

# ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ

---

## SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

---

---

УДК 621.37/39:534

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275943

### ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТОПОЛОГІЇ ЗУСТРІЧНО- ШТИРЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

*Я. І. Леніх*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України  
при ОНУ ім. І. І. Мечникова  
Email: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТОПОЛОГІЇ ЗУСТРІЧНО- ШТИРЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

*Я. І. Леніх*

**Анотація.** Стаття присвячена аналізу існуючих фізико-математичних моделей, що описують роботу зустрічно-штирєвих перетворювачів (ЗШП) поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) Релея, які широко застосовуються в акустоелектроніці при створенні мікроелектронних пристроїв різного функціонального призначення. Аналізуються також вагові функції, за допомогою яких коригується топологія ЗШП з метою зменшення впливу пульсацій Гіббса.

Розглянуті також переваги і недоліки кожної з фізико-математичних моделей, а також вагові функції з позицій досягнення заданих вимог до характеристик пристроїв на ПАХ.

**Ключові слова:** пристрої на поверхневих акустичних хвилях, фізико-математичні моделі, вагові функції

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL AND WEIGHT FUNCTIONS FOR CALCULATING THE TOPOLOGY OF COUNTERPINE CONVERTERS OF SURFACE ACOUSTIC WAVES

*Ya. I. Lepikh*

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of existing physical and mathematical models describing the operation of Rayleigh's counter-pin converters of surface acoustic waves (SAW), which are widely used in acoustoelectronics in the creation of microelectronic devices of various functional purposes. The weighting functions are also analyzed, with the help of which the topology of the counter-pin converters is adjusted in order to reduce the influence of Gibbs pulsations.

The advantages and disadvantages of each of the physical and mathematical models, as well as weighting functions from the point of view of achieving the specified requirements for the characteristics of devices on the characteristic curve, are also considered.

**Keywords:** devices on surface acoustic waves, physical and mathematical models, weight functions

### Вступ

Пристрій на ПАХ класичної структури вважається повністю описаним, коли точно визначена його передатна або імпульсна характеристика. Ці характеристики залежать від структури пристрою основними елементами якого є перетворювач ПАХ – топології ЗШП, які і визначають передатну і пов'язану з нею через перетворення Фур'є імпульсну характеристику, а також від електрофізичних і акустичних параметрів п'єзоелектричного звукопроводу [1–2].

Зазначимо, що точного і послідовного математичного опису роботи ЗШП не знайдено через складність врахування вторинних ефектів, що супроводжують генерацію і поширення ПАХ в п'єзоелектриках, особливо в анізотропних: взаємодія електродів ЗШП між собою, генерація паразитних об'ємних мод, регенерація, дифракція, дисперсія, крайові ефекти, різниці швидкості ПАХ на вільній і металізованій поверхні звукопроводу та ін.

Більшість фізико-математичних моделей, що описують генерацію, поширення і детектування ПАХ базуються на представленні пристрою на ПАХ з ЗШП у вигляді трансверсального фільтра [1,3–7].

Розглянемо цю задачу на прикладі звукопроводу з монокристалічного матеріалу і двох еквідистантних ЗШП, один з яких аподинований – другий неаподинований.

На основі вказаного вище представлення ЗШП у вигляді пристрою з дискретизованою імпульсною характеристикою в роботі здійснено системний аналіз різних фізико-математичних моделей, що описують роботу ЗШП, з метою вибору їх для синтезу пристрою на ПАХ того чи іншого функціонального призначення з заданою точністю необхідних характеристик з оптимізацією в залежності від електрофізичних параметрів (ЕФП) і акустичних характеристик п'єзоелектричних звукопроводів.

### Аналіз фізико-математичних моделей ЗШП

Модель еквівалентних схем описує ЗШП у вигляді каскадного з'єднання шести-полюсників (еквівалентних схем Мезона для перетворювачів об'ємних акустичних хвиль (ОАХ) з поперечним полем) з двома акустичними і одним електричним входами. Ця модель дозволяє розрахувати передатну функцію перетворювача з врахуванням електричного навантаження, визначити його вхідну провідність, оцінити електричну взаємодію електродів ЗШП і рівень відбитих сигналів. Однак при розробці цієї моделі передбачалось, що вона не являється точним відображенням реальних фізичних процесів в ЗШП.

