

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

С. С. РУПКУС*, В. П. МАРКЯВИЧЮС

Кафедра конструирования радиоаппаратуры Каунасского политехнического института им. Антанаса Снечкуса, г. Каунас
Представил доц. Э. БАРАТ

Введение

Фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) позволяют реализовать широкий класс амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Однако при изготовлении многие технологические операции вызывают отклонения параметров топологии, что связано с появлением погрешностей электрических характеристик фильтров.

Из анализа технологического процесса изготовления акустоэлектронных фильтров следует, что наиболее характерными погрешностями топологии встречно-штыревого преобразователя (ВШП) являются погрешности длины электродов и технологические дефекты топологии (обрывы электродов) [1].

В случае появления погрешностей в топологии ВШП перекрытие электродов с левой и правой сторон неодинаково, следовательно амплитуды дельта-источников становятся неодинаковыми, так как они пропорциональны перекрытию смежных электродов. Для анализа ВШП целесообразно использовать модель с двумя дельта-источниками, расположенными на краях электродов, которая позволяет учесть различную степень перекрытия данного электрода со смежными [2]. Согласно этой модели АЧХ фильтра равна

$$H(jf) = \sum_{k_1=1}^{2(N-1)} \sum_{k_2=1}^{2(M-1)} \Delta Z_{k_1 k_2}^* I_{k_1} I_{k_2} \exp \left\{ j \frac{\pi f}{2f_0} [(k_1 - N) - (k_2 - M)] \right\}, \quad (1)$$

где k_1, k_2 — порядковый номер дельта-источников на электродах передающего и приемного ВШП, N, M — общее количество электродов в передающем и приемном ВШП соответственно, $\Delta Z_{k_1 k_2}^*$ — степень

* В настоящее время в Институте электроники техники связи Будапештского Технического Университета.

перекрытия активной части ВШП, I_{k_i} — нормированные амплитуды дельта-источников, отнесенные ко всей длине апертуры ($i = 1, 2$), f_0 — частота акустического синхронизма.

В ряде случаев акустоэлектронные фильтры состоят из широкополосного ВШП, имеющего небольшое количество электродов, и ВШП, формирующего АЧХ. Как показал анализ, технологические погрешности широкополосного ВШП слабо влияют на суммарную АЧХ фильтра (менее 0,5%). Таким образом, основные характеристики зависят от аподизованного ВШП. В этом случае выражение (1) упрощается

$$H(jf) = \sum_{k=1}^{2(N-1)} A(k) \exp \left[-j \frac{\pi f}{2f_0} (k - N) \right], \quad (2)$$

где $A(k)$ — амплитуды дельта-источников.

На основе выражения (2) проведен анализ погрешностей АЧС с помощью ЭВМ. При расчетах параметры топологии определяются с учетом погрешностей, которые моделируются на основе метода Монте-Карло.

Влияние технологических дефектов топологии на АЧХ фильтра

Появление обрыва на каком-то электроде и место его расположения является случайным событием. Поэтому технологический процесс удобно характеризовать вероятностью обрыва на единицу длины электрода P [3]. Если апертуру обозначить через W , то вероятность обрыва электрода равна

$$P_e = PW. \quad (3)$$

Поскольку координата расположения обрыва является случайной величиной, имеющей равновероятностный характер по всей площади ВШП, для статистического моделирования используется случайная величина с равномерным законом распределения в интервале (0, 1). Тогда для имитации обрыва можно воспользоваться следующим алгоритмом.

Для каждого n -го электрода генерируется случайное число $\Psi(n)$, которое сравнивается с вероятностью обрыва электрода P_e :

— если $\Psi(n) < P_e$, то принимается, что обрыв отсутствует и амплитуда дельта-источника равна ее величине необорванного электрода,

— если $\Psi(n) \geq P_e$, принимается, что электрод оборван и генерируется другое случайное число $\Psi'(n)$ в интервале (0, 1), определяющее место обрыва электрода.

Для прямоугольной формы АЧХ длина электродов взвешивается функцией анодизации и функцией “окна” $W(n)$. Суммарная функция анодизации равна

$$A(n) = \cos \pi(n - N) \frac{\sin \pi \frac{\Delta f}{2f_0} (n - N)}{\pi \frac{\Delta f}{2f_0} (n - N)} W(n), \quad (4)$$

где n — порядковый номер электрода, Δf — ширина полосы пропускания фильтра.

Выражение (4) может быть преобразовано в следующий вид

$$A(n) = |A(n)| I(n), \quad (5)$$

где $I(n)$ — единичная функция.

Координата конца n -го электрода по оси z , перпендикулярной направлению распространения ПАВ, равна

$$z(n) = \frac{1}{2} [A(n) + 1]. \quad (6)$$

Тогда координата конца оборванного электрода $z^*(n)$ равна: — если $I(n) > 0$,

$$z^*(n) = \begin{cases} z(n), & \Psi(n) \geq z(n) \\ \Psi(n), & \Psi(n) < z(n) \end{cases}, \quad (7)$$

— если $I(n) < 0$,

$$z^*(n) = \begin{cases} \Psi(n), & \Psi(n) \geq z(n) \\ z(n), & \Psi(n) < z(n) \end{cases}. \quad (8)$$

Перекрытие электродов, когда рядом расположены электроды противоположного направления, равно

$$\Delta z^* = \begin{cases} z^*(n) - z^*(n+1), & I(n) > 0 \\ z^*(n+1) - z^*(n), & I(n) < 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Перекрытие электродов, когда рядом расположены электроды того же направления, условно принимается равным нулю.

При этом амплитуды дельта-источников рассчитываются следующим образом:

— если $I(n) > 0$,

$$A^*(k) = \begin{cases} 0, & \Delta z^* \leq 0 \\ \Delta z^*, & \Delta z^* > 0 \end{cases}, \quad (10)$$

— если $I(n) < 0$,

$$A^*(k) = \begin{cases} 0, & \Delta z^* \leq 0 \\ -\Delta z^*, & \Delta z^* > 0 \end{cases}, \quad (11)$$

$$A^*(k+1) = -A^*(k). \quad (12)$$

Влияние погрешностей длины электродов на АЧХ фильтра

Погрешность длины электрода может быть выражена следующим образом

$$\Delta z(n_e) = \Delta z_M(n_e) + \Delta z_c(n_e), \quad (13)$$

где $\Delta z_M(n_e)$ — систематическая составляющая погрешности, $\Delta z_c(n_e)$ — случайная составляющая погрешности.

Составляющие погрешности Δz нормированы относительно апертуры ВШП и зависят от места расположения электродов на подложке. Будем считать, что функция плотности распределения погрешности $f(\Delta z_c, n)$ известна. На ЭВМ формируется случайное число $\Psi(n_e)$ с равномерным законом распределения в интервале (0, 1).

Тогда на основе выражения

$$\Psi(n_e) = \int_{-\infty}^{\Delta z_c} f(y, n_e) dy \quad (14)$$

определяется случайная величина $\Delta z_c(n_e)$, подчиняющаяся закону распределения

$$f(y, n_e) = f(\Delta z_c, n_e). \quad (15)$$

Реальная длина электродов равна

$$z^*(n_e) = z(n_e) + \Delta z(n_e)$$

$$z^*(n_e + 1) = z(n_e + 1) + \Delta z(n_e + 1). \quad (16)$$

Амплитуды дельта-источников определяются как

$$|A^*(n)| = |A(n)| + \Delta z(n_e) + \Delta z(n_e + 1), \quad (17)$$

где $n = 1, 3, 5, \dots (2N - 1)$.

Координаты перекрытия электродов равны:

— если $A(n) \geq 0$,

$$\begin{cases} z_n^H = 1 - z^*(n_e + 1) = \frac{1}{2} [1 - A(n)] - \Delta z(n_e + 1) \\ z_n^k = z^*(n_e) = \frac{1}{2} [1 + A(n)] + \Delta z(n_e) \end{cases}, \quad (18)$$

— если $A(n) < 0$,

$$\begin{cases} z_n^H = 1 - z^*(n_e) = \frac{1}{2} [1 + A(n)] - \Delta z(n_e) \\ z_n^k = z^*(n_e + 1) = \frac{1}{2} [1 - A(n)] + \Delta z(n_e + 1) \end{cases}. \quad (19)$$

Результаты численного исследования

На ЭВМ были проведены численные исследования погрешностей АЧХ фильтров на ПАВ при числе реализаций $n = 100$. В качестве частоты принята нормированная частота $\xi = \frac{f - f_0}{\Delta f}$. В результате получено

максимальное значение АЧХ $H_{\max}(\xi)$, минимальное значение $H_{\min}(\xi)$, среднее значение $\bar{H}(\xi)$, поле допуска $\delta[H(\xi)]$. Исследовано влияние длины преобразователя на погрешности АЧХ при значениях вероятности обрыва электрода $P_e = 0,01, 0,02, 0,05$ и относительной погрешности длины $\Delta z = 0,5, 1, 5\%$. Длина преобразователя измерялась количеством боковых лепестков функции аподизации: без боковых лепестков, с одним и двумя лепестками ($L = 0, 1, 2$). На рис. 1 представлены АЧХ фильтра в случае $L = 2$ и прямоугольном "окне". В отсутствие погрешностей данное "окно" обеспечивает уровень боковых лепестков АЧХ — 23 дБ.

В таблицах 1 и 2 приведено среднее значение уровня боковых лепестков $\bar{\alpha}$, максимальное значение α_{\max} и поле допуска $\delta(\alpha)$ в случае обрывов и погрешностей длины электродов, применяя "окно" Ланцоша-Римана, которое обеспечивает уровень боковых лепестков АЧХ — 40 дБ.

На рис. 1—5 представлены АЧХ и гистограммы распределения уровня боковых лепестков при наличии обрывов и погрешностей длины электродов при двух значениях длины преобразователя ($L = 0, 1$) в случае "окна" Ланцоша-Римана.

Таблица 1
Параметры АЧХ фильтра при наличии обрывов электродов ВШП

P_e	Параметры	Значение параметров, дБ		
		$L=0$	$L=1$	$L=2$
0,01	$\bar{\alpha}$	-36	-38	-36
	α_{\max}	-19	-20,5	-18
	$\delta(\alpha)$	20,5	37	32
0,02	$\bar{\alpha}$	-33,4	-34,5	-33,6
	α_{\max}	-17	-18	-17,2
	$\delta(\alpha)$	23	40	31
0,05	$\bar{\alpha}$	-29	-28,5	-30
	α_{\max}	-16	-12	-12,5
	$\delta(\alpha)$	26	40	34,5

Таблица 2
Параметры АЧХ фильтра при наличии погрешностей длины электродов ВШП

P_e	Параметры	Значение параметров, дБ		
		$L=0$	$L=1$	$L=2$
0,5	$\bar{\alpha}$	-39	-40	-39
	α_{\max}	-37,6	-38,3	-36,7
	$\delta(\alpha)$	4	4	5
1	$\bar{\alpha}$	-39	-40	-39,2
	α_{\max}	-36,3	-36,7	-34,8
	$\delta(\alpha)$	7,8	8,2	10,2
5	$\bar{\alpha}$	-37,2	-37,7	-37,7
	α_{\max}	-30	-29,1	-28
	$\delta(\alpha)$	39,7	26	26,5

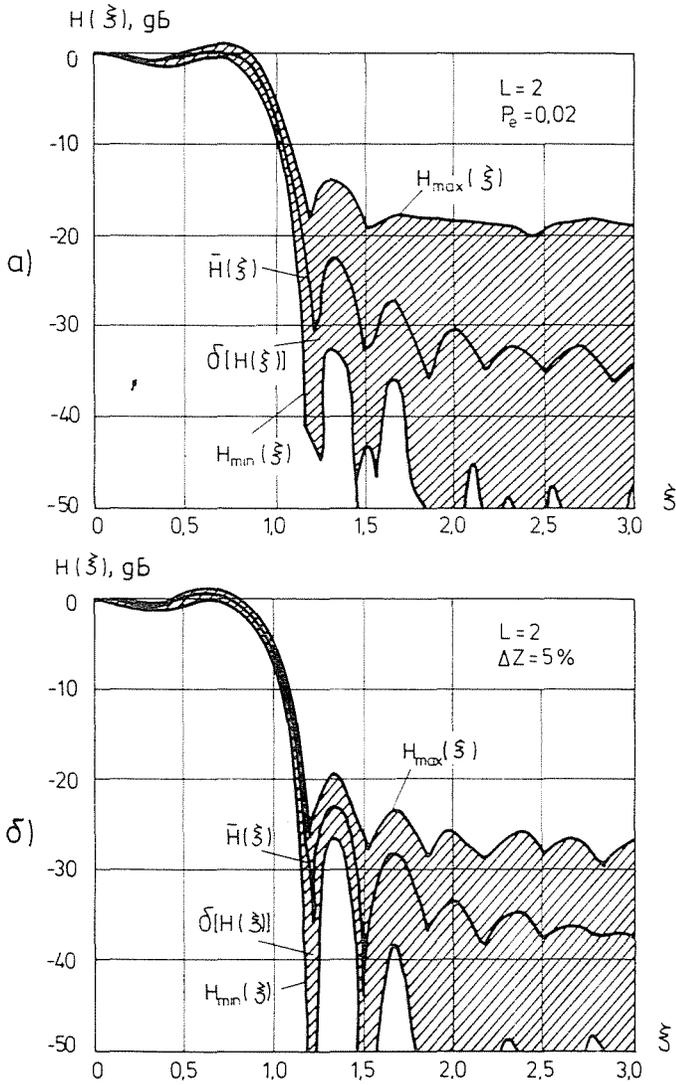


Рис. 1. АЧХ фильтров на ПАВ в случае прямоугольного "окна" при наличии обрывов электродов (а) и погрешностей длины (б)

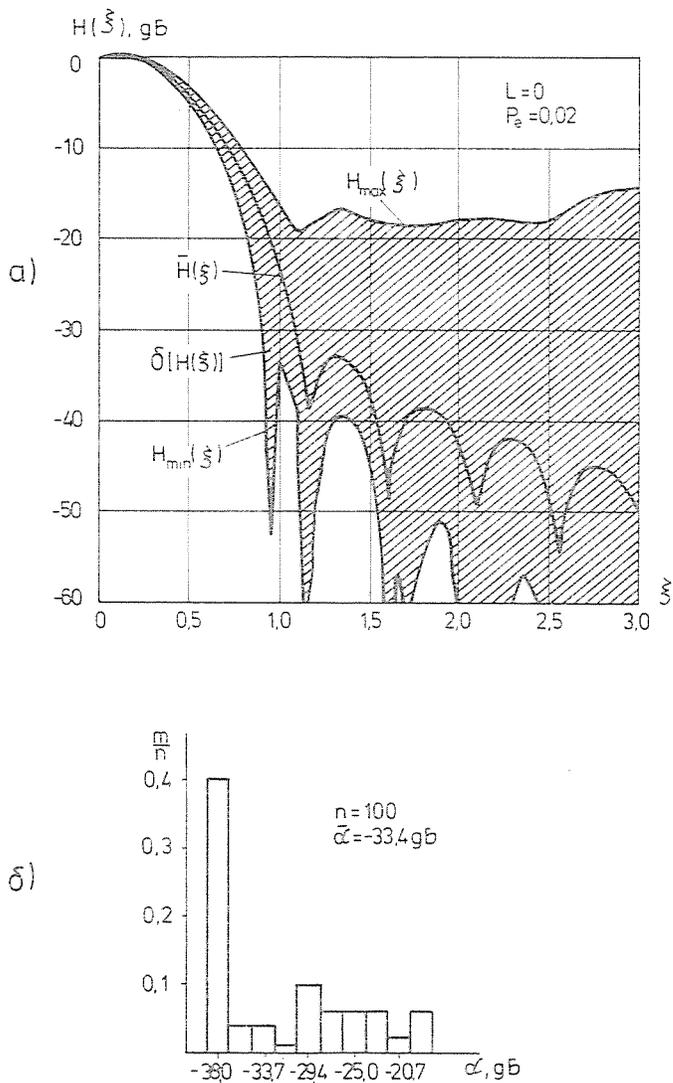


Рис. 2. АЧХ (а) и гистограмма распределения уровня боковых лепестков (б) в случае обрывов электродов и $L=0$

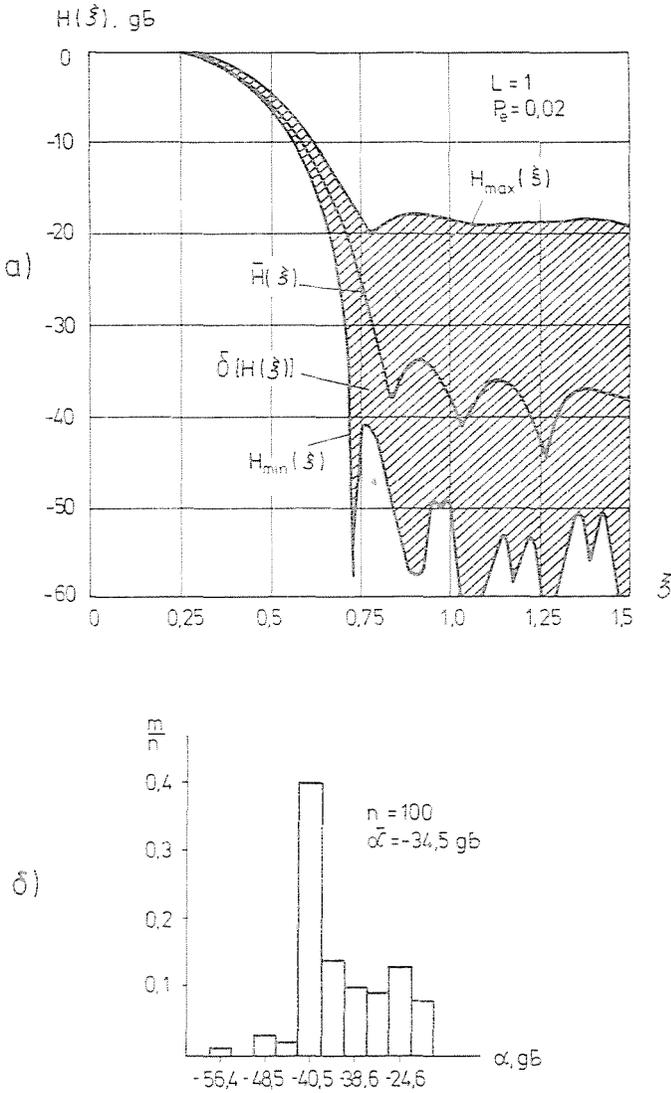


Рис. 3. АЧХ (а) и гистограмма распределения уровня боковых лепестков (б) в случае обрывов электродов и $L=1$

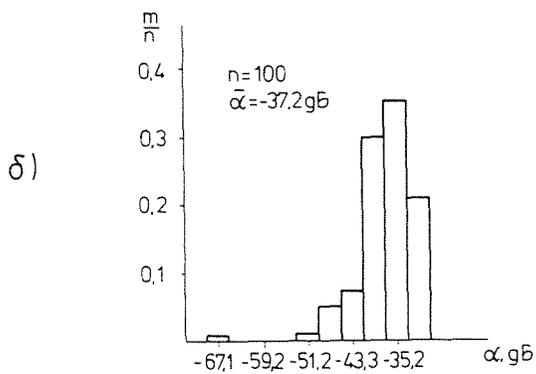
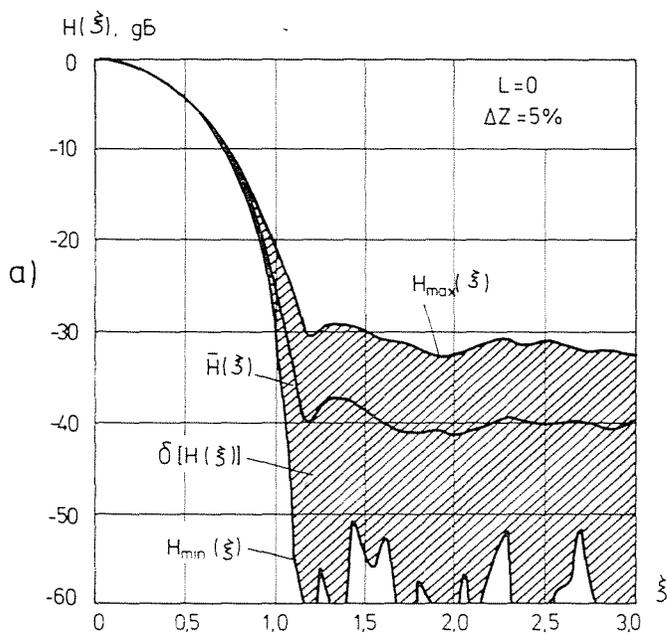


Рис. 4. АЧХ (а) и гистограмма распределения уровня боковых лепестков (б) в случае погрешностей длины электродов и $L=0$

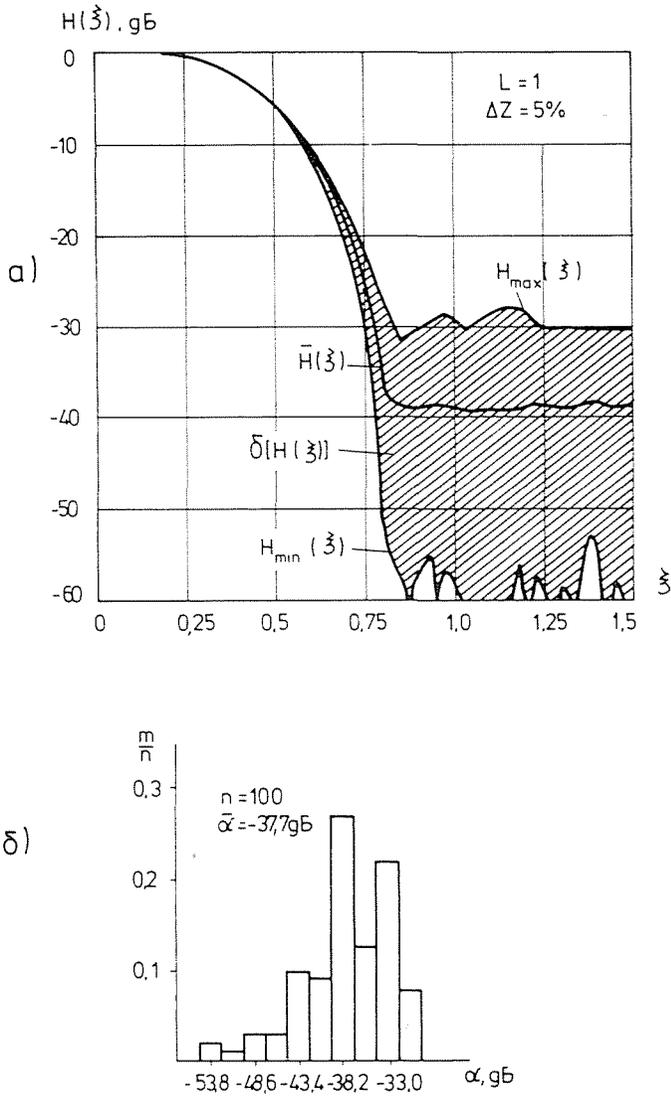


Рис. 5. АЧХ (а) и гистограмма распределения уровня боковых лепестков (б) в случае погрешностей длины электродов и $L=1$

Обсуждение результатов, выводы

Появление дефектов и погрешностей геометрических размеров в топологии фильтров связано с изменением частотных характеристик. При этом появляется разброс уровня боковых лепестков, неравномерности затухания в полосе пропускания фильтра и коэффициента прямоугольности АЧХ.

Увеличение вероятности обрыва электрода и погрешности длины вызывает повышение уровня боковых лепестков. В случае обрывов электродов это составляет 2—11,5 дБ, в случае погрешностей длины электродов — около 3 дБ. При этом значительно расширяется поле допуска (таблица 1, 2). На основе полученных законов распределения уровня боковых лепестков определен процент брака фильтров по данному параметру. При вероятностях обрыва 0,01 и 0,02 брак составляет 10% и 24% соответственно при допустимом уровне боковых лепестков не выше — 30 дБ.

Предложенный метод исследования погрешностей АЧХ фильтров на ПАВ позволяет решить ряд важных проблем, связанных с серийным производством фильтров. Он позволяет определить относительное количество бракованных фильтров по заданному параметру, найти необходимый запас расчетных параметров АЧХ для обеспечения заданного количества годных изделий. Также имеется возможность определить наиболее критические места ВШП, в которых появляющиеся дефекты и погрешности значительно ухудшают параметры фильтров.

Благодарность

Авторы выражают глубокую признательность доктору З. Барату за полезные советы при обсуждении работы и всестороннюю поддержку при подготовке ее к печати.

Резюме

Технологические погрешности геометрических размеров и дефекты топологии встречно-штыревых преобразователей поверхностных акустических волн вызывают разброс частотных характеристик фильтров. В работе приведена методика моделирования погрешностей на основе метода Монте-Карло, что позволило рассчитать статистические характеристики параметров фильтров, полезные при серийном их производстве.

Литература

1. Нявяраўская, А. В.—Рупкус, С. С.—Эйдукас, Д. Ю.: Характеристики акустоэлектронных фильтров. — Тезисы республиканской конференции Литовской ССР “Автоматизация и механизация производственных процессов и управления”, сер. Радиоэлектроника, Вильнюс, 1980, с. 99—138.
2. Танкрилл, Р., Холланд, М.: Фильтры на поверхностных акустических волнах. — ТИИЭР, 1971, т. 59, №2, с. 62—80.
3. Маркявичюс, В. П.—Нявяраўская, А. В.—Рупкус, С. С.: Исследование погрешностей АЧХ фильтров на ПАВ методом статистического моделирования. — Материалы XI Всесоюзной конференции по акустоэлектронике и квантовой акустике, Душанбе, 1981, с. 152—153.

К. т. н., доц. С. С. Рупкус
Асп. В. П. Маркявичюс

}

СССР, Литовская ССР, г.
Каунас, 233028, ул. В. Юро, 50