

# АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

С. С. РУПКУС\*, В. П. МАРКЯВИЧЮС, А. В. НЯВЯРАУСКАС

кафедра конструирования радиоаппаратуры Каунасского политехнического института им.  
Антанаса Снечкуса, г. Каунас, 233028, ул. В. Юро, 50

Поступило 15. августа 1982 г.

Представлено доц. З. БАРАТ

## Summary

A general formulation based on Monte Carlo method for defects in electrode pattern of surface acoustic wave (SAW) transducer is derived and a method is given to determine the scattering of transfer functions of SAW filters due to technological defects. These defects mostly affect the forms and the maximum values of the side lobes in the stop band of the transfer functions. Computed results are also presented.

## Введение

Фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) находят широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре нового поколения и являются основными приборами для селективных цепей. При изготовлении фильтров применяется технология микроэлектроники. Многие технологические операции оказывают влияние на точность воспроизведения топологического рисунка встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Это приводит к появлению разбросов частотных характеристик фильтра.

Анализ погрешностей характеристик фильтров на ПАВ наиболее удобно провести методом Монте-Карло еще на этапе проектирования [1—3]. В указанных работах с его помощью исследовано влияние погрешностей периода, обрывов, погрешностей длины электродов.

Однако при изготовлении фильтров могут появиться и другие погрешности топологического рисунка ВШП. Ввиду отсутствия обобщенной теории анализа погрешностей параметров акустоэлектронных фильтров, целью настоящей работы является создание методики моделирования всевозможных видов погрешностей в топологии ВШП и

\* в настоящее время в Институте Связи и Электроники Будапештского Технического Университета

исследование их влияния на характеристики фильтров. Как и в работе [3] используем модель дельта-источников. Согласно данной модели амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра равна

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

где  $k$  — порядковый номер дельта-источника,  $N$  — количество электродов в ВШП,  $A(k)$  — амплитуды дельта-источников,  $f_0$  — частота акустического синхронизма.

Для апализа погрешностей АЧХ согласно выражения (1) необходимо в первую очередь разработать обобщенную методику моделирования обрывов, погрешностей длины, периода пасположения и ширины электродов. Настоящая работа является продолжением работы [3].

### Моделирование геометрических погрешностей в топологии ВШП

При появлении погрешностей в топологии ВШП изменяются координаты конца электрода  $z(n)$  [3], ширина электрода  $\Delta x(n)$ , координаты его центра  $x(n)$  и амплитуды дельта-источников  $A(k)$ . С учетом погрешностей эти параметры обозначим через  $z^*(n)$ ,  $\Delta x^*(n)$ ,  $x^*(n)$ ,  $A^*(k)$  соответственно.

В общем случае погрешность геометрического параметра топологии ВШП  $\Delta y(n)$  может быть выражена как

$$\Delta y(n) = \Delta y_M(n) + \Delta y_c(n), \quad (2)$$

где  $\Delta y_M(n)$  и  $\Delta y_c(n)$  — систематическая и случайная составляющие погрешности.

Погрешность  $\Delta y(n)$  может зависеть от координаты и номера электрода. Важно рассмотреть следующие возможные зависимости составляющих погрешности:

— систематическая составляющая не зависит от координаты и геометрических параметров топологии  $y$  или имеет линейную зависимость,

— функция плотности распределения случайной составляющей погрешности  $\Phi[\Delta y_c(n)]$  не зависит от координат электродов, а ее параметры постоянны,

— среднеквадратическое отклонение случайной погрешности  $S(n)$  связана с геометрическим параметром топологии  $y$  линейной зависимостью.

Это может быть представлено в аналитическом виде как

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta y_M(n) = a = \text{const} \\ \Delta y_M(n) = ay + b \\ \Phi[\Delta y_c(n)] = \Phi(\Delta y_c) = \text{const} \\ S(n) = cy + d \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $a, b, c, d$  — коэффициенты.

В расчетах будем считать, что функция плотности распределения случайной погрешности известна (задача теоретически или описана эмпирически). В таком случае можно воспользоваться следующей методикой моделирования. На ЭВМ формируется случайное число  $\psi(n)$  с равномерным законом распределения в интервале  $(0, 1)$ . На основе выражения

$$\psi(n) = \int_{-\infty}^{\Delta y_c(n)} \Phi[u(n)] du \quad (4)$$

определяется случайная погрешность  $\Delta y_c(n)$ , подчиняющаяся заданному закону распределения.

Реальное значение геометрического параметра топологии определяется как

$$y^*(n) = y(n) + \Delta y(n), \quad (5)$$

где  $y(n)$  — расчетное значение параметра.

### Влияние погрешностей периода расположения электродов на АЧХ фильтра

Появление погрешностей периода расположения электродов ВШП  $\Delta x'(n)$  вызывает изменение емкостей между ними и амплитуд дельта-источников.

Погонная емкость между парой электродов ВШП согласно [4] равна

$$C_{02} = \varepsilon_{\text{эф}} \frac{K(m)}{K(m')}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\text{эф}}$  — эффективная диэлектрическая проницаемость,  $K(m), K(m')$  — полные эллиптические интегралы первого рода от аргументов  $m$  и  $m'$  соответственно.

При параллельном питании электродов ВШП амплитуды дельта-источников пропорциональны зарядам на них

$$A^*(k) = \beta \Delta z C_{02}(n), \quad (7)$$

где  $\beta$  — коэффициент,  $\Delta z$  — перекрытие пары электродов.

На основе выражений (6), (7) получаем

$$A^*(k) = A(k) \frac{K(m)}{K(m')}, \quad (8)$$

где  $A(k) = \beta \varepsilon_{\text{эф}} \Delta z$  — амплитуды дельта-источников при отсутствии погрешностей.

Координаты дельта-источников  $x_k^*(n)$  связаны с координатами электродов  $x^*(n)$  следующим образом

$$\begin{cases} x_k^*(n) = x^*(n) + \frac{\lambda_0}{8}, \\ x_{k-1}^*(n) = x^*(n) - \frac{\lambda_0}{8}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\lambda_0$  — длина волны на частоте акустического синхронизма.

На основе выражений (9) может быть получена нормированная координата дельта-источника

$$k_c^* = 2n_c^* - 1, \quad (10)$$

где  $n_c^*$  — нормированная координата центра электрода.

Дальнейший расчет проводится по выражению (1), в которое подставляются необходимые величины.

### Влияние погрешностей ширины электродов на АЧХ фильтра

При изготовлении акустоэлектронного фильтра координаты краев электродов ВШП  $x_k^*(n)$ ,  $x_{k-1}^*(n)$ , описываемые выражениями (9), могут быть расположены несимметрично относительно расчетной координаты центра электрода. Это можно рассматривать как смещение координаты центра электрода и одновременно как отклонение ширины электрода на величину  $\Delta x''(n)$ . Тогда реальные координаты краев электродов могут быть описаны следующим образом

$$\begin{cases} x_k^*(n) = x_k(n) + \frac{\Delta x''(n)}{2} \\ x_{k-1}^*(n) = x_{k-1}(n) - \frac{\Delta x''(n)}{2}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $x_k(n)$ ,  $x_{k-1}(n)$  — расчетные координаты краев электродов.

При появлении погрешностей ширины электродов изменяется емкость и амплитуды дельта-источников, расчет которых следует провести согласно выражений (6)—(8).

Для расчета АЧХ по выражению (1) более удобно использовать нормированные координаты дельта-источников, которые могут быть получены из выражений (11)

$$\begin{aligned} k_a^* &= 2\left(n - \frac{\Delta n_a}{2}\right) - 1 \\ k_{a-1}^* &= 2\left(n - \frac{\Delta n_a}{2}\right) - 2, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\Delta n_a$  — нормированная погрешность ширины электрода.

### Результаты численного исследования

На ЭВМ проведено моделирование в введении перечисленных видов погрешностей топологии ВШП. В расчетах принято, что фильтр имеет относительную полосу пропускания 10% и построен с использованием «окна» Римана.

Исследована чувствительность к технологическим погрешностям ВШП разной длины, имеющие 41, 81, 121 электрод, что соответствует 1, 2, 3 лепесткам функции аподизации ( $L = 1, 2, 3$ ). Для каждой конфигурации фильтра проведен расчет с числом реализаций 100. В итоге моделирования получены следующие значения АЧХ: минимальное  $H_{\min}(\zeta)$ , максимальное  $H_{\max}(\zeta)$ , среднее  $\bar{H}(\zeta)$ , а также отдельные параметры АЧХ и гистограммы их распределения. В качестве частоты принята нормированная частота  $\zeta = (f - f_0)/\Delta f$ , где  $\Delta f$  — ширина полосы пропускания.

Моделирование обрывов электродов проведено по методике, изложенной в работе [3]. Для количественной оценки дефектов оспользована вероятность обрыва электрода  $P_e$ .

При моделировании погрешностей длины, периода расположения и ширины электродов принято, что систематическая составляющая пог-

решности отсутствует, а случайная составляющая подчиняется нормальному закону распределения с заданными значениями среднеквадратического отклонения и гарантированной вероятностью 0,9973.

Более детально исследовано влияние погрешностей топологии на следующие параметры полосового фильтра на ПАВ: уровень боковых лепестков АЧХ  $\alpha_{\max}$ , неравномерность затухания в полосе пропускания  $\Delta H_{\max}$ , среднее значение полосы пропускания фильтра  $\Delta \bar{\xi}$ . Результаты расчетов представлены на рис. 1—3.

### Обсуждение результатов, выводы

Разработанная обобщенная теория анализа погрешностей параметров акустоэлектронных фильтров, основанная на методе Монте-Карло, позволяет провести исследование технологических погрешностей частотных характеристик фильтров на этапе проектирования. Из множества полученных результатов в настоящей работе представлены наиболее важные, в достаточной мере описывающие частотные свойства полосовых фильтров.

Как показали расчеты, перечисленные параметры фильтров ухудшаются под влиянием погрешностей топологии ВШП. Изменение

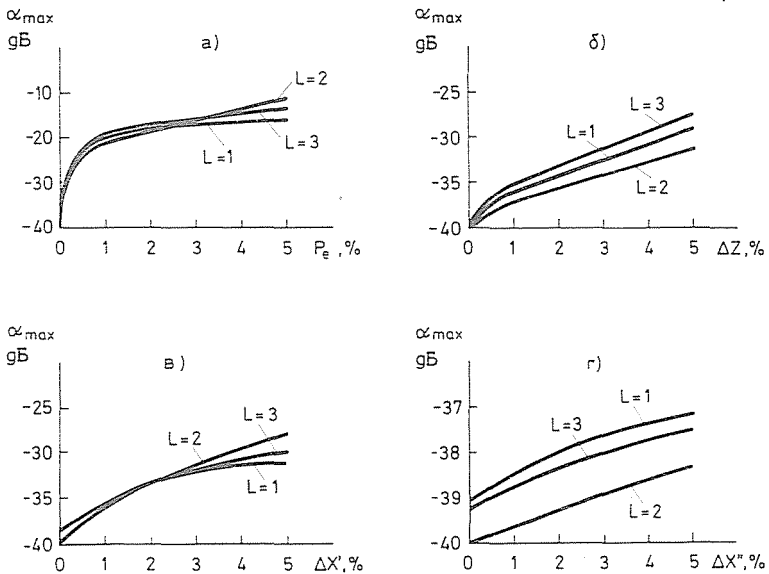


Рис. 1. Уровень боковых лепестков АЧХ фильтра в зависимости от погрешностей топологии: а — обрывов электродов, б — погрешностей длины, в — погрешностей периода, г — погрешностей ширины электродов

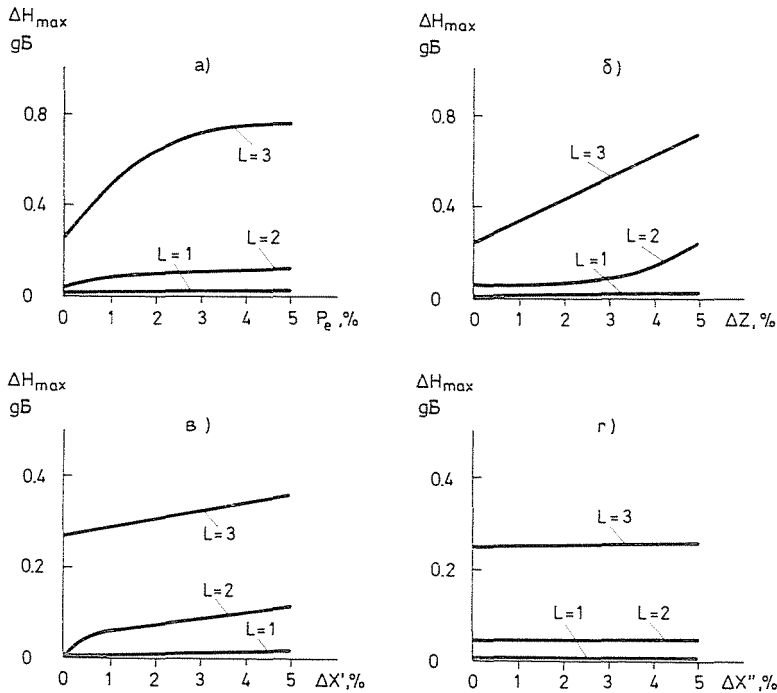


Рис. 2. Неравномерность затухания в полосе пропускания фильтра в зависимости от погрешностей топологии: а — обрывов электродов, б — погрешностей длины, в — погрешностей периода, г — погрешностей ширины электродов

вероятности обрыва электрода  $P_e$  в пределах 0—1% (рис. 1,а) приводит к резкому повышению уровня боковых лепестков АЧХ и слабо зависит от числа электродов в преобразователе. Дальнейшее увеличение вероятности  $P_e$  на уровень боковых лепестков влияет менее значительно. При появлении погрешностей длины, периода расположения и ширины электродов (рис. 1,б в, г)  $\alpha_{\max}$  увеличивается монотонно с увеличением погрешности. Наиболее важными технологическими погрешностями, в значительной мере влияющими на уровень боковых лепестков АЧХ, следует считать обрывы, погрешности длины и периода электродов.

Неравномерность затухания в полосе пропускания (рис. 2) в значительной степени зависит от обрывов и погрешностей длины электродов (рис. 2,а б). При этом имеется ярко выраженная зависимость  $\Delta H_{\max}$  от числа электродов в ВШП. Преобразователи с большим числом электродов ( $L=3$ ) более чувствительны к погрешностям.

Относительная полоса пропускания фильтра (рис. 3) слабо зависит от технологических погрешностей и дефектов топологии.

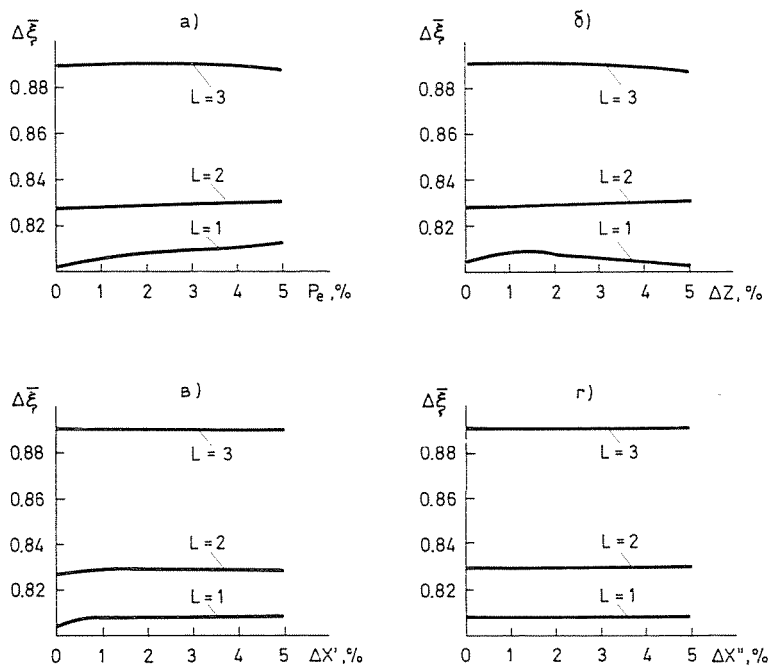


Рис. 3. Полоса пропускания фильтра в зависимости от погрешностей топологии: а — обрывов электродов, б — погрешностей длины, в — погрешностей периода, г — погрешностей ширины электродов

Следует отметить, что обрывы электродов, погрешности их длины и периода расположения являются наиболее существенными. При серийном производстве фильтров на ПАВ это может привести к появлению значительного количества бракованных изделий, особенно в отношении уровня боковых лепестков АЧХ. Приемлемый процент выхода годных фильтров возможно обеспечить, определив запас расчетных параметров на основе полученных гистограмм распределения.

### Благодарность

Авторы работы выражают глубокую признательность КАЛЬМА-НУ ЭЛЭКУ за помощь при проведении расчетов на ЭВМ.



## Резюме

В работе представлена обобщенная методика моделирования геометрических погрешностей в топологии преобразователя ПАВ на основе метода Монте-Карло. Это позволяет определить технологический разброс электрических характеристик фильтров на ПАВ. Наиболее существенное влияние погрешности топологии оказывают на уровень боковых лепестков АЧХ фильтра. Представлены результаты численных исследований.

## Литература

1. FIELD M. E.—CHEN C. L. On the fabrication tolerances of surface acoustic wave resonators, reflectors, and interdigital transducers. — 1976 Ultrasonics Symposium Proceedings, IEEE Cat. 76 CHI 120-5SU, p. 510-513.
2. Сучков С. Г.—Заславский А. М.—Лазерсон А. Г. Влияние технологических погрешностей на характеристики полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах. — Радиотехника и электроника, 1981, т.26. № 3, с. 463-469.
3. Рупкус С. С.—Маркявичюс В. П. Исследование погрешностей параметров фильтров на поверхностных акустических волнах. — Periodica Polytechnica, E. Eng. Vol. 26. No 3-4.
4. Каринский С. С. Устройства обработки сигналов на ультразвуковых поверхностных волнах. — М., Советское радио, 1975. — 176с.

К. т. н., доц. С. С. Рупкус

Асп. В. П. Маркявичюс

К. т. н., доц. А. В. Нявяраускас

СССР, Литовская ССР,

г. Каунас, 233028, ул.

В. Юро, 50