Для випадку коли ширина електрода  $a_n$  дорівнює проміжку між ними  $b_n$  і дорівнює

ють половині довжини ПАХ  $\lambda_n$ , кожний основний елемент моделі складається з пари двох  $\delta$ -функцій

$$Q_{e.l.n}(t) = \sqrt{\omega/\omega_0} \left[ \delta \left( t + \frac{\pi}{2\omega_n} \right) - \delta \left( t - \frac{\pi}{2\omega_n} \right) \right] \quad (1)$$

зі спектром

$$A_{e.l.n}(\omega) = i2\sqrt{\omega/\omega_0} \sin\left(\frac{\pi}{2}\omega/\omega_n\right), \quad (2)$$

де  $\omega_0$  – центральна частота.

Ця модель свідчить про свою ефективність не стільки для синтезу пристроїв на ПАХ скільки для їх аналізу. Крім того, вона більш придатна при використанні в якості звукопроводів пристроїв сильних п'єзоелектриків.

**Імпульсна модель.** У відповідності до неї для періодичного ЗШП визначається положення нулів його імпульсної характеристики у вигляді модульованої по амплітуді синусоїдальної хвилі в центрах проміжків між електродами

$$h(t) = 4k_s \sqrt{C_s W_0} (\omega_0/2\pi)^{3/2} h_0 t \sin(\omega_0 t), \quad (3)$$

де  $h_0(t)$  – функція перекриття електродів  $e(t) = y_n W_0$  в момент часу  $t_n$  відповідним центром електродів,  $W_0$  – максимальна довжина електрода. Таким чином, структура ЗШП являється просторовим відображенням його імпульсної характеристики.

В цій моделі має місце залежність  $h(t)$  від частоти у вигляді  $\omega_n^{3/2}$ , яка отримана з закону збереження енергії і масштабного множника. Кінцева формула для розрахунку перекриття електродів ЗШП  $e(t_n)$  має вигляд

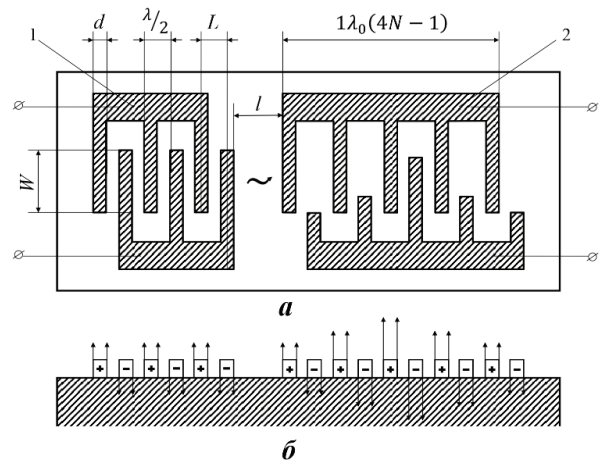
$$e(t_n) = y_n/W_0 \approx h(t_n)/(\omega_n/\omega_0)^{3/2}. \quad (4)$$

Ця модель дозволяє розрахувати передатну функцію і топологію ЗШП зі зважуванням довжини і періоду розстановки електродів і врахувати ефект електричного навантаження.

Модель дозволяє досягти результатів порівняних з результатами моделі еквівалентних схем при менших затратах на обчислення, однак також більше підходить не для синтезу пристроїв на ПАХ, а для їх аналізу і не відображає належним чином дійсних механізмів

перетворення акустичних і електричних сигналів.

**Модель  $\delta$ -функцій (джерел).** У цій моделі враховується розподілення електричних полів в ЗШП (рис. 1). При цьому  $\delta$ -функції розташовуються на краях електродів і описують неоднорідність тангенційної складової електричного поля між електродами, але на зовнішніх краях ЗШП  $\delta$ -функції відсутні. Вважалося, що ця модель точно відображає фізичний зміст аналогової вибірки при своїй простоті. Але практика її застосування показала, що вона дає добрі результати головним чином для слабких п'єзоелектриків в межах центральної частоти, а для гармонік вона є неточною.



**Рис. 1. Конструкція пристрою на ПАХ, що містить аподизований і неаподизований ЗШП – а, схема моделі  $\delta$ -джерел ЗШП- б.**

**Модифікована модель  $\delta$ -функції,** зберігає її позитивні властивості і дозволяє більш точно врахувати фізичні процеси в ЗШП. Для цього на основі об'єднання в пари і перегруповання  $\delta$ -функцій в модель введена акустична функція вибірки виду

$$a_{e.l.n}(t) = \sqrt{\omega_n/\omega_0} e^{i\omega_n t} \left[ \delta \left( t + \frac{\pi d_n}{2\omega_n} \right) + \delta \left( t - \frac{\pi d_n}{2\omega_n} \right) \right]. \quad (5)$$

Основним недоліком модифікованої моделі  $\delta$ -функцій являється неможливість врахування реального розподілу поля на краях ЗШП, що обмежує застосування моделі для секціонованих або зважуваних розстановкою електродів ЗШП.

Для пристрою на ПАХ з аподизованим і неаподизованим ЗШП (рис.1) і вибраного в якості звукопровода монокристалічного п'єзокварца  $\text{SiO}_2$  – STзрізу, що відноситься до слабких п'єзоелектриків, але з високою стабільністю електрофізичних і акустичних параметрів і малим впливом вторинних ефектів на основні характеристики сенсора, модель  $\delta$ -функцій є оптимальною.

В цій моделі допускається, що при генерації ЗШП електричною напругою його електроди являються дискретними джерелами акустичної енергії, що описується  $\delta$ -функціями, заданими на краях кожного електрода. З кожного електрода випромінюється плоска хвиля, що поширюється вздовж нормалі до краю електрода. Амплітуда  $a_n$   $\delta$ -функцій пропорційна електричному заряду, що визначається ступенем перекриття електродів і ЕФП п'єзоелектрика, а хвиля на виході випромінюючого ЗШП є суперпозицією плоских хвиль, які генеруються кожним  $\delta$ -джерелом і слідує з затримкою  $T_0$ . Сигнал же на виході приймального ЗШП представляється сумою сигналів, що виникають в результаті проходження всіх зазначених хвиль повз кожного з його електродів, які в цьому випадку являються дискретними детекторами ПАХ і діють як відводи трансверсального фільтра, який являється нерекурсивним цифровим фільтром.

Амплітудне зважування електродів ЗШП, як відводів трансверсального фільтра легко здійснюється аподизацією, тобто ефективність відводів визначається тією частотою падаючої хвилі, яка пересікає електроди, що перекриваються.

Як зазначено вище, передатна характеристика пристрою на ПАХ при його синтезі знаходиться з імпульсної характеристики, яка відповідає структурі ЗШП. В задачу синтезу пристрою на ПАХ входить розрахунок вибраної структури ЗШП по заданій передаточній АЧХ. При розрахунку на основі моделі  $\delta$ -функцій АЧХ зв'язана з імпульсною характеристикою відповідною до структури ЗШП через Фур'є-перетворення.

Частіше за все необхідно отримати пристрій на ПАХ з АЧХ близькою до прямокутної у вигляді

$$H(f) = \begin{cases} h(t), & \text{при } |f| \leq \frac{\Delta f}{2} \\ 0 & \text{при } |f| > \frac{\Delta f}{2} \end{cases} \quad (6)$$

Імпульсний відгук для такої функції отримаємо через Фур'є-перетворення

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(f) \exp(i2\pi ft) dt \quad (7)$$

буде мати вигляд залежності  $(\sin x)/x$  (рис. 2).

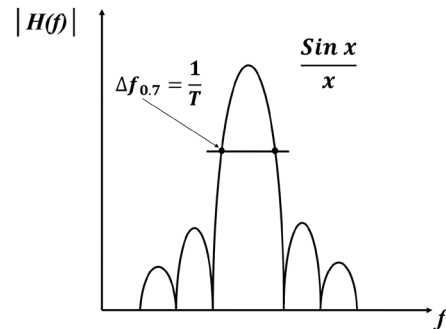


Рис. 2. Імпульсний відгук в моделі  $\delta$ -функцій.

Функція, що описує ступінь перекриття електродів аподизованого ЗШП, яка називається функцією анодизації, буде мати такий же вигляд. При цьому розподіл джерел по амплітуді буде відповідати довжині кожної пари електродів, що визначається квантуванням імпульсної характеристики по закону

$$a_n = (-1)^n h(nT), \quad (8)$$

а фаза джерел визначається розташуванням на поверхні звукопровода в точках  $nT$ , де  $T=1/2f_0$ . Множник  $(-1)^n$  вказує на перемену полярності електродів, що відповідає нулям Фур'є-образу. Оскільки фізично реалізувати ЗШП у вигляді (7) неможливо, бо границі інтегрування в реальності обмежуються, що і відповідає обмеженості протяжності ЗШП. Наслідком такого обмеження є виникнення пульсацій АЧХ і ФЧХ, які отримали назву пульсацій Гіббса.

Одним із способів зменшення величини цих пульсацій є використання додаткової аподизації ЗШП «ваговою» функцією, або функцією «вікна». Ваговою є симетрична відносно центральної частоти функція, що плавно зменшується до країв перетворювача. Згортка основної функції з ваговою дозволяє отримати

кращу вибірковість і зменшення бокових пелюсток імпульсної характеристики, а також дає аналітичну залежність між цими параметрами. Вибір тої чи іншої вагової функції обумовлюється вимогами, що ставляться до характеристик пристрою.

В даний час відомо і використовується значне число різних вагових функцій.

Функція Кайзера має вигляд

$$W(t) = \begin{cases} \frac{I_0[\omega_\alpha \sqrt{\tau^2 - t^2}]}{I_0(\omega_\alpha \tau)}, & \text{при } |t| < \tau, \\ 0, & \text{при } |t| > \tau \end{cases}, \quad (9)$$

де  $I_0$  – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку;

$2\tau$  – тривалість імпульсного відгуку;

$r = \omega_\alpha \tau$  – параметр, пов'язаний з шириною основної пелюстки функції згортки;

$\omega_\alpha = K_1 B$  – кратне полосі пропускання і вибирається з врахуванням необхідного рівня подавлення бокових пелюсток;

$\tau = \frac{K_2}{B}$  – кратна декільком значенням зворотної полоси

$K_1$  і  $K_2$  – постійні коефіцієнти.

Достоїнством функції Кайзера є забезпеченість мінімального рівня бокових пелюсток до 80 дБ. До недоліків слід віднести неоднозначність в визначенні коефіцієнтів «вікна» і висока чутливість АЧХ до технологічних похибок відтворення коефіцієнтів аподизації.

Функція Дольфа-Чебишева має вигляд

$$W(f) = \begin{cases} \gamma I_1(N\gamma\alpha) & , \quad -2f_0\tau < N < 2f_0\tau \\ \left[ \frac{ch(2\gamma_0)+1}{2} \right]^{\tau/T_0}, & N \geq 2f_0\tau \end{cases}, \quad (10)$$

де  $I_1$  – модифікована функція Бесселя першого роду першого порядку;

$$\gamma = [1 - (N/2f_0\tau)^2]^{1/2}; \quad \alpha = \cos^{-1} \left[ \frac{3 - ch(2\gamma_0)}{1 - ch(2\gamma_0)} \right];$$

$N = 2f_0T$  – число електродів ЗШП відповідне дискретизації імпульсного відгуку в будь-який бік від його центра;

$N = \sqrt{\pi/4K_p^2}$  – оптимальна кількість електродів ЗШП;  $\gamma_0 = \frac{ch^{-1}R}{2(2N)}$ ;

$R$  – відношення амплітуд основного і бокового пелюсток.

Функція Дольфа-Чебишева забезпечує мінімальну ширину перехідної смуги при заданому рівні бокових пелюсток, що важливо для частотно-часових селективних пристроїв, однак має ті ж недоліки, що і функція Кайзера і, крім того, у неї досить складний для розрахунку вигляд.

Широке застосування отримала вагова функція у вигляді квадрата косинуса на п'єдесталі

$$h(t) = \left[ k + (1 - k) \cos^2 \frac{\pi t}{2\tau} \right] [U_{-1}(t + \tau) - U_1(t - \tau)], \quad (11)$$

де  $U_{-1}$  – одинична сходинка,  $\tau$  – тривалість імпульсного відгуку секції ЗШП.

При  $k=0,08$  відома як функція Хеммінга. Значне придушення бокової пелюстки досягається при коефіцієнті  $k=0,54$ .

Функція Хеммінга є досить простою в реалізації і дає тим кращі результати, чим більша протяжність перетворювача (при  $T=102\lambda$  придушення бокових пелюсток перевищує 40 дБ). Недоліком цієї функції є низька ефективність при малому числі електродів ЗШП.

Значне придушення сигналу в полосі затримки забезпечує функція Блекмана:

$$h(t) = 0,42 + 0,5 \cos\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) + 0,08 \cos\left(2\pi \frac{t}{\tau}\right), \quad -\tau \leq t \leq \tau. \quad (12)$$

В деяких випадках буває зручно використовувати більш просту функцію, наприклад, функцію Фейсра:

$$h(t) = \begin{cases} 1 - 2t/T, & |t| \leq 0,5T \\ 0, & |t| > 0,5T \end{cases}, \quad (13)$$

де  $T$  – період дискретизації імпульсного відгуку,

або функцію Ланцоша:

$$h(t) = \begin{cases} \sin c\left(\frac{\pi t}{T}\right), & |t| < 0,5T \\ 0, & |t| \geq 0,5T \end{cases}, \quad (14)$$

де  $c = \frac{\sin x}{x}$ .

Обидві останні функції забезпечують незначне збільшення затухання в смугі затримання, але при цьому погіршують коефіцієнт прямокутності.

На практиці інколи виникає необхідність синтезу пристрою на ПАХ з перехідною характеристикою  $H(\omega)$ , що відрізняється від прямокутної. Наприклад, для забезпечення мінімальних спотворень радіоімпульса оптимальною АЧХ  $H(\omega)$  є характеристика вигляду функції Гаусса:

$$|H(\omega)| = 2A\sqrt{\pi/\alpha} \exp[-(\omega - \omega_0)^2/4\alpha], \quad (15)$$

де  $\alpha$  – параметр зв'язаний з розладом  $\Delta f$ , що відповідає ослабленню сигналу в  $\alpha$  разів співвідношенням

$$\Delta f = (2/\pi)\sqrt{\alpha \ln d},$$

де  $d = \lambda/2$ .

Гаусовій  $H(\omega)$  відповідає імпульсний відгук вигляду

$$h(t) = A \exp(-at^2), \quad -\infty < t < +\infty. \quad (16)$$

Окрім наведених вище використовуються також інші функції, наприклад Вейерштрасса, Діріхле, але значно рідше.

Слід зазначити, що функції Хеммінга, Фейера і Гаусса дозволяють досягнути мінімальної нерівномірності  $H(\omega)$  ( $< 0,5$  дБ) в полосі пропускання, що в багатьох випадках задовольняє задані вимоги.

Оптимальними з точки зору придушення бокових пелюсток і мінімальної перехідної полоси являються функції Кайзера і Дольфа-Чебишева. Всі вагові функції (крім функцій Фейера) не вносять значних втрат сигнаду в полосі пропускання.

