

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 1,2
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Воронеж 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

**Устройства функциональной
электроники в радиоэлектронных
системах и комплексах**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 1,2
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Воронеж 2022

УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5

Составитель А. И. Сукачев

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах: методические указания к выполнению лабораторных работ № 1, 2 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. И. Сукачев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 37 с.

В методических указаниях рассматриваются вопросы проектирования и исследования акустоэлектронного фильтра на ПАВ. Тематика лабораторной работы соответствует рабочей программе дисциплины «Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах».

Предназначены для студентов 4 курса специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле УФЭвРЭСиК_УМД_ЛР1,2.pdf.

Ил. 14. Табл. 5. Библиогр.: 8 назв.

**УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5**

Рецензент – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания к выполнению лабораторных работ составлены в соответствии с программой курса «Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Наибольшее развитие среди направлений функциональной электроники получила акустоэлектроника, что обусловлено возможностью практической реализации уже в настоящее время следующих ее свойств:

- обработка сигналов в реальном масштабе времени в частотном диапазоне от 5 МГц до 1 ГГц;
- высокая избирательная частотная селекция сигналов 45...55 дБ;
- кодирование и декодирование сложных широкополосных сигналов;
- сжатие сигналов (10^3);
- высокая стабильность генерации (10^{-6} ... 10^{-8});
- нелинейная обработка сигналов (свертка, корреляция);
- увеличение плотности информационных каналов в 5 раз;
- групповой метод обработки сложных сигналов (шумоподобный сигнал) и др.

Большую часть номенклатуры изделий акустоэлектроники составляют полосовые фильтры на ПАВ. Исследования по разработке этих устройств направлены на повышение рабочего диапазона частот и относительной полосы пропускания, уменьшение вносимых потерь.

В области высоких частот использование полосовых фильтров, как и других устройств на ПАВ, ограничено разрешающей способностью получения электродной структуры преобразователя и скоростью распространения акустических волн в материале подложки. В настоящее время с помощью фотолитографии можно изготовить акустоэлектронные изделия с рабочей частотой до 1 ГГц.

Основные параметры полосовых фильтров на ПАВ стандартизованы и приведены в табл.1.1 [2].

Таблица 1.1

Основные параметры фильтров на ПАВ

Наименование параметра	Значение параметра
Центральная частота, МГц	5...2500
Относительная ширина полосы пропускания, %	0,1...100
Вносимое затухание, дБ	1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 6,0; 8,0; 10,0; 14,0; 20,0; 25,0; 28,0; 30,0; 32,0; 34,0; 36,0; 44,0

Наименование параметра	Значение параметра
Неравномерность вносимого затухания в полосе пропускания, дБ	0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0
Уровень определения ширины полосы пропускания, дБ	1; 2; 3; 6
Относительное отклонение ширины полосы пропускания, %	$\pm(0,1; 0,3; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10,0)$
Гарантируемое затухание в полосе задерживания, дБ	13; 22; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80
Относительное отклонение средней частоты от номинального значения	$10^{-4} \dots 10^{-2}$
Коэффициент прямоугольности	1,1...3

Особое место по объемам применения среди полосовых фильтров занимают фильтры, предназначенные для использования в бытовой и народнохозяйственной телевизионной аппаратуре. Фильтры на ПАВ позволяют повысить ее надежность, улучшить массогабаритные характеристики, исключить моточные изделия в соответствующих блоках. Значительное число фильтров на ПАВ для использования в бытовой и народнохозяйственной аппаратуре стандартизовано [3].

Устройства акустоэлектроники, обладающие широким диапазоном рабочих частот, высокой избирательностью, линейностью фазовой характеристики, находят все более широкое применение в аппаратуре. В то же время они имеют ряд недостатков:

- большие уровни вносимых потерь;
- ограничения по частоте;
- наличие ложных откликов;
- сравнительно малые длительности времени задержки в линиях задержки;
- температурная нестабильность и др.

Дальнейшее повышение технического уровня устройств акустоэлектроники предполагает устранение (или сведение до минимума) этих недостатков.

Одним из путей решения данной проблемы является создание multifunctional устройств с интегрированными функциями, базирующимися на совместном использовании нескольких направлений функциональной электроники, в том числе и акустоэлектроники.

Создание таких технологически сложных устройств подразумевает использование новых, обладающих уникальными свойствами, но мало изученных в настоящее время материалов, а так же технологии и оборудования с субмикронным разрешением.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО ФИЛЬТРА НА ПАВ

1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – ознакомиться с устройством, принципом действия и основными расчетными соотношениями для фильтров на ПАВ, а также приобрести навыки их проектирования

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В качестве носителей информации в изделиях функциональной акустоэлектроники используются динамические неоднородности акустической природы в виде объемных или поверхностных волн.

В качестве континуальных сред в акустоэлектронике используются в основном пьезоэлектрики, пьезополупроводники и сложные среды из пьезоэлектрика и полупроводника. Основные требования к этим материалам заключаются в минимальном уровне потерь для прохождения динамических неоднородностей и максимальной температурной стабильности времени прохождения сигнала через среду. Остальные требования формируются конкретными условиями создания приборов и устройств акустоэлектроники.

Наиболее эффективно возбуждение динамических неоднородностей в виде акустической волны в пьезоэлектрике осуществляется с помощью вложенных друг в друга групп электродов. Такая система электродов получила название встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Другое название такой системы электродов - двухфазный преобразователь ПАВ. Две группы чередующихся электродов соединены шинами, которые, в свою очередь, подключены кисточнику напряжения (рис.1.1).

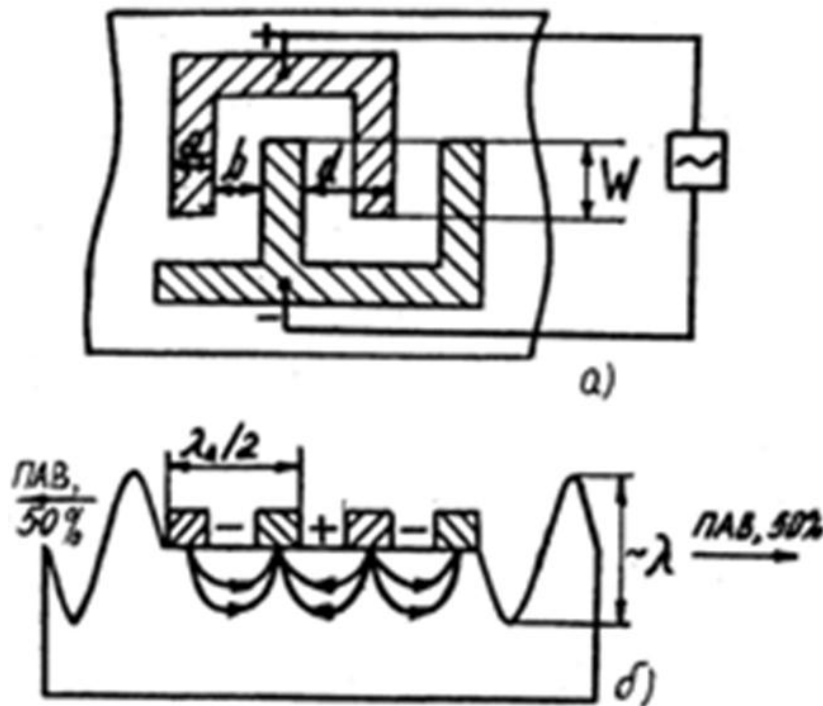


Рис. 1.1. Возбуждение ПАВ с помощью ВШП: а - топология ВШП; б - схема возникновения акустических волн

Если период преобразователя равен длине ПАВ, возникает явление акустического синхронизма. В этом случае волны, возбуждаемые каждой парой электродов, имеют одинаковую фазу и происходит когерентное сложение волн.

Суммирование происходит за счет локальных деформаций, образующихся под промежутками между электродами. Так, деформация, образовавшаяся под одним из промежутков, начинает перемещаться в противоположных направлениях и достигает следующих промежутков как раз в тот момент, когда полуволна внешнего напряжения достигнет максимума и вызовет деформацию под своими электродами. Для двухфазного преобразователя условие сложения деформации выглядит так:

$$\frac{\lambda_a}{2} = d = a + b = \frac{v_a}{f_0}, \quad (1.1)$$

где λ_a - длина акустической волны; v_a - скорость акустической волны; f_0 - частота акустической волны (центральная частота устройства); a , b , d - топологические параметры структуры преобразователя; обычно $a = b$, но это не обязательно. Толщина электродов h определяется технологией, и обычно $h \leq a$.

Большое значение имеет топологический параметр W или апертура, определяющая степень перекрытия ВШП. Обычно выбирают величину

$$W = (40 \dots 100) \lambda \quad (1.2)$$

Апертура определяет форму импульсного отклика ВШП.

Представленный на рис. 1.1 двухфазный преобразователь является двунаправленным и позволяет генерировать ПАВ в обе стороны. Есть и однонаправленные преобразователи, но они конструктивно сложнее. Эффективность генерации ПАВ определяется конструкцией ВШП, а также подбором материалов. Мерой эффективности взаимодействия ПАВ с ВШП является коэффициент электромеханической связи

$$k_m^2 = -\frac{2\Delta v_a}{v_a} \quad (1.3)$$

где $\frac{\Delta v_a}{v_a}$ - относительное изменение скорости волны, связанное с наличием и величиной пьезоэффекта в данном материале. Отрицательная величина свидетельствует о падении скорости. Коэффициент электромеханической связи является технологическим параметром и зависит от параметров материала звукопровода, направления распространения волны, связанной с ориентацией звукопровода относительно кристаллографических осей пьезоматериала.

Генерация ПАВ и их распространение осуществляется в ВШП и звукопровода, имеющих технологические и топологические параметры. Управление этими параметрами позволяет управлять динамическими неоднородностями

1.3. КОНСТРУКЦИЯ ФИЛЬТРА НА ПАВ

На рис.1.2. приведена широко распространенная конструкция полосового фильтра на ПАВ.

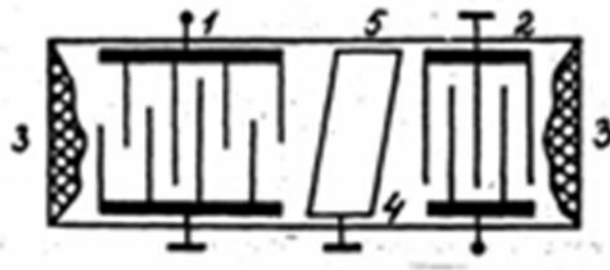


Рис. 1.2. Базовая конструкция фильтра на ПАВ: 1 - входной ВШП; 2 - выходной ВШП; 3 - поглотитель ПАВ; 4 - пьезоэлектрический звукопровод; 5 - электростатический экран

Фильтр состоит из пьезоэлектрической подложки и двух преобразователей. Заземленный электрод служит для уменьшения прямой электромагнитной наводки. В качестве преобразователей обычно используются наиболее эффективные встречно-штыревые системы электродов. Недостатком ВШП является то, что возбуждаемые ими поверхностные волны распространяются в обе стороны, что приводит к увеличению потерь и искажению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра. Для

устранения волн, распространяющихся в нежелательном направлении, служат поглотители, располагаемые на концах пьезоэлектрической подложки.

АЧХ фильтра полностью определяется характеристиками преобразователей, так как пьезоэлектрическая подложка частотно-зависимыми свойствами обычно не обладает. АЧХ ВШП однозначно связано с числом, расположением и взаимным перекрытием излучающих электродов. Изменяя топологию преобразователей, можно формировать разнообразные АЧХ. Изменение степени перекрытия электродов преобразователя называется аподизацией; ВШП с одинаковым расстоянием между штырями - эквидистантными, с неодинаковым расстоянием - неэквидистантными преобразователями. На рис. 1.3 показаны возможности управления импульсным откликом фильтра с помощью изменения топологии ВШП.

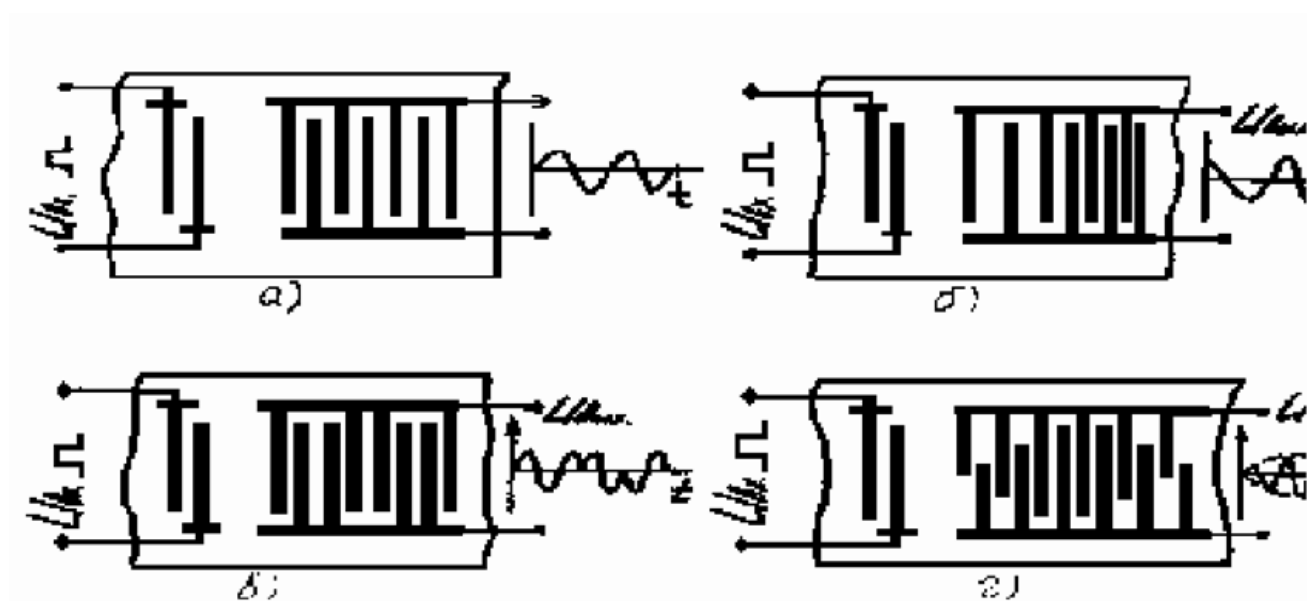


Рис. 1.3. Управление генерацией импульсов топологией ВШП:
а - эквидистантный, неаподизованный; б, в,- неэквидистантный, аподизованный; г - эквидистантный, аподизованный по закону $(\sin x)/x$

1.4. ИМПУЛЬСНАЯ ИЛИ ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Анализ импульсной характеристики фильтра обычно начинается с анализа характеристик преобразователей. Для этого можно использовать ряд методов, наиболее простым из которых является метод δ - источников. Основная идея этого метода заключается в том, что истинное электроупругое поле системы электродов преобразователя заменяется полем элементарных независимых точечных источников, излучающих только ПАВ. Каждому источнику приписывается амплитуда, пропорциональная длине области перекрытия электродов, со знаком + или - в зависимости от направления электрического поля. Подадим на входной ВШИ δ - импульс электрического напряжения. В обе стороны от преобразователя будут распространяться поверхностные

возмущения в виде плоских волн, порождаемых источниками, амплитуда которых будет отражать геометрическую структуру входного преобразователя. Волна на выходе ВШП (импульсный отклик преобразователя) является суперпозицией плоских волн, созданных каждым источником и следуемых с задержкой, пропорциональной координате источника. При сделанных предположениях импульсную характеристику преобразователя можно представить в виде суммы (1.4):

$$h_1(t) = \sum_{n=1}^{N_1} (-1)^n A_{1n} \delta\left(t - \frac{x_n}{v}\right), \quad (1.4)$$

где N_1 , A_{1n} - число и амплитуда источников соответственно; x_n - координаты источников; v -скорость ПАВ; $(-1)^n$ – коэффициент смены знака электрического поля между электродами; t - время.

Соотношение между временем выборки t_n и положением электрода x_n имеет вид:

$$x_n = vt_n \quad (1.5)$$

В модели δ - источников точки x_n соответствуют середине n электрода (для подