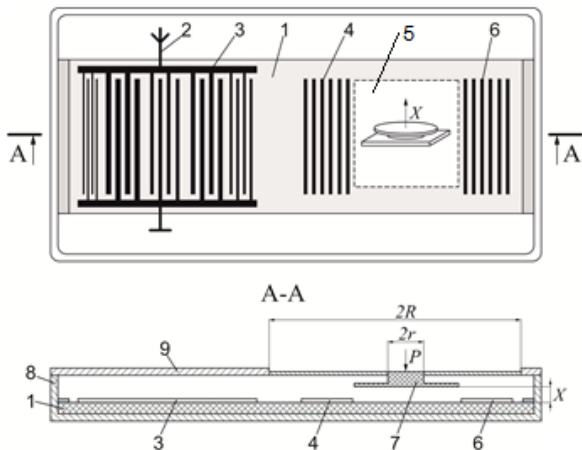


Рис. 38. Конструкція безпроводного перетворювача переміщення та тиску на ПАХ

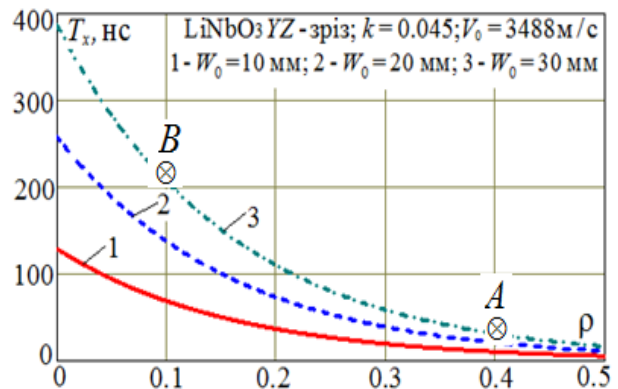


Рис. 39. Теоретичні залежності приросту часу затримки від нормованого переміщення мембрани

Частина енергії акустичного потоку ПАХ, що пройшла перший відбивач 4 і активну зону взаємодії 5, відбивається від відбивача 6 і знову проходить активну зону 5, поступає на перетворювач 3 і випромінюється антеною 2, формуючи вимірювальний сигнал відгуку.

Час затримки приходу вимірювального сигналу відносно опорного визначається відстанню між відбивачами 4 та 6, швидкістю поширення ПАХ у звукопроводі та умовами поширення ПАХ в зоні взаємодії 5. З урахуванням рівняння (18) приріст часу затримки при переміщенні мембрани в електричному полі ПАХ визначається співвідношенням:

$$T_x = W_0 k \exp(-2\pi\rho) / V_0. \quad (26)$$

На рис. 39 зображена залежність (26) для звукопроводу із ніобат літію YZ-зрізу від нормованого переміщення мембрани при різних ділянках збурення електричного

поля ПАХ. Наприклад, для ніобат літію YZ-зрізу ($k = 0,045$, $W = 15$ мм, $V_0 = 3488$ м/с, $\lambda_0 = 50$ мкм, $f_0 = 69,76$ МГц) при переміщенні мембрани в діапазоні $\rho = 0,4 \div 0,1$ приріст часу затримки змінюється в інтервалі $T_x \approx 31,5 \div 206,5$ нс, середній коефіцієнт перетворення мікропереміщень $S_x \approx \Delta T_x / \Delta x \approx 11,7$ нс/мкм. При роздільній здатності промислових вимірювачів часових інтервалів $\delta t \approx 200$ пс потенційна роздільна здатність перетворювача мікропереміщень складає: $\delta x = \delta t / S_x \approx 0,017$ мкм.

Для мембрани із сталі (при $\mu = 0,28$; $E = 2,2 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $r = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 10^{-3}$ м; $R = 20 \cdot 10^{-3}$ м) згідно формули (22) впливає, що її переміщення в інтервалі $\rho = 0,4 \div 0,1$ відбудеться при зміні тиску в інтервалі $P \approx 0 \div 1,315 \cdot 10^5$ Н/м² $\approx 0 \div 987$ мм.рт.ст. при середньому коефіцієнті перетворення $S_p \approx \Delta T / \Delta P \approx 1,33$ пс/Н/м² ≈ 177 пс/мм.рт.ст. та потенційній роздільній здатності $\delta P = \delta t / S_p \approx 1,13$ мм.рт.ст.

Змінюючи довжину зони взаємодії W та застосовуючи сильні п'єзоелектрики (ніобат літію, германат вісмуту, окис цинку, нітрид алюмінію та інші), можливо забезпечити необхідний коефіцієнт перетворення. Розглянутий перетворювач може бути застосований для дистанційного вимірювання мікропереміщень, прискорення, сили та тиску.

Пасивний перетворювач лінійних та кутових переміщень на основі керованої лінії затримки на ПАХ з безконтактним ПАХ-відбивачем 5, що переміщується в електричному полі біжучої на п'єзоелектричному звукопроводі ПАХ (рис. 40, поз.1 ÷ 4 і на рис.38 співпадають).

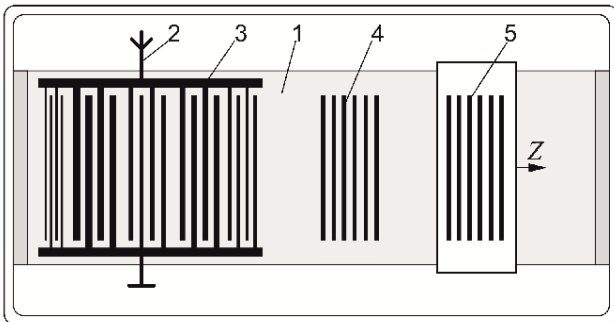


Рис. 40. Конструкція безпроводного перетворювача переміщень на ПАХ

лінійних переміщень $\delta Z = \delta t / S_z = 0,35$ мкм. Динамічний діапазон вимірювання лінійних переміщень практично не обмежений, а визначається розмірами п'єзоелектричного звукопроводу.

При переміщенні відбивної решітки над кільцевим п'єзоелектричним хвилеводом з радіусом R отримаємо співвідношення для приросту часу затримки радіовимірювальної безпроводної системи кутових переміщень: $T_\phi = 4\pi R\phi / 360 \cdot 3600 \cdot V$, де ϕ [кут. сек.] – кутове переміщення решітки над п'єзоелектричним хвилеводом. Коефіцієнт перетворення кутового переміщення: $S_\phi = 4\pi R\phi / 360 \cdot 3600 V$. При кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі на базі структури ZnO-SiO₂пл. ($V = 3350$ м/с) з радіусом $R = 20$ мм отримаємо коефіцієнт перетворення $S_\phi = 57,8$ пс/кут.сек. та потенційну роздільну здатність перетворювача кутових переміщень $\delta\phi = \delta t / S_\phi = 3,46$ кут.сек.

Приріст часу затримки при переміщенні відбивної решітки 5 визначається співвідношенням: $T_z = 2Z/V$, де Z – переміщення відбивної решітки; V – фазова швидкість ПАХ. Коефіцієнт перетворення $S_z = dT_z / dZ = 2/V$. При використанні звукопроводу із ніобат літію YZ-зрізу ($V = 3488$ м/с) отримаємо $S_z = 5,7 \cdot 10^{-4}$ мкс/мкм, а потенційну роздільну здатність перетворювача

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи теоретично обґрунтовано та експериментально реалізовано новий підклас високочутливих АЕП фізичних величин з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами на основі використання електричного поля ПАХ, які поширюються на п'єзоелектричних структурах:

1. Запропоновано, теоретично обґрунтовано та реалізовано високочутливий метод вимірювання лінійних та кутових переміщень на основі використання фазових набігань в п'єзоелектричних структурах електричного поля кількох ПАХ з різними частотами, які приймаються безконтактним електрично пов'язаним ПАХ-приймачем. При збудженні ПАХ на частотах, що не перевищують 75 МГц, метод дозволяє визначати координату об'єкта з коефіцієнтами перетворення не гірше 7,0 ел.град./мкм (0,5 ел.град./кут.сек) у діапазоні до 100 мм і вище (до 360 кут. град.). Метрологічні параметри АЕП, які забезпечуються запропонованим методом, сумірні параметрам індуктосинів, фотоелектричних перетворювачів та пристроїв на основі інтерферометрів та, на відміну від них, мають просту конструкцію та значно менші масогабаритні показники.

2. Запропоновано та теоретично обґрунтовано метод вимірювання кутової швидкості на основі використання ефекту Доплера при обертанні ПАХ-приймача в електричному полі ПАХ. При збудженні ПАХ на частоті 70 МГц в кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі з радіусом 10 мм метод забезпечує коефіцієнт перетворення 22 Гц/об./хв. в діапазоні до 13680 об./хв. і вище. На основі запропонованого методу може бути створений універсальний АЕП кутової швидкості з високим коефіцієнтом перетворення в широкому динамічному діапазоні та з метрологічними параметрами, які сумірні параметрам тахогенераторів, електромагнітних і фотоелектричних перетворювачів та, на відміну від них, мають просту конструкцію та менші масогабаритні показники.

3. Запропоновано, теоретично обґрунтовано та реалізовано метод вимірювання мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості ПАХ в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля хвилі, що поширюється в п'єзоелектричному звукопроводі (хвилеводі), який дозволяє створювати на основі універсального акустоелектронного модуля перетворювачі з коефіцієнтом перетворення до 10 кГц/мкм і вище у діапазоні переміщення чутливого елемента – мембрани (зонда) до десятків мікрометрів.

4. Розроблені та досліджені математичні моделі первинних перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень та тиску на основі використання електричного поля ПАХ дозволяють визначати їх конструктивні та електричні параметри у залежності від заданих метрологічних характеристик перетворювачів.

5. Модифікована математична модель плівкового п'єзоелектричного ПАХ-хвилеводу на основі структури оксид цинку-плавлений кварц дозволяє визначати конструктивні параметри хвилеводу, концентратора та зустрічно-штирових перетворювачів модуля на ПАХ для забезпечення одномодового режиму поширення ПАХ. Теоретичні дослідження та результати випробувань амплітудних та фазових характеристик ПАХ на установці лазерного зондування гомодинного типу підтверджують можливість використання плівкових п'єзоелектричних структур в АЕП фізичних величин.

7. Розроблені та експериментально досліджені макети акустоелектронних перетворювачів лінійних і кутових переміщень та їх складових блоків:

– 3-х частотний генераторний блок, який містить три генератори на основі ліній затримки на ПАХ із кварцу *ST*-зрізу з секційним ЗШП для збудження у звукопроводі (хвилеводі) ПАХ у вигляді суперпозиції 3-х хвиль; в результаті випробувань для робочих частот (69,52; 70,62 та 71,69 МГц) отримано перестроювання частоти близько 380 кГц при короткочасній нестабільності частоти не гірше $5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ та рівнях вихідного сигналу близько 1,0 В на кожній частоті;

– 3-х частотний блок підсилення та фільтрації вихідного сигналу безконтактного ПАХ-приймача, в якому розділення сигналів з різними частотами здійснюється ПАХ-фільтрами, синтез яких проведено з використанням фазового зважування електродів ЗШП за функцією Хеммінга; в результаті випробувань отримано для робочих частот (69,52; 70,62 та 71,69 МГц) смуги пропускання близько 450 кГц при рівні вихідних сигналів близько 100 мВ.

– перетворювачі лінійних та кутових переміщень на основі використання фазових набігань на поверхні лінійних (кільцевих) п'єзоелектричних структур електричного поля 3-х ПАХ, що поширюються одночасно і приймаються безконтактним ПАХ-приймачем; коефіцієнт перетворення лінійних переміщень із звукопроводом ніобат літію *YZ*-зрізу на точній шкалі при частоті 70,62 МГц склав 7,28 ел. град./мкм; коефіцієнти перетворення лінійних та кутових переміщень на базі плівкової п'єзоелектричної структури ZnO-SiO_2 пл. на точних шкалах склали відповідно 7,59 ел.град/мкм та 0,55 ел.град./кут.сек. 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 мм (11, 25 кут град).

8. Розроблено та експериментально досліджено макети АЕП мікропереміщень та тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості ПАХ в результаті збурення мембраною (зондом) електричного поля ПАХ, яка поширюється на п'єзоелектричній структурі; в результаті випробувань на частоті 45,2 МГц при переміщенні мембрани в діапазоні $0 \div 15$ мкм перпендикулярно поверхні звукопровода із ніобата літію *YZ*-зрізу отримано середній коефіцієнт перетворення мікропереміщень 9,3 кГц/мкм, при цьому середня чутливість перетворення тиску складала 42,6 Гц/мм.рт.ст.

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дубовенко А. В., Жовнир Н. Ф., Лопушенко В. К. Исследование поверхностных акустических волноводов и методов их возбуждения. *Вестн. Киев. политехн. ин-та. Сер.: Электроакустика и звукотехника*, 1992. № 15. С. 47–49.
2. Павловский М. А., Дубовенко А. В., Жовнир Н. Ф. Измерительные преобразователи линейных и угловых перемещений на основе волноводов поверхностных акустических волн / *Механика гироскопических систем*, 1992. № 11. С. 83–86.
3. Павловский М. А., Лопушенко В. К., Жовнір М. Ф., Черняк М. Г. Математична модель вимірювального перетворювача лінійних переміщень на поверхневих акустичних хвилях / *Механіка гіроскопічних систем*, 1997. № 14. С. 40–46.

4. Жовнир Н. Ф. Математическая модель преобразователя информации на поверхностных акустических волнах / *Электроника и связь*, 1997. № 2. Ч. 2. С. 297–301.
5. Жовнир Н. Ф., Дидковский А. А., Ковтун Р. И., Наушенко С. С. Математическая модель измерительного преобразователя угловых перемещений на ПАВ / *Электроника и связь*, 2001. № 11. С. 74–77.
6. Жовнир Н. Ф., Черняк Н. Г., Дидковский А. А., Ковтун Р. И., Наушенко С. С. Измерительные преобразователи физических величин на ПАВ / *Электроника и связь*, 2003. № 18. С. 22–27.
7. Жовнір М. Ф., Черняк М. Г., Дідківський А. А., Наушенко С. С., Дейнеко В. М. Фізико-технічні основи побудови вимірювального перетворювача мікропереміщень на поверхневих акустичних хвилях / *Електроніка та зв'язок*, 2004. № 23. С. 5–8.
8. Жовнір М. Ф., Дідківський А. А., Усатюк О. В. Математична модель перетворювача мікропереміщень на поверхневих акустичних хвилях / *Електроніка та зв'язок*, 2006. Тем. випуск, частина 1, С. 35–37.
9. Черняк М. Г., Жовнір М. Ф. Моделювання та дослідження автогенераторного вимірювального перетворювача мікропереміщень на поверхневих акустичних хвилях / *Інформаційні системи, механіка та керування*, 2008. № 1. С. 39–47.
10. Лепіх Я. І., Лопушенко В. К., Піддубний В. О., Жовнір М. Ф. Особливості створення хвилеводних структур для датчиків переміщень на ПАХ / *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2008. № 3. С. 24–27.
11. Жовнір М. Ф., Черняк М. Г., Черненко Д. В., Шеремет Л. М. Вимірювальні перетворювачі фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях / *Електроніка та зв'язок*, 2011. № 1. С. 153–157.
12. Черненко Д. В., Кузьменко О. М., Жовнір М. Ф. Вимірювальні перетворювачі тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль / *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2013. № 1/2013(78). С. 62–66. (Україніка наукова, ВІНІТІ, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus).
13. Кузьменко О. М., Жовнір М. Ф. Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для дистанційного вимірювання температури / *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2013. № 3/2013 (80). С. 113–117. (Україніка наукова, ВІНІТІ, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus).
14. Жовнір М. Ф., Шостак О. В. Оцінка потенційних роздільної здатності і точності вимірювальних перетворювачів лінійних та кутових переміщень на базі використання фазових набігань поверхневих акустичних хвиль / *Електроніка та зв'язок*, 2015. Том. 20. № 3(86). С. 101–106. DOI: 10.20535/2312-1807.2015.20.3.53942 (Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).
15. Zhovnir M.F., Kuzmenko O. M., Pokutnyi S. I. Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement / *Journal of Applied Chemistry*, 2015. № 3(1). P. 7–13.
16. Жовнір М. Ф., Олійник О. О. Розробка пристроїв на ПАХ для вимірювання лінійних та кутових переміщень / *Вісник НТУ «ХП»*. Сер.: *Механіко-технологічні системи та комплекси*, 2015. № 52(1161). С. 60–65. (WorldCat, ResearchBib, Scientific Indexing Services, General Impact Factor, Open Academic Journals Index, Directory Indexing of International Research Journals).
17. Жовнір М. Ф., Олійник О. О., Писаренко Л. Д. Математичні моделі сенсорів мікропереміщень та тиску на основі збурення електричного поля поверхневих

акустичних хвиль / *Журнал нано– та електронної фізики*, 2016. Том. 8. № 1. С. 01024-1– 01024-5. DOI: 10.21272/jnep.8(1).01024. (Scopus).

18. Жовнір М. Ф., Бітов М. В., Писаренко Л. Д. Вимірювальні перетворювачі мікропереміщень та тиску на поверхневих акустичних хвилях / *Електроніка та зв'язок*, 2016. Том 21. № 4(93). С. 49–57. DOI: 10.20535/2312-1807.2016.21.4.81907. (Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).

19. Олійник О. О., Жовнір М. Ф., Циганок Б. А. Розрахунок механічних напружень на основі вимірювань двопротонезаломлення у звукопроводах ПАХ-пристроїв / *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер.: *Механіко-технологічні системи та комплекси*, 2016. № 7(1179). С. 66–71. (WorldCat, ResearchBib, Scientific Indexing Services, General Impact Factor, Open Academic Journals Index, Directory Indexing of International Research Journals).

20. Жовнір М. Ф. П'єзоелектричні плівкові хвилеводи поверхневих акустичних хвиль / *Журнал нано- та електронної фізики*, 2016. Том. 8. № 4(1). С. 04007-1– 04007-7. DOI: 10.21272/jnep.8(4(1)).04007. (Scopus).

21. Жовнір М. Ф. Математична модель первинного перетворювача лінійних переміщень з рухомим приймачем поверхневих акустичних хвиль / *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер.: *Механіко-технологічні системи та комплекси*, 2016. № 7(1179). С. 48–57. (WorldCat, ResearchBib, Scientific Indexing Services, General Impact Factor, Open Academic Journals Index, Directory Indexing of International Research Journals).

22. Жовнір М. Ф. Математична модель первинного перетворювача кутових переміщень з кільцевим п'єзоелектричним хвилеводом поверхневих акустичних хвиль / *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер.: *Механіко-технологічні системи та комплекси*, 2016. № 49(1221). С. 42–51. (WorldCat, ResearchBib, Scientific Indexing Services, General Impact Factor, Open Academic Journals Index, Directory Indexing of International Research Journals).

23. Жовнір М. Ф. Перетворювач переміщень з використанням фазових набігань електричного поля поверхневих акустичних хвиль / *Електроніка та зв'язок*, 2017. Том 22. № 1(96). С. 58–68. DOI: 10.20535/2312-1807.2017.22.1.90513. (Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).

24. Бітов М. В., Жовнір М. Ф., Писаренко Л. Д., Плешка Т. Є. Акустoeлектронні перетворювачі з безконтактними чутливими елементами / *Електроніка та зв'язок*. 2017. Том. 22. № 3(98). С. 61–67. DOI: 10.20535/2312-1807.2017.22.3.104417. (Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).

25. Жовнір М. Ф. Акустoeлектронний перетворювач кутової швидкості / *Електроніка та зв'язок*, 2017. Том 22. № 4(99). С. 44–50. DOI:10.20535/2312-1807.2017.22.4.103976. (Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).

26. Жовнір М. Ф. Вимірювальний перетворювач кутових переміщень з використанням фазових набігань електричного поля поверхневих акустичних хвиль / *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, 2017. Том 22. № 5(100). С. 20–28. DOI: 10.20535/2523-4455.2017.22.5.99887. (Index Copernicus, Ulrich's Web, ResearchBib, Journals4Free, РИНЦ).

27. Пат. на изобретение 1833500 СССР. Способ измерения угловой скорости и устройство для его осуществления / Ю. А. Скрипник, А. С. Довгополый, Н. Ф. Жовнир, В. И. Скрипник, А. В. Дубовенко. № 5050152/10, заявл. 29.12.1991; опубл. 07.08.1993, бюл. № 29.

28. Пат. на винахід 3040 Україна. Акустoeлектронний спосіб визначення переміщення об'єкта / Ю. О. Скрипник, А. С. Довгополий, М. Ф. Жовнір, В. І. Скрипник. № 4897758/SU, заявл. 29.12.1990; опубл. 26.12.1994, бюл. № 5.

29. Пат. на корисну модель 10840 Україна. Спосіб вимірювання кутової швидкості та пристрій для його здійснення / Ю. О. Скрипник, А. С. Довгополий, М. Ф. Жовнір, В. І. Скрипник. № 93005409, заявл. 26.03.1993; опубл. 25.12.1996, бюл. № 4.

30. Пат. на корисну модель 71213 Україна. Пристрій на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску / М. Ф. Жовнір, М. Г. Черняк, А. А. Дідківський, С. С. Наушенко, Р. І. Ковтун, В. М. Дейнеко. № 20031210965, заявл. 03.12.2003; опубл. 15.11.2004, бюл. № 11.

31. Пат. на корисну модель 55497 Україна. Пристрій на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску / М. Ф. Жовнір, М. Г. Черняк, Д. В. Черненко, Л. М. Шеремет. № u201008841, заявл. 15.07.2010; опубл. 10.12.2010, бюл. 23.

32. Пат. на корисну модель 77113 Україна. Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску / Д. В. Черненко, М. Ф. Жовнір. № u201209622, заявл. 08.08.2012; опубл. 25.01.2013, бюл. № 2.

33. Пат. на корисну модель 77735 Україна. Вхідний/вихідний перетворювач для сенсорів на поверхневих акустичних хвилях / Д. В. Черненко, М. Ф. Жовнір. № u201209651, заявл. 09.08.2012; опубл. 25.02.2013, бюл. № 4.

34. Пат. на корисну модель 77898 Україна. Пасивна радіомітка на поверхневих акустичних хвилях / Д. В. Черненко, М. Ф. Жовнір. № u201211612, заявл. 08.10.2012; опубл. 25.02.2013, бюл. № 4.

35. Пат. на корисну модель 88694 Україна. Сенсор фізичної величини на поверхневих акустичних хвилях / М. Ф. Жовнір, О. М. Кузьменко, Л. Д. Писаренко, Д. В. Черненко. № u201312927, заявл. 07.11.2013; опубл. 25.03.2014, бюл. № 6.

36. Пат. на корисну модель 94022 Україна. Сенсор вологості на поверхневих акустичних хвилях / М. Ф. Жовнір, О. М. Кузьменко, Л. Д. Писаренко. № u201405095, заявл. 14.05.2014; опубл. 27.10.2014, бюл. № 20.

37. Пат. на корисну модель 115968 Україна. Датчик для вимірювання кутової швидкості об'єктів / М. Ф. Жовнір, Л. Д. Писаренко, А. В. Іващук, О. О. Олійник, М. В. Бітов, Т. Є. Плешка, Є. С. Законов. № u201606028, заявл. 03.06.2016; опубл. 10.05.2017, бюл. № 9.

38. Жовнір Н. Ф., Лопушенко В. К., Неверов С. В. Высокоточные преобразователи перемещений на поверхностных акустических волнах / *Мат. XVII межотраслевой науч.- техн. конф. памяти М. М. Острякова*. Ленинград, 1991. С.87.

39. Жовнір Н. Ф., Кривоконь І. А., Лопушенко В. К., Черняк Н. Г. Пьезоэлектронные преобразователи перемещений / *Пьезоэлектрические приводы и датчики: сб. мат. межд. науч. – практ. конф.* Обнинск, Россия. 1993. С. 17.

40. Жовнір Н. Ф., Лопушенко В. К., Тарасов Г. П., Черняк Н. Г. Акустоэлектронные преобразователи физических величин / *Проблемы физической и биомедицинской электроники: сб. мат. межд. науч.- техн. конф.* Киев, 1995. С. 95–99.

41. Жовнір Н. Ф. Измерительный преобразователь перемещений на основе использования фазовых набегов ПАВ / *Проблемы физической и биомедицинской электроники: сб. мат. межд. науч.- техн. конф.* Киев, 1996. С. 279–283.

42. Збруцкий А. В., Черняк Н. Г., Лопушенко В. К., Жовнір М. Ф. Акустоэлектронные измерительные преобразователи механических величин: Физико-математические основы построения и техническая реализация / *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. СЕМСТ-3: зб. мат. 3-ої Міжнародної наук.-техн. конф.*

Одеса, 2008. С. 21.

43. Лопушенко В.К., Лепих Я.И., Жовнір Н. Ф., Поддубный В. А. Особенности создания волноводных структур для датчиков линейных и угловых перемещений на ПАВ / *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. СЕМСТ-3: зб. мат. 3-ої Міжнародної наук.-техн. конф.* Одеса, 2008. С. 113.

44. Zhovnir M., Chernyak M., Chernenko D., Sheremet L. Measuring transducers of physical quantities based on surface acoustic waves (SAW). *Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2011): Proceedings of the XXXI International Scientific Conference*. 2011. P. 172.

45. Черняк Н. Г., Жовнір Н. Ф., Черненко Д. В. Акустоелектронні вимірні преобразувачі механічних величин для інформаційно-вимірних систем / *Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки: зб. мат. VIII міжн. наук.-техн. конф.* Київ. 2011. С. 75–82.

46. Разін О. В., Жовнір М. Ф. Вимірювальні перетворювачі переміщень на базі ПАХ-хвильоводів. *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. VI наук.-практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ». 2012. С. 65–67.

47. Черненко Д. В., Жовнір М. Ф. Моделювання безпроводних сенсорів на поверхневих акустичних хвилях / *Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС'2012: зб. мат. 7-ої міжн. наук.-практ. конф.* Чернігів – Жукив, 2012. С. 200–203.

48. Chernenko D., Zhovnir M., Oliinyk O., Tsyganok B. Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures / *The 35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics” (ISSE 2012)*. Bad Aussee (Austria), 2012. P. 424–428. DOI: 10.1109/isse.2012.6273174.

49. Нещерет А. О., Жовнір М. Ф. Компенсація зовнішнього впливу в вимірювальних перетворювачах на поверхневих акустичних хвилях / *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. VIII наук.-практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ». 2014. С. 62–64.

50. Дербанов Є. П., Коротков М. І., Жовнір М. Ф. Акустоелектронний перетворювач лінійних та кутових переміщень. *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. IX наук.-практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ». 2015. С. 105–109.

51. Зайцев М. С., Бурима О. О. Жовнір М. Ф. Радіосенсори на поверхневих акустичних хвилях / *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. IX наук.-практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ». 2015. С. 112–114.

52. Гайдамака В. В., Жовнір М. Ф. Безпроводний датчик магнітного поля / *Перспективні напрямки сучасної електроніки: мат. IX наук.-практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ», 2015. С. 97–100.

53. Плешка Т. Є., Жовнір М. Ф. П'єзоелектричні хвильоводи для вимірювальних перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях / *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. X наук. – практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ». 2016. С. 94–100.

54. Zhovnir M. F., Pleshka T. E. Mathematical Model of Piezoelectric Film Waveguide Surface Acoustic Wave / *Electronics and Applied Physics: Proceedings of the XII International Conference*. Kyiv, 2016. P. 83–84.

55. Законов Є. С., Жовнір М. Ф. Високочастотний генератор на поверхневих акустичних хвилях / *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. X наук.-практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ». 2016. С. 59–64.

56. Скочок Д. В., Жовнір М. Ф. Перетворювач акустичних сигналів на базі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль. *Перспективні напрямки*

сучасної електроніки: зб. мат. X наук.–практ. конф. Київ. НТУУ «КПІ». 2016. С. 113–116.

57. Герасименко Д. О., Жовнір М. Ф. Схемотехнічні принципи побудови сенсорів фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях / *Актуальные научные исследования в современном мире: сб. науч. трудов XVI межд. науч. конф.* Переяслав – Хмельницький, 2016. № 8(16). Ч 1. С.46–53.

58. Zakonov Y. S., Zhovnir M. F., Pysarenko L. D. Surface Acoustic Wave Sensors for Humidity Distance Measuring / *Proceedings of the XII International Conference «Electronics and Applied Physics»*. Kyiv, 2016. P. 249–250.

59. Бітов М. В., Жовнір М. Ф. Система ідентифікації з безпроводними пасивними радіомітками на поверхневих акустичних хвилях. *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. X наук.–практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ». 2016. С. 50–57.

60. Bitov M. V., Zhovnir M. F. Passive RFID-Mark at Surface Acoustic Waves / *Electronics and Applied Physics: Proceedings of the XII International Conference*. Kyiv. 2016. P. 63–64.

61. Плешка Т.Є., Жовнір М. Ф. Резонатор на біжучих поверхневих акустичних хвилях / *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. XI наук.–практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. С. 101–106.

62. Zhovnir M. F., Pysarenko L. D., Pleshka T. E. Comb filter based on SAW-resonator of running wave / *Electronics and Applied Physics: Proceedings of the XII International Conference*. Kyiv, 2017. P.213–214

63. Бітов М. В., Жовнір М. Ф. Підсилювально-вибірковий блок для вимірювальних перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях / *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. XI наук.–практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. С. 55–61.

64. Герасименко Д. О., Жовнір М. Ф., Писаренко Л. Д. Сенсор мікропереміщень та тиску на поверхневих акустичних хвилях. *Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. XI наук.–практ. конф.* Київ. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. С. 45–50.

65. Zhovnir M. F. , Pysarenko L. D., Bitov M. V. Acoustoelectronic transducers of displacements with contactless sensitive elements / *Electronics and Applied Physics: Proceedings of the XIII International Conference*. Kyiv, 2017. P.205–206.

АНОТАЦІЯ

Жовнір М. Ф. Акустoeлектронні перетворювачі з безконтактними електрично пов’язаними чутливими елементами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01– твердотільна електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2018.

Дисертація присвячена створенню нового підкласу високочутливих перетворювачів фізичних величин на основі використання електричного поля поверхневих акустичних хвиль (ПАХ), що поширюються на п’єзоелектричних структурах, для стаціонарних та безпроводних радіовимірювальних систем.

Теоретично обґрунтовано та реалізовано метод вимірювання лінійних та кутових переміщень з використанням фазових набігань електричного поля кількох ПАХ з різними частотами з формуванням точної, проміжної та грубої шкал перетворювача з безконтактним ПАХ-приймачем. При збудженні ПАХ на частотах, що не

перевищують 75 МГц, метод забезпечує визначення координати об'єкта з коефіцієнтами перетворення не гірше 7,0 ел.град./мкм (0,5 ел.град./кут.сек) у діапазоні до 100 мм і вище (до 360 кут. град.).

Теоретично обґрунтовано метод вимірювання кутової швидкості з використанням ефекту Доплера при обертанні ПАХ-приймача в електричному полі ПАХ. При поширенні ПАХ на частоті 70 МГц в кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі з радіусом 10 мм метод забезпечує коефіцієнт перетворення 22 Гц/об./хв. в діапазоні до 13680 об./хв.

Теоретично обґрунтовано та реалізовано метод вимірювання мікропереміщень та тиску з використанням дисперсії фазової швидкості ПАХ в результаті збурення мембраною електричного поля хвилі, який дозволяє створювати на основі універсального акустоелектронного модуля перетворювачі з коефіцієнтом перетворення до 10 кГц/мкм і вище в діапазоні переміщення чутливого елемента – мембрани до десятків мікрометрів.

Розроблені математичні моделі перетворювачів лінійних, кутових переміщень та швидкості, мікропереміщень та тиску, плівкового п'єзоелектричного ПАХ-хвилеводу дозволяють розробляти вимоги до конструктивних та електричних параметрів в залежності від заданих метрологічних характеристик перетворювачів.

Ключові слова: акустоелектронний перетворювач, поверхнева акустична хвиля, п'єзоелектричний звукопровід (хвилевід), лінійні переміщення, кутові переміщення, кутова швидкість, мікропереміщення, тиск.

А Н Н О Т А Ц И Я

Жовнир Н. Ф. Акустоэлектронные преобразователи с бесконтактными электрически связанными чувствительными элементами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01–твердотельная электроника. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2018.

Диссертация посвящена созданию нового подкласса высокочувствительных преобразователей физических величин на основе использования электрического поля поверхностных акустических волн (ПАВ), распространяющихся на пьезоэлектрических структурах, для стационарных и беспроводных радиоизмерительных систем.

Теоретически обоснован и реализован метод измерения линейных и угловых перемещений с использованием фазовых набегов электрического поля нескольких ПАВ с разными частотами с формированием точной, промежуточной и грубой шкал преобразователя с бесконтактным ПАВ-приемником. При возбуждении ПАВ на частотах, не превышающих 75 МГц, метод обеспечивает определение координаты объекта с коэффициентами преобразования не хуже 7,0 эл.град./мкм (0,5 эл.град./угл. сек.) в диапазоне до 100 мм и выше (до 360 угл. град.).

Теоретически обоснован метод измерения угловой скорости с использованием эффекта Доплера при вращении ПАВ-приемника в электрическом поле ПАВ. При распространении ПАВ на частоте 70 МГц в кольцевом пьезоэлектрическом волноводе с радиусом 10 мм метод обеспечивает коэффициент преобразования 22 Гц/об./мин. в диспазоне до 13680 об./мин.

Теоретически обоснован и реализован метод измерения микроперемещения и давления с использованием дисперсии фазовой скорости ПАВ при возмущении

мембраной электрического поля ПАВ, который позволяет создавать на основе универсального акустоэлектронного модуля преобразователи с коэффициентом преобразования до 10 кГц/мкм и выше в диапазоне перемещения чувствительного элемента-мембраны до десятков микрометров.

Разработанные математические модели преобразователей линейных, угловых перемещений и скорости, микроперемещений и давления, пленочного пьезоэлектрического ПАВ-волновода позволяют разрабатывать требования к конструктивным и электрическим параметрам в зависимости от метрологических характеристик преобразователей.

Ключевые слова: акустоэлектронный преобразователь, поверхностная акустическая волна; пьезоэлектрический звукопровод (волновод); линейные перемещения, угловые перемещения, угловая скорость, микроперемещения, давление.

S U M M A R Y

Zhovnir M.F. Acousto-electronic transducers with contactless electrically linked sensing elements. - The manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences, specialty **05.27.01 - solid state electronics**. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2018.

In the qualification scientific work the comparative analysis of physical basement and scheme-technical principles of construction of physical quantities converters are given.

It has been shown that the technical parameters of traditional measuring transducers (resistive, piezoelectric, capacitive, galvanomagnetic, electromagnetic, photovoltaic (optoelectronic), acousto-optical and others) practically have reached their limitations and their further improvement is possible by creating primary transformers applying new physical phenomena.

It has been shown that Acoustic/Electronic transducers (AET) on the basis of Surface Acoustic Waves devices (SAW) have several advantages: low wavelengths at relatively low frequencies, the possibility of distributed signal reception in the microelectronic performance of the converter, the presence of effective methods of signals excitation and reception in acousto-electronic devices, the possibility of using modern micro-, nanoelectronic technologies to realize SAW converters in wireless measurement systems.

During the past 20 years, scientific developments and implementation of active and passive AET of physical quantities with the use of SAW-based devices have been carried out on the basis of the change: phase velocity of SAW and acoustic length of the delay line (resonator) as a result of deformation of the beam or membrane type acoustic line; phase velocity of SAW and acoustic length of the delay line (resonator) under the influence of the environment on the surface of the acoustic line (molecular weight and gas concentration, temperature, humidity, electromagnetic radiation, etc.); reflection coefficient of SAW from reflecting lattices or interdigital transducers (IT), which are connected with external sensitive elements, which are under the influence of temperature, humidity, electromagnetic radiation, etc.);

At the same time, the essential attention was not paid to the theoretical substantiation and practical implementation of AET with contactless electrically coupled sensitive elements. As a result of complex studies of acousto-electronic transducers of physical quantities it were obtained and summarized next scientific results:

– it is proposed, theoretically grounded and implemented a method for measuring of linear (angular) displacements in the range of up to 100 mm and above (up to 360 angles degree) on the basis of the use of phase raids on the surface of linear (ring) piezoelectric structures of the electric field of several SAW that are received by contactless electrically linked SAW transducer. It is shown that during excitation in the acoustic line (waveguide) of SAW at 3 frequencies (69.52; 70.62 and 71.69 MHz) precise, intermediate and coarse measuring scales are formed that provide unambiguous determination of the coordinate of the SAW receiver with transform coefficients on an accurate scale more than 7.0 el.grad./ μm (0.5 el.grad./angle.s);

– it is proposed and theoretically approved the angular velocity measuring method based on the use of the Doppler effect in the rotation of the SAW receiver in the electric field of SAW, which is propagating in a piezoelectric waveguide. It is shown that under condition on SAW exciting at 70 MHz in a ring waveguide with a radius of 10 mm, the method provides determination of the speed of the SAW receiver with a conversion factor of 22 Hz/rev./min. in the range of up to 13680 rev./min.

– it is proposed, theoretically validated and realized the method of micro-displacements and pressure measuring on the basis of the use of dispersion of phase velocity of SAW as a result of perturbation by the membrane (probe) of the SAW electric field, which extends into piezoelectric structures. It is shown that when moving the membrane in the electric field of SAW, which extends over the surface of the lithium niobate of the YZ-slice, the coefficients of micro-displacement and pressure transformation of 10 kHz/ μm (50 Hz/mmHg) in the range up to 15...30 microns (3000 ... 5000 mmHg) are obtained. Such transducers can be created on the basis of a universal acousto-electronic module, and the design of a sensitive element - a membrane (probe) is determined by a given dynamic range of physical quantity;

– it is created and studied the mathematical models of primary transducers of linear, angular displacement and velocity using the electric field of SAW which allow to determine the design factors of the transducers on the basis of linear and ring piezoelectric acoustic lines (waveguides), contactless distributed SAW receivers and electrical parameters of master oscillator depending on the given metrological characteristics of the transducers.

– it is created and studied the mathematical models of the primary transducers of micro-displacement and pressure based on of the usage of dispersion phase velocity of SAW as a result of perturbation by membrane (probe) of the SAW electric field that connect the constructive and electric parameters and allow to determine of parameters in dependence on metrological characteristics of transducers.

– it is created and studied the modified mathematical models of film piezoelectric SAW waveguide using the approximation of the measurement results of SAW phase velocity in the unlimited film structure of zinc oxide – fused silica which allows to determine the design factors of the waveguide, concentrator and the interdigital converters of the acousto-electric module on the SAW for providing single-mode regime of running SAW. The results of experimental studies of film waveguide structures on the base of zinc oxide – fused silica on the equipment of laser probing of homodyne type which confirms the possibility of film piezoelectric structures using in acousto-electronic transducers are given.

It is proposed and substantiated the scheme and technical principles of constructing and designing of passive acousto-electric transducers for wireless radio-measuring systems:

Key words: acoustic-electronic transducer, surface acoustic wave, piezoelectric acoustic line (waveguide), linear displacement, angular displacement, angular velocity, micro displacement, pressure.