Слід зазначити, що фізичного обґрунтування вибору тої чи іншої віконної (вагової) функції немає. Тобто можна стверджувати про їх емпіричний вибір, а не застосування як таких, що враховують фізико-математичні особливості роботи ЗШП в наслідок його обмеженості і дискретності. Тому, при симетричній відносно центральної частини АЧХ  $H(\omega)$ , ваговою (віконною) функцією може бути будь-яка функція, що монотонно спадає від центра ЗШП до країв і на краях дорівнює нулю.

Виходячи з цього ми отримали і дослідили вагову функцію, що враховує дискретність

і обмеженість імпульсної характеристики [8] у вигляді

$$|H(\omega)| = \left| \frac{1 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} W_{n-k} \cos \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} W_{n-k} \cos k\pi} \right|, \quad (17)$$

де  $W_{n-k}$  – коефіцієнт аподизації в  $k$ -й точці дискретизації;

$n$  – число електродів розташованих з кожної сторони від центрального;

$k$  – поточний номер електрода ЗШП.

Використання віконної функції (17) для аподизації ЗШП дозволяє досягнути суттєво кращих результатів по затуханню сигналу за полосою пропускання на 5 дБ і по зниженню бокових пелюсток на 7 дБ краще ніж, наприклад, по функції Кайзера при менших затратах на обчислення.

В описаних методах розрахунку пристроїв на ПАХ передбачалось, що один ЗШП широкосмуговий і він не впливає на загальну  $H(\omega)$ . Якщо ж неаподизований ЗШП недостатньо широкосмуговий і відбувається завал  $H(\omega)$  пристрою на краях смуги пропускання, то необхідно розраховувати пристрій з врахуванням неаподизованого перетворювача.  $H(\omega)$  в цьому випадку визначається добутком передатних характеристик обох перетворювачів:

$$H(\omega) = H_1(\omega) H_2(\omega), \quad (18)$$

де  $H_1(\omega)$  і  $H_2(\omega)$  – передатні характеристики аподизованого і неаподизованого перетворювачів.

Відповідно при цьому імпульсна характеристика пристрою визначається згортокою імпульсних характеристик ЗШП

$$h(t) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} h_1(m) h_2(n - m), \quad (19)$$

де  $n = 0, 1, \dots, m-1$ .

Для випадку найбільш поширених до пристроїв на ПАХ вимог мати прямокутну  $H(\omega)$  з придушенням бокових пелюсток не менше 40 дБ і високою стабільністю характеристик оптимальним є звукопровід з п'єзоелектричного матеріалу –  $\text{SiO}_2$  ST-зрізу та синтезовані за фізико-математичною моделлю  $\delta$ -функцій зі структурою з двох ЗШП – аподизованого і неаподизованого.

Для зменшення ефектів, викликаних необхідністю обмежувати в часі імпульсну характеристику (пульсації Гіббса), оптимальною є вагова функція Хеммінга.

Для розрахунку ЗШП вхідними даними програми є:  $v$  – швидкість поширення ПАХ,  $k_p^2$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзоелектричного матеріалу звукопроводу,  $L_0$  – початкове значення апертури ЗШП,  $R_0$  – необхідний опір випромінювання,  $\epsilon$  – діелектрична проникність матеріалу звукопроводу,

$f_0$  – центральна частота,  $B$  – смуга пропускання пристрою на ПАХ,  $B_1$  – перехідна смуга,  $p$  – рівень бокових пелюсток. Оптимізація  $H(\omega)$  здійснюється з врахуванням запасу немінучих технологічних похибок і вторинних ефектів шляхом варіації коефіцієнтів вагової функції до отримання заданих  $H(\omega)$  і  $p$  для обраної структури ЗШП. Коли при оптимізації отримані необхідні електричні характеристики, програма приступає до розрахунку топології ЗШП виду, наприклад, представленому на рис. 3.

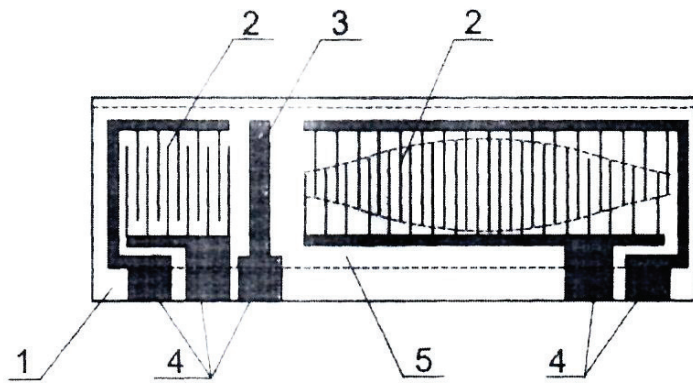


Рис. 3. Топологія розрахованого аподизованого ЗШП. 1- п'єзоелектричний звукопровід, 2 – ЗШП, 3 – плівковий електричний екран, 4 – електричні виводи, 5 – пристрій в цілому.

На рис. 4 представлені розрахована і експериментальна характеристики  $H(\omega)$  (АЧХ).

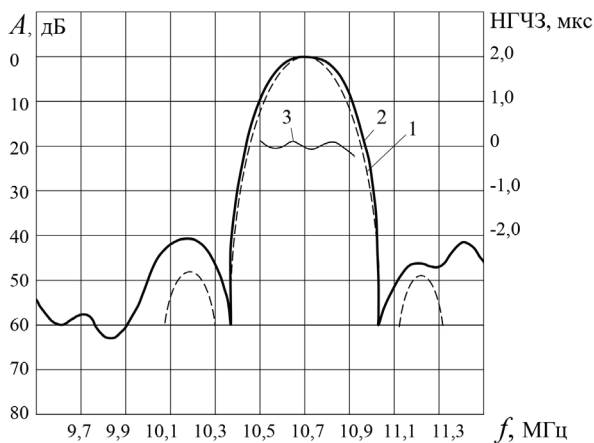


Рис. 4. Розрахована і експериментальна характеристика  $H(\omega)$  (АЧХ). 1 – розрахована АЧХ, 2 – експериментальна АЧХ, 3 – НГЧЗ (нерівномірність групового часу затримки).

### Висновки

На основі проведеного системного аналізу різних фізико-математичних моделей, що описують роботу ЗШП ПАХ, як пристрою з дискретизованою імпульсною характеристикою, оптимальною може вважатися модель яка найбільше враховує вторинні ефекти, що супроводжують генерацію і поширення ПАХ в п'єзоелектричних звукопроводах, залежних від топології ЗШП, ЕФП і акустичних характеристик п'єзоелектрика.

Такою, зокрема, є модель еквівалентних схем для випадку застосування при необхідності сильних п'єзоелектриків, наприклад,  $\text{LiNbO}_3$  з високими значеннями  $K_p^2$ ,  $\epsilon$ .

Для звукопроводу зі слабких п'єзоелектриків, наприклад  $\text{SiO}_2$ , оптимальною може бути модель  $\delta$ -функцій.

В одному і другому випадку оптимальними можуть вважатися відповідно вагові функції Кайзера і функція Хеммінга.

Отримані результати можуть бути корисними при створенні акустoeлектронних пристроїв на ПАХ різного функціонального призначення.

#### Список використаної літератури:

[1]. Lepikh Ya. I., Kalashnikov A. N., Litvinov V. F., Nazarenko A. F. Comparative analysis of AFR of the Butterworth LC-filters and of the SAW-filters with regard to technological factors // By Allerton Press. Inc. 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923.–1996.–P. 37–40

[2]. Lepikh Ya. I., Lienkov S. V., Mokrytskyi V. A., Seliukov O. V., Smyntyna V. A. Napivprovodnykovi ta akustoelektronni optychni sensory i systemy // Monohrafiia. Odesa: Astroprint,–2009.–275 s. (in Ukrainian).

[3]. Morgan D. Surface acoustic wave filters with applications to electronics communications and signal processing// Elsevier, 2007,– 448 p.

[4]. Hasimoto K. -Y., Omori T., Yamaguchi M. Analysis of SAV excitation and propagation

under periodic metallic grating structures// Int. J of High Speed Electronics and Systems.– 2000.– V. 10, N3.– P. 686–734.

[5]. Finger N., Kovacs G., Shoberl S., Langer U. Accurate FFM/BEM-simulation of surface acoustic wave filters// IEEE Ultras. Symp.– 2003.– P. 1680–1685.

[6]. Frommelt T., Gogel D., Koctur M. et al. Flow patterns and transport in Rayleigh surface acoustic wave streaming: combined finite element method and ray tracing numeric versus and experimental validation// IEEE Ultras. Symp.– 2008.– P. 1932–1935.

[7]. Lepikh Ya. I. Acoustoelectronic devices with controlled characteristics// «Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics» (UkrMiCo), Odesa, Ukraine, 201, 11–15 Sept. 2017, International Conference.

[8]. Lepikh Ya. I. Vesovaya funkciya, uchityvayushchaya diskretizatsiyu i ogranichennost' impul'snoj harakteristiki fil'trov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah// Radioelektronika ta informatika.– 2000.– No 1.– S. 4–8 (in Russian).

Стаття надійшла до редакції 09.03.2023 р.

UDC621.37/39:534

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275943

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL AND WEIGHT FUNCTIONS FOR CALCULATING THE TOPOLOGY OF COUNTERPINE CONVERTERS OF SURFACE ACOUSTIC WAVES

*Ya. I. Lepikh*

Interdepartmental scientific-educational physics and technical center of MES and NAS of Ukraine at Odesa I. I. Mechnikov National University  
Email: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

#### Summary

The article is devoted to the analysis of existing physical and mathematical models describing the operation of Rayleigh's counter-pin converters of surface acoustic waves (SAW), which are widely used in acoustoelectronics in the creation of microelectronic devices of various functional purposes. Analyzing also the weighting functions with the help of which the topology of the counter-pin converters is adjusted in order to reduce the influence of Gibbs pulsations.

The advantages and disadvantages of each of the physical and mathematical models, as well as weighting functions from the point of view of achieving the specified requirements for the characteristics of devices on the characteristic curve, are also considered.



The possibility of optimal use of a specific model of the weight function, taking into account the electro-physical and acoustic characteristics of the piezoelectric material, is shown on the example of a specific monocrystalline piezoelectric material of the sound pipe for the classical structure of the counter-pin converters.

**Keywords:** devices on surface acoustic waves, physical and mathematical models, weight functions

УДК 621.37/39:534

DOI: 10.18524/1815-7459.2023.1.275943

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТОПОЛОГІЇ ЗУСТРІЧНО- ШТИРЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ**

*Я.І. Леніх*

Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України  
при ОНУ ім. І.І. Мечникова  
Email: ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### **Реферат**

Стаття присвячена аналізу існуючих фізико-математичних моделей, що описують роботу зустрічно-штирєвих перетворювачів (ЗШП) поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) Релея, які широко застосовуються в акустoeлектроніці при створенні мікроелектронних пристроїв різного функціонального призначення. Розглянуто вагові функції за допомогою яких коригується топологія ЗШП з метою зменшення впливу пульсацій Гіббса.

Розглянуто також переваги і недоліки кожної з фізико-математичних моделей, а також вагових функцій з позицій досягнення заданих вимог до характеристик пристроїв на ПАХ.

На прикладі конкретного монокристалічного п'єзоелектричного матеріалу звукопроводу для класичної структури ЗШП показана можливість оптимального використання певної моделі вагової функції з врахуванням електро-фізичних і акустичних характеристик п'єзоелектричного матеріалу.

**Ключові слова:** пристрої на поверхневих акустичних хвилях, фізико-математичні моделі, вагові функції