

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису

УДК 621.372:534

ЗАПУННИЙ  
Олександр Петрович

**ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ  
ДЛЯ ФІЛЬТРІВ З ПІДВИЩЕНОЮ ВИБІРКОВІСТЮ**

Спеціальність 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні  
системи і пристрої

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 1996



21.34  
4.394 1/2  
Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі конструювання і виробництва радіоапаратури в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут".

Науковий керівник:

кандидат технічних наук,  
професор Погребняк В.П.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
Семенко А.І.

кандидат технічних наук  
Коба С.І.

Провідна установа:

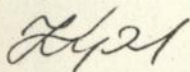
ВАТ НВП "Сатурн", м. Київ

Захист відбудеться " 9 " грудня 1996 р. о <sup>14-30</sup> 15 годині на засіданні спеціалізованої ради К 01.02.21 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 252056, Київ-56, пр.Перемоги 37, НТУУ "КПІ", корпус 17.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотечі НТУУ "КПІ".

Автореферат розісланий " 5 " листопада 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради,  
кандидат технічних наук

 Кудінов Є.В.



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зростання вимог до радіотехнічних систем за захищеністю від перешкод та достовірністю отриманої інформації при постійному зростанні кількості систем, що працюють одночасно, потребує підвищеної частотної вибіркості кожної з них. Типовою є вимога вибіркості у  $-(60 \div 65)$  дБ, практичне досягнення якої є важливою задачею. Використання фільтрів, створених методами функціональної електроніки, дозволяє вирішити проблему при одночасному поліпшенні конструкторсько-технологічних та експлуатаційних характеристик систем. Висока вибіркості та прямокутність амплітудно-частотної характеристики при заданій формі фазочастотної характеристики, висока відтворюваність та стабільність параметрів при допустимому послабленні сигналів в смузі прозорості, що можуть бути досягнуті у ПАХ-фільтрах, зумовлюють їх широке застосування у радіотехнічних системах різного призначення.

Головною проблемою при розробці ПАХ-фільтрів з підвищеною вибіркості є подолання розбіжностей між розрахунковими ЧХ та тими, що досягаються при практичній реалізації фільтру. Причиною розбіжностей є недостатня точність відтворення розрахункового ІВ (особливо ділянок з малою відносною амплітудою), яка виникає внаслідок впливу другорядних ефектів, що звичайно не враховуються при синтезі топології перетворювачів. Відомі методи проектування фільтрів з урахуванням дифракції ПАХ чи інших другорядних ефектів значно ускладнюють математичну модель перетворювача ПАХ, що обмежує їх поширеність та практичне значення.

Інший відомий шлях досягнення високої вибіркості ПАХ-фільтрів полягає у розробці таких перетворювачів та методів синтезу їх топології, які мають підвищену точність відтворення розрахункових ІВ та ЧХ. Мінімальний вплив дифракції та інших другорядних ефектів досягається при формуванні ІВ (зважуванні) перетворювача ПАХ без зміни довжини його електродів. Це дозволяє створювати ПАХ-фільтри з підвищеною вибіркості, користуючись лише моделлю  $\delta$ -джерел та встановленими співвідношеннями між топологією перетворювача і амплітудою вибірки ІВ.

Такі співвідношення та можливі варіанти реалізації добре відомі для методів формування ІВ\* перетворювачів ПАХ зовнішнім ємнісним подільником, варіацією коефіцієнту металізації, селективним видаленням електродів та зміною полярності їх підключення. Значно гірше досліджені метод формування ІВ перетворювача резистивним подільником та фазовий метод. Потребують подальшого розвитку методи підвищення вибіркості аподизованих перетворювачів ПАХ та методи зменшення впливу об'ємних і

відбитих хвиль на ЧХ ПАХ-фільтрів шляхом їх просторової фільтрації, що і зумовлює актуальність обраної теми.

Основні методи досліджень. Дослідження проводились з використанням відомих методів аналізу та синтезу фільтрів на ПАХ, окремих положень теорії розповсюдження пружних хвиль в анізотропних середовищах, числових методів розв'язання рівнянь та інтегрування, обчислювальної техніки. Експериментальні дослідження виконані шляхом вимірювання амплітудних та фазових профілів ПАХ на стенді оптичного зондування поверхневих акустичних хвиль, вимірюванням ЧХ та ІВ перетворювачів і ПАХ-фільтрів.

Наукова новизна роботи визначається такими результатами:

1. Вперше запропоновано метод синтезу топології аподизованого перетворювача ПАХ, що здійснюється наданням міжелектродному проміжку гладкої форми, яка відповідає його ІВ. Розроблено математичну модель перетворювача і показано, що метод забезпечує зменшений вплив другорядних ефектів та підвищену відтворюваність ЧХ перетворювача.

2. Поширено фазовий метод формування ІВ на випадок довільного числа об'єднаних у групи джерел ПАХ змінної полярності. Розроблено варіант фазового методу, що здійснюється варіацією відстані (при її постійності в межах групи) між сусідніми джерелами ПАХ та вперше запропоновано перетворювач ПАХ, що реалізує фазовий метод зміною ширини електродів при малій величині міжелектродного проміжку. Оцінено вплив похибки розташування джерел ПАХ та частотної залежності вибірок ІВ на ЧХ перетворювача.

3. Розроблено варіант формування ІВ перетворювача ПАХ резистивним подільником напруги, який здійснюється зміною довжини з'єднаних послідовно ділянок електродів, що дозволяє формувати ІВ у відповідності з гладкою функцією з одним екстремумом. Досліджено вплив емнісної складової провідності електродів на точність реалізації вибірок ІВ та на ЧХ перетворювача.

4. Теоретично та експериментально досліджено додаткове послаблення сигналів, відбиті та регенеровані хвилі у перетворювачах ПАХ, ІВ яких формується послідовним резистивним або емнісним подільниками та розробленим варіантом фазового методу; визначено обмеження на використання цих методів формування ІВ.

5. Вперше запропоновано та досліджено метод зменшення рівня сигналів об'ємних та відбитих поверхневих хвиль у ПАХ-фільтрах шляхом фокусування ПАХ та просторової фільтрації хвиль у фокальній площині.

Обґрунтованість та достовірність результатів визначається коректністю постановки задачі, відповідністю одержаних результатів фізичним уявленням щодо перетворювачів ПАХ та їх порівнянням з відомими, що отримані іншими авторами, а також з експериментом.

Практична цінність роботи визначається:

– розробленими варіантами формування ІВ, вперше запропонованими перетворювачами ПАХ та програмною реалізацією методів синтезу їх топології і аналізу ЧХ у САПР фільтрів на ПАХ;

– методикою корекції топології перетворювачів ПАХ за результатами вимірювання ЧХ та її апаратно-програмною реалізацією;

– методиками вимірювання швидкості ПАХ, коефіцієнта електро-механічного зв'язку звукопроводів та параметрів полів ПАХ методом оптичного зондування та створеним стендом для проведення таких вимірювань.

Реалізація результатів роботи. Отримані наукові результати використовуються у промисловості та науково-дослідних організаціях:

1. На основі вперше запропонованого перетворювача ПАХ, міжелектродний проміжок якого має гладку форму, його математичної моделі та методики корекції топології створено фільтри проміжної частоти для телевізійних приймачів різних стандартів. Серійне виробництво фільтрів за ліцензією освоєно на заводі "Імпульс" (м. Черкаси).

2. Варіанти методів формування ІВ перетворювачів ПАХ послідовним резистивним подільником та зміною взаємного розташування джерел ПАХ, програми розрахунку перетворювачів та фотошаблонів перетворювачів з резистивним та фазовим методом формування ІВ використовуються на підприємствах п/с В-8941, ОКБ "Резонанс" (м. Черкаси), ВНДІРА (м. Санкт-Петербург). Економічний ефект становить 75,4 тис.крб./рік у цінах 1991 р.

3. Методики вимірювання та стендова апаратура для оптичного дослідження полів ПАХ – використані на підприємстві п/с А-1178.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались на XIII Всесоюзній конференції з акустоелектроніки та квантової акустики, м. Чернівці, 1986 р.; на Республіканських науково-технічних конференціях "Акустоелектронні та акустооптичні пристрої обробки інформації на поверхневих акустичних хвилях", м. Черкаси, 1982, 1984, 1988, 1990 р.р.; на міжнародній конференції "Acousto Electronical Systems and Components", м. Санкт-Петербург, 1993 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 21 друковану працю, отримано 3 авторські свідоцтва та 2 патенти. Результати роботи відображено у звітах та матеріалах 13 науково-дослідних робіт.

Структура та об'єм дисертації Дисертація складається із вступу, чотирьох глав, висновку, списку літератури (118 найменувань) та додатку. Роботу викладено на 138 сторінках друкованого тексту, ілюстровано рисунками на 36 сторінках та таблицями на 6 сторінках.

### СТИСЛИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Проведений за літературними джерелами аналіз основних факторів, що погіршують точність відтворення ІВ, стримують підвищення вибіркості ПАХ-фільтрів, а також відомих методів зменшення їх впливу на ЧХ показав, що точність відтворення ІВ і вибіркості фільтрів залежить від методу формування ІВ перетворювачів ПАХ. Саме метод формування ІВ визначає додаткове послаблення сигналів у смузі прозорості та ступінь впливу дифракції ПАХ, її регенерації, об'ємних хвиль та інших другорядних ефектів на ЧХ перетворювачів і ПАХ-фільтрів.

Найбільш поширеними є аподизовані перетворювачі ПАХ, ІВ яких формується зміною взаємного перекриття протифазних електродів. Значний вплив дифракції ПАХ, неоднорідності розподілу зарядів та інших ефектів значно погіршує послаблення сигналів за смугою прозорості фільтрів, що створені з використанням аподизованих перетворювачів. Звичайно вибіркості таких фільтрів, створених без урахування дифракції, не перевищує  $-(40+45)$  дБ при фазових похибках в смузі прозорості у  $(10+15)$  градусів. Зменшити похибку відтворення ІВ та ЧХ фільтру можна шляхом компенсації впливу другорядних ефектів. Таку компенсацію проводять як за результатами аналізу ЧХ з урахуванням впливу найбільш значимих другорядних ефектів (наприклад дифракції), так і за результатами вимірювання ЧХ фільтру. Цей шлях робить практично неможливим безпосередній синтез топології перетворювачів, потребує високих технологій при реалізації і доцільний при серійному виробництві фільтрів.

Найменшого впливу дифракції та деяких інших другорядних ефектів зазнають перетворювачі ПАХ, ІВ яких формується без зміни довжини електродів. Відомі методи такого формування ІВ та варіанти їх одноканальної реалізації мають недоліки: обмеження на діапазон вибірок ІВ (варіація коефіцієнту металізації, послідовний резистивний подільник, фазовий метод); квантованість вибірок (селективне видалення електродів та зміна їх полярності); потребують додаткової площі (ємнісний подільник). Зроблено висновок про доцільність подальшого дослідження перетворювачів ПАХ та методів синтезу їх топології, що мають підвищену точність відтворення розрахункових характеристик, визначено методи формування ІВ (фазовий, послідовним резистивним подільником) та перетворювачі ПАХ (з гладким

міжелектродним проміжком, з похиленими електродами, фокусує), що потребують такого дослідження, сформульовано завдання дисертаційної роботи.

Однією з причин, що погіршують вибірковість ПАХ-фільтрів, є дискретизація ІВ електродами зустрічно-штирєвих перетворювачів. Похибка реалізації ЧХ, яка виникає внаслідок дискретності ІВ перетворювача, при інтегруванні за формулою трапецій виявляється пропорційною  $1/M^2$ , де  $M$  – число точок дискретизації ІВ на відстані однієї довжини ПАХ. Щоб зменшити цю похибку, слід збільшити кількість вибірок ІВ, що беруться до уваги при синтезі топології перетворювача, або взагалі відмовитись від дискретизації ІВ. Вперше запропоновано перетворювач ПАХ, що має гладкий ІВ. Різноплярні електроди перетворювача виконуються таким чином, що міжелектродний проміжок має малу і постійну ширину, а його форма відповідає розрахунковому ІВ.

Показано, що ІВ перетворювача  $h(t)$  дійсно відповідає розрахунковому і в прямокутній системі координат  $XOY$ , вісь  $OX$  якої спрямована вздовж розповсюдження ПАХ, пропорційний  $Y(Vt)$ , де  $Y(Vt)$  – функція, що описує форму міжелектродного проміжку,  $V$  – швидкість ПАХ,  $t$  – час. Математичною моделлю ЧХ перетворювача, на відміну від відомого, стає перетворення Фур'є в інтегральній формі, а збільшення числа вибірок ІВ, що враховуються при синтезі його топології на відстані однієї довжини ПАХ з 4 до 40 (може бути реалізовано під час синтезу запропонованого перетворювача при кусково-лінійній апроксимації ІВ), теоретично зменшує більш ніж на порядок похибку відтворення розрахункової ЧХ. Рівняння розподілу нормованої амплітуди ПАХ уздовж апертури такого перетворювача без аподизації має вигляд  $A(y)=[1-(2y/W)^2]^{1/2}$ ,  $|y| \leq W/2$ , де  $W$  – апертура перетворювача. Такий розподіл амплітуди ПАХ зменшує вплив дифракції, а гладка форма країв електродів зменшує вплив неоднорідності розподілу зарядів на ЧХ перетворювача. Підвищена точність реалізації ЧХ в смузі прозорості, наближений до розрахункового рівень бокових пелюсток при відсутності відгуків на гармоніках та підвищена технологічність характерні для фільтрів, що створені на основі такого перетворювача.

Розроблено варіант формування ІВ перетворювачів ПАХ послідовним резистивним подільником. Елементами подільника виступають з'єднані послідовно ділянки розщеплених електродів змінної довжини, що, на відміну від відомого, дозволяє зважувати перетворювачі ПАХ без зміни довжини електродів не тільки трикутною функцією (яка забезпечує послаблення сигналів за смугою прозорості лише на -26 дБ), а й іншими монотонними гладкими функціями з одним екстремумом. Методом еквівалентної схеми

отримано рекурентні співвідношення для розрахунку елементів послідовного резистивного подільника при відомих значеннях вибірок ІВ. У припущенні про малість впливу провідності однієї пари електродів вирази спрощуються і мають вигляд  $L_i = bR(|a_{i-1} - a_i|)/\rho$ , де  $L_i$ ,  $b$  – довжина та ширина  $i$ -го елемента подільника,  $R$  – загальний опір подільника,  $\rho$  – питомий опір металевієї плівки, з якої виготовляються елементи подільника,  $a_{i-1}$ ,  $a_i$  – вибірки ІВ, що реалізуються  $i-1$  та  $i$ -м вузлами подільника, до яких підключено електроди перетворювача.

Похибка реалізації таким подільником вибірок ІВ, що були використані при синтезі топології за спрощеними виразами, зростає при зростанні добутку загального опору подільника на ємнісну складову провідності перетворювача. Розрахунки ЧХ, виконані з урахуванням похибки реалізації вибірок ІВ, показують, що рівень вибірковості перетворювача не менше -40 дБ досягається при виборі опору подільника меншим, ніж подвоєна ємнісна складова імпедансу перетворювача на частоті акустичного синхронізму (максимальна похибка реалізації вибірок ІВ у даному разі менше 1% за модулем та менше 30° за фазою).

Проаналізовано вираз для ЧХ трансверсального фільтру у випадку об'єднання його елементів у групи з довільним числом. При рівномірному розташуванні груп та їх симетричності синтез фільтру може здійснюватися відомими методами, заснованими на варіації амплітуд вибірок при рівномірній дискретизації ІВ, а потрібна амплітуда вибірки ІВ може формуватися фазовим методом. Отримано вирази, що є поширенням фазового методу на випадок довільного числа елементів, об'єднаних у групу. В рамках моделі  $\delta$ -джерел розроблено варіант фазового методу формування ІВ перетворювачів ПАХ, що здійснюється варіацією відстані (при її постійності в межах групи) між сусідніми джерелами ПАХ змінної полярності. Співвідношення для розрахунку відстані  $\Delta x_i$  між  $\delta$ -джерелами в  $i$ -й групі, що необхідна для реалізації вибірки  $a_i$  нормованого ІВ перетворювача, в залежності від кількості  $\delta$ -джерел у групі та хвильового числа  $K=2\pi/\lambda$  (де  $\lambda$  – довжина ПАХ), представлені в таблиці. Слід зазначити, що у випадку об'єднання у групу двох або трьох джерел наведені вирази подібні виразам, що отримані іншими авторами для розглянутих ними варіантів реалізації фазового методу, а при об'єднанні у групу більше трьох  $\delta$ -джерел можливе не тільки рівномірне їх розташування в акустичних каналах.

Вперше запропоновано перетворювач ПАХ, що реалізує фазовий метод зміною ширини електродів при малій величині міжелектродного проміжку. На відміну від відомого, це дозволяє формувати фазовим методом вибірки ІВ від 0 до 1 при розташуванні джерел ПАХ в одному акустичному каналі та

застосовувати фазовий метод при синтезі топології перетворювачів з похиленими електродами та фокусуєчих. Якщо у відповідність  $\delta$ -джерелам поставити середини міжелектродних проміжків, то синтез топології перетворювача можна здійснювати за наведеними у таблиці виразами. Показано, що у даному випадку мінімальний розмір елементів топології становить  $\lambda/12$  (три джерела у групі) та не менше  $\lambda/8$  (більше трьох джерел у групі), реалізація яких можлива на тій самій технологічній базі, що звичайно використовується при виробництві ПАХ-фільтрів. Зазначимо, що зміною коефіцієнту металізації або ж об'єднанням у групу тільки двох джерел ПАХ при таких розмірах елементів топології можна змінити величину вибірок ІВ лише від 0,5 до 1, а рівень бокових пелюсток ЧХ перетворювача ПАХ, ІВ якого є узагальненою функцією Хеммінга з такими обмеженнями, становить лише  $\approx -22$  дБ.

Таблиця

Число джерел ПАХ	Нормована амплітуда ПАХ (амплітуда вибірки нормованого ІВ)	Відстань між джерелами у групі
2	$ a_i  = \sin(0,5K\Delta x_i)$	$\Delta x_i = (2/K)\arcsin( a_i )$
3	$ a_i  = [1 - 2\cos(K\Delta x_i)]/3$	$\Delta x_i = (1/K)\arccos[(1 - 3 a_i )/2]$
4	$ a_i  = 0,5[\sin(0,5K\Delta x_i) - \sin(1,5K\Delta x_i)]$	Рішення знаходяться числовими методами
m	$a_i = \frac{(-1)^{m_i}}{m} \sum_{l=1}^m (-1)^l \exp[-jK\Delta x_i(1 - \frac{m+1}{2})]$	

Залежність величини вибірки ІВ, реалізованої фазовим методом, від частки, де ділення є відстань між джерелами, а дільником – довжина ПАХ, зумовлює її залежність від частоти та похибки виготовлення фотошаблону. Врахувати ці похибки при аналізі ЧХ перетворювача можна за тими ж співвідношеннями, що використані при синтезі топології. З огляду на зростаючу крутизну цієї залежності при зростанні числа джерел та небажані частотні відгуки, рекомендується об'єднувати у групу не більше ніж три – чотири джерела змінної полярності при мінімальній можливій відстані між джерелами у групі та між окремими групами. Розрахунки ЧХ, виконані з урахуванням частотної залежності реалізованих даним методом вибірок ІВ та дискретності позиціонування для зважених за узагальненою функцією

Хеммінга перетворювачів з прямими електродами, показують, що при відносній похибці розташування джерел менше 5% можна створювати перетворювачі ПАХ з рівнем вибіркості не менше ніж -30 дБ при їх довжині більше (35±40)λ.

Розроблена ітераційна методика формування топології перетворювача ПАХ з похиленими електродами за заданою характеристикою групового часу запізнення зміною форми електродів.

Рекомендовано вибирати апертуру  $W$  перетворювачів з похиленими електродами в залежності від смуги прозорості та прямокутності ЧХ за співвідношенням  $W \geq \Delta\lambda(N^3|1 + \gamma|)^{1/2}$ , де  $\Delta\lambda$  – різниця між максимальним та мінімальним періодами перетворювача,  $N$  – кількість періодів його ІВ,  $\gamma$  – коефіцієнт анізотропії звукопроводу. Показано, що при виконанні співвідношення похибка реалізації вибірок ІВ менше 20% за модулем та 90° за фазою досягається навіть для фільтрів з відносною смугою прозорості близько 1% при коефіцієнті прямокутності ЧХ менше 2.

На основі відомих методів та співвідношень для визначення параметрів однорідних зважених перетворювачів проведено аналіз додаткового послаблення сигналів, регенованих та відбитих хвиль, що властиві розробленим перетворювачам та методам формування ІВ, а також перетворювачу, ІВ якого формується ємнісним подільником. Показано, що додаткове послаблення сигналів при формуванні ІВ розробленим варіантом фазового методу та ємнісним подільником виникає тільки при відносній смузі прозорості перетворювача більшій, ніж оптимальна для даного матеріалу звукопроводу, і складає величину від 1 до 3 дБ на один перетворювач. Додаткове послаблення сигналів при формуванні ІВ послідовним резистивним подільником виникає в усіх випадках, що пов'язано з дисипативними втратами в елементах подільника. Величина втрат зменшується при збільшенні загального опору подільника і становить від 3 до 4,7 дБ у випадках, коли його добуток з активною складовою акустичної провідності перетворювача змінюється від 1 до 2. Це дозволяє використовувати резистивний подільник у тому випадку, коли відносна смуга прозорості перетворювача менша за оптимальну для звукопроводів з великим коефіцієнтом електромеханічного зв'язку.

Додаткове послаблення сигналів у перетворювачі ПАХ, що має гладкий ІВ, виникає через неоднорідність акустичного потоку та збільшену ступінь металізації і не перевищує 3 дБ у порівнянні з традиційним аподизованим перетворювачем.

На основі відомих виразів для аналізу регенованої перетворювачем хвилі отримано співвідношення для амплітуди додаткової складової

регенерованої хвилі, яка проявляється в режимі короткого замикання шин перетворювача при використанні ємнісного або резистивного методів формування ІВ. Амплітуда регенерованої одним електродом хвилі пропорційна  $(1-0,5a_j)2\omega C$  (де  $\omega$  – кругова частота,  $C$  – ємність одного електрода перетворювача) при формуванні ІВ ємнісним подільником та  $0,5Ra_j(1-a_j)$  при використанні послідовного резистивного подільника, загальний опір якого дорівнює  $R$ . Це приводить до підвищеної загальної регенерації хвиль при формуванні ІВ перетворювача ємнісним подільником у порівнянні з резистивним подільником і, як наслідок, до підвищеної амплітудної та фазової нерівномірності ЧХ фільтрів у смузі прозорості.

Проведено аналіз відбитих хвиль для перетворювача ПАХ, ІВ якого формується розробленим варіантом фазового методу, встановлено характер розподілу відбитих хвиль уздовж перетворювача. Зменшити рівень відбитих хвиль в даному разі можна зменшенням коефіцієнту відбиття від одного краю електрода та зменшенням проміжку між електродами. Проведені розрахунки показують, що рівень відбитих хвиль менший, ніж -30 дБ, можна отримати в перетворювачах ПАХ, коротших за 100λ на звукопроводі з кварцу. Послаблення впливу відбитих хвиль досягається при зважуванні розробленим варіантом фазового методу перетворювачів ПАХ з похиленими електродами.

Відмічено, що округла форма та змінний кут нахилу країв електродів перетворювача, який має гладку форму міжелектродного проміжку, не створюють умов для конструктивної інтерференції відбитих хвиль, що практично усуває їх вплив на ЧХ такого перетворювача.

Вперше запропоновано ефективний метод зменшення рівня хибних сигналів (пов'язаних з об'ємними та відбитими хвилями) у ПАХ-фільтрах. Реалізується метод фокусуванням ПАХ та просторовою фільтрацією об'ємних хвиль у фокальній площині. Послаблення сигналів об'ємних хвиль досягається внаслідок того, що електроди фокусуєчих перетворювачів виконуються у відповідності з кутовою залежністю групової швидкості ПАХ, яка відрізняється від такої для інших типів хвиль. Розрахунковий рівень послаблення сигналів об'ємних мод перевищує -20 дБ в фільтрах на ніобаті літію YZ зрізу при використанні зважених фокусуєчих перетворювачів ПАХ, що мають постійну кутову апертуру електродів не менше 0,56 рад.

Досліджено можливість використання електродних елементів акустичного зв'язку для зменшення впливу об'ємних хвиль на характеристики фільтрів на основі перетворювачів ПАХ з похиленими електродами. Показано, що в разі використання елемента акустичного зв'язку з прямими електродами виникає додаткове послаблення сигналів на (10÷15) дБ, пов'язане з неузгодженістю акустичних полів перетворювача та елемента

акустичного зв'язку. Максимальний зв'язок між акустичними каналами досягається при рівномірній зміні кута нахилу електродів елемента зв'язку від  $-\varphi_{\max}$  до  $\varphi_{\max}$  ( $\varphi_{\max}$  – кут нахилу крайніх електродів перетворювача), та збільшеній у  $2\varphi_{\max} W/\lambda + 1$  рази загальній кількості його електродів (у порівнянні з відомим елементом зв'язку, що має прямі електроди).

Описано стенд оптичного зондування полів ПАХ у реальних мікроструктурах та розроблені методики вимірювання параметрів звукопроводів та акустичних полів ПАХ. Стенд було використано при проведенні експериментального дослідження акустичних полів перетворювачів з прямими електродами, ІВ яких формувався зміною довжини електродів, а також перетворювачів з прямими та з похиленими електродами при їх зважуванні розробленим варіантом фазового методу. Результати дослідження свідчать, що за смугою прозорості перетворювачі ПАХ, ІВ яких формується без зміни довжини електродів, збуджують ПАХ значно меншою мірою, ніж аподизовані. Це зменшує акустичний зв'язок між такими перетворювачами за смугою прозорості і є однією із складових, що забезпечують підвищену вибірковість ПАХ-фільтрів на основі перетворювачів з постійним перекриттям електродів. Результати експериментального дослідження акустичних полів ПАХ однорідного перетворювача ПАХ, форма міжелектродного проміжку в якому відповідає ІВ, показують, що амплітудний профіль збуджуваних хвиль відповідає за формою теоретично розрахованому.

Результати експериментального дослідження свідчать, що форма сигналів, які виникають внаслідок дії регенованих та відбитих перетворювачами хвиль при використанні послідовного резистивного та емнісного подільників і розробленого варіанту фазового методу формування ІВ, відповідає розрахунковій, а максимальна величина сигналів відповідно на 27, 10, 2 дБ перевищує розраховану за наведеними в роботі співвідношеннями.

Наведені параметри ЧХ деяких з фільтрів, що були створені з використанням розроблених у роботі перетворювачів ПАХ та методів синтезу топології. Рівень послаблення сигналів за смугою прозорості не менше -60 дБ в фільтрах з відносною смугою прозорості від 0,65% до 23% при коефіцієнтах прямокутності від 1,4 до 2,8 досягнуто при додатковому зважуванні перетворювачів ПАХ з похиленими електродами послідовним резистивним подільником та фазовим методом. На звукопроводі з ніобату літію вибірковість фільтрів з відносною смугою прозорості  $\approx 10\%$  була збільшена до -65 дБ за рахунок послаблення впливу об'ємних хвиль при використанні елемента акустичного зв'язку з похиленими електродами.

Додаткове послаблення сигналів об'ємних акустичних хвиль на (10+15) дБ було отримано у ПАХ-фільтрах на звукопроводі з ніобату літію при використанні фокусуєчих перетворювачів з кутовою апертурою 0,66 рад і фокусною відстанню 60λ, зважених послідовним резистивним подільником та розробленим варіантом фазового методу.

Розроблено методику корекції топології перетворювачів ПАХ, за якою коригуючою функцією при кожній наступній реалізації служить взята з коефіцієнтом різниця між синтезованим ІВ та отриманим при його попередній реалізації, що розраховуються в однаковому частотному діапазоні. Практично при її використанні за три – чотири ітерації різниця між синтезованим та реалізованим ІВ зменшується з (15+20)% до (3+5)%. Методика та аподизований перетворювач ПАХ, що має міжелектродний проміжок гладкої форми, були використані при розробці ряду фільтрів проміжної частоти телевізійних приймачів різних стандартів. Це дозволило зменшити розміри звукопроводу, підвищити вихід кондиційних фільтрів у порівнянні з тими фільтрами, що випускалися раніше, і при серійному виробництві наблизити параметри фільтрів до параметрів кращих зарубіжних аналогів (апертура перетворювачів (10+15)λ, послаблення сигналів за смугою прозорості не менше -40 дБ, нерівномірність ЧХ в смузі прозорості ≈0,5 дБ при послабленні сигналів на (10+18) дБ, відхилення частотної залежності групового часу запізнення від потрібної не більше ніж на ±30 нс, послаблення небажаних імпульсних сигналів не менше -40 дБ).

У висновку сформульовано основні результати роботи, її практичну значимість, показано використання отриманих результатів у промисловості та науково-дослідних організаціях. В додатку наведено акти, що показують впровадження результатів роботи у промисловість та науково-дослідні організації.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Вперше запропоновано та досліджено метод синтезу топології аподизованих перетворювачів ПАХ з підвищеною точністю відтворення розрахункових характеристик, що здійснюється наданням міжелектродному проміжку гладкої форми, яка відповідає ІВ перетворювача.

2. Розроблено та досліджено метод формування ІВ перетворювачів ПАХ зовнішнім резистивним подільником напруги, елементами якого виступають з'єднані послідовно ділянки електродів.

3. Поширено фазовий метод формування ІВ перетворювачів ПАХ на випадок довільного числа об'єднаних у групи джерел ПАХ змінної полярності. Розроблено варіант такого методу, що здійснюється варіацією

відстані (при її постійності в межах групи) між сусідніми джерелами ПАХ та вперше запропоновано перетворювач ПАХ, у якому фазовий метод реалізується зміною ширини електродів при малій величині міжелектродного проміжку.

4. Проведено оцінку точності відтворення імпульсного та частотного відгуків, додаткового послаблення сигналів, регенованих та відбитих хвиль при формуванні ІВ перетворювачів розробленим варіантом фазового методу, резистивним або ємнісним подільником. Дано рекомендації по використанню цих методів та розроблених перетворювачів у ПАХ-фільтрах.

5. Запропоновані технічні рішення та розвинуті методи проектування реалізовано в САПР фільтрів на ПАХ, що дозволяє оперативно створювати фільтри з вибірковістю не менше  $\approx 60$  дБ, смугою прозорості  $(0,3+30)\%$  та коефіцієнтом прямокутності ЧХ 1,3+3,5.

#### МАТЕРІАЛИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО У ПРАЦЯХ

1. Биденко В.А., Гриц В.Г., Запунный А.П., Хаустов В.К. Исследование амплитудного поля поверхностных акустических волн оптическим гетеродинным методом // Вестн. Киев. политехн.ин-та. Радиотехника. – 1980. – Вып. 17. – С.47-49.

2. Бородий Ю.Н., Гранкин И.М., Запунный А.П., Коломейко А.В. Метод уменьшения уровня ложных сигналов в фильтрах на поверхностных акустических волнах // Письма в ЖТФ. – 1986. - Т.12, вып.5. - С.311-315.

3. Бородий Ю.Н., Запунный А.П., Лопушенко В.К. Измерение коэффициента электромеханической связи тонких пьезоэлектрических пленок с помощью установок лазерного зондирования // Вестн. Киев. политехн.ин-та. Радиотехника. – 1983. – Вып. 20. – С.42-43.

4. Бородий Ю.Н., Грибанов А.С., Запунный А.П., Коломейко А.В., Погребняк В.П. Интегральный метод селективного удаления источников в преобразователях ПАВ // Вестн. Киев.политехн.ин-та. Радиотехника. – 1993. – № 30. – С.55-58.

5. Бородий Ю.Н., Грибанов А.С., Запунный А.П., Изотов А.В., Коломейко А.В., Чайковский В.Р. Система автоматизированного проектирования фильтров на поверхностных акустических волнах // Вестн. Киев.политехн.ин-та. Радиотехника. – 1993. – № 30. – С.100-102.

6. Вернигор А.А., Запунный А.П., Непочатых Ю.В., Скуртов С.Н. Многоканальный согласованный фильтр фазоманипулированного сигнала на поверхностных акустических волнах // Вестн. Киев.политехн.ин-та. Радиотехника. – 1987. – № 24. – С.64-66.

7. Гранкин И.М., Запунный А.П., Кулаева Ч.Г. Оптические системы измерения параметров устройств на поверхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – № 11. – С.38-49.
8. Гранкин И.М., Запунный А.П., Кулаева Ч.Г., Овсянников В.В. Измерение полей ПАВ голографическим и гомодинным методами // Акуст. и ультразвук. техн. (Киев). – 1988. – № 23. – С.128-133.
9. Гриц В.Г., Запунный А.П., Хаустов В.К. Измерение скорости поверхностных акустических волн оптическим фазочувствительным методом // Вестн.Киев.политехн.ин-та. Радиотехника. – 1980. – № 17. – С.51-53.
10. А.с. 1382370 СССР, МКИ H03h9/64. Фильтр на поверхностных акустических волнах / В.Б.Акпамбетов, Ю.Н.Бородий, В.В.Воронов, А.Д.Гончаров, И.М.Гранкин, А.П.Запунный, А.В.Коломейко, С.Н.Колесников (СССР). – № 4048992/40-22; Заяв. 1.03.86.
11. А.с. 1376910 СССР, МКИ H03h9/64. Фильтр на поверхностных акустических волнах / Ю.Н.Бородий, Б.И.Воронков, А.Д.Гончаров, И.М.Гранкин, А.П.Запунный, А.В.Коломейко, (СССР). – № 4048822/40-22; Заяв. 3.04.86.
12. А.с. 1364205 СССР, МКИ H03h9/145. Преобразователь поверхностных акустических волн / А.П.Запунный, Ю.Н.Бородий, И.М.Гранкин, А.В.Коломейко (СССР). – № 4006052/40-22; Заяв. 13.01.86.
13. Патент России № 1356935 от 27 мая 1993 г. МКИ H03h9/145. Преобразователь поверхностных акустических волн / А.П.Запунный, Ю.Н.Бородий, И.М.Гранкин, А.В.Коломейко – № 4006053/40; Заяв.13.01.86.
14. Патент Украины № 1364 від 15 липня 1993 р. Перетворювач поверхневих акустичних хвиль / О.П.Запунний, Ю.М.Бородій, І.М.Гранкін, А.В.Коломейко – № 4006053/40; Заяв.13.01.86.
15. Алексеев А.Н., Леонов А.И., Гранкин И.М., Бородий Ю.Н., Запунный А.П. Исследование акустоомного взаимодействия ПАВ в монокристаллах ГМО методом лазерного зондирования // Матер. конф. "Акустоэлектронные устройства обработки информации" (Черкассы, 1990г.). – М.: ВИНТИ, 1990. – С.66-67.
16. Бородий Ю.Н., Гранкин И.М., Грибанов А.С., Запунный А.П., Коломейко А.В. Анализ вносимых потерь и сигналов отраженных волн в преобразователях, взвешенных без изменения длины электродов // Там же. – С.98-99.
17. Бородий Ю.Н., Воронов В.В., Запунный А.П., Коломейко А.В., Чайковский В.Р. Полосовые фильтры на основе взвешенных блочных преобразователей // Там же. – С.100-101.

18. Бородий Ю.Н., Гранкин И.М., Запунный А.П., Коломейко А.В., Погребняк В.П. Повышение избирательности фильтров на ПАВ на основе веерных преобразователей с помощью многополоскового ответвителя // Там же. - С.121-122.

19. Бородий Ю.Н., Гранкин И.М., Запунный А.П., Коломейко А.В., Погребняк В.П. Экспериментальное исследование фильтров на основе взвешенных веерных преобразователей с многополосковым ответвителем ПАВ // Там же. - С.123-124.

20. Бондаренко О.В., Гранкин И.М., Запунный А.П., Романюк Е.В. Возможности применения  $\Delta V/V$  волноводов в малоапертурных фильтрах на ПАВ // Там же. - С.125-126.

21. Грибанов А.С., Запунный А.П., Коломейко А.В., Погребняк В.П. Влияние методов согласования на характеристики фильтров // Там же. - С.127-128.

22. Бородий Ю.Н., Воронов В.В., Гранкин И.М., Запунный А.П., Колесников С.Н., Коломейко А.В. Опыт разработки полосовых фильтров на ПАВ с фазовым взвешиванием // Матер.конф. "Акустоэлектронные устройства обработки информации" (Черкассы, 1988 г.). - М.: ВИНТИ, 1988. - С.133-134.

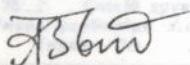
23. Бородий Ю.Н., Гранкин И.М., Запунный А.П., Коломейко А.В. Экспериментальное исследование ориентационных зависимостей групповой скорости ПАВ в монокристаллах // Там же. - С.256-257.

24. Бородий Ю.Н., Гранкин И.М., Запунный А.П., Коломейко А.В. Фокусирующие преобразователи для сжатия пучка ПАВ в широкой полосе частот // Там же. - С.322-323.

25. Бородий Ю.Н., Гранкин И.М., Запунный А.П., Коломейко А.В. Взвешивание преобразователей ПАВ резистивным делителем // Тезисы докладов XIII Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике (Черновцы, 8-10 окт. 1986г.). - Киев: Б.и., 1986 г. - Ч.II. - С. 190.

26. Головина Т.И., Акламбетов В.Б., Гранкин И.М., Запунный А.П., Коломейко А.В., Лопушенко В.К. Телевизионный фильтр промежуточной частоты на силикате висмута // Там же. - С.193-194.

Автор:



Запунный А.П. Преобразователи поверхностных акустических волн для фильтров с повышенной избирательностью, рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы и устройства, Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев, 1996.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований преобразователей поверхностных акустических волн (ПАВ) с повышенной точностью воспроизведения характеристик. Разработаны конструкции, методы синтеза топологии и расчета характеристик таких преобразователей. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования дополнительных вносимых потерь, регенерированных и отраженных волн для некоторых методов взвешивания преобразователей ПАВ без изменения длины электродов.

На основе предложенных решений разработан ряд фильтров промежуточной частоты (в том числе и для телевизионных приемников) и освоен их промышленный выпуск.

Zapunny A.P. Surface acoustic wave transducers for filters with enhanced selectivity, manuscript.

Ph.D. thesis. Speciality 05.12.17 - radiotechnical and television systems and devices, National Technical University of Ukraine "KPI", Kiev, 1996.

The results of theoretical and experimental investigations of surface acoustic wave (SAW) transducers with high reproduction accuracy are presented. Transducer's constructions, the design procedures and computer programs for characteristics' evaluations are developed. Theoretical and experimental investigations of additional insertion losses, regenerated and reflected waves for some methods of SAW transducers weighing without changing electrode's overlaps have been carried out.

On base of proposed constructions a number of intermediate frequency SAW filters (including IM filters for TV-set) are developed and their industrial production is realized.

Ключові слова: перетворювач поверхневих акустичних хвиль, частотна вибірковість, фільтр проміжної частоти.



AB 36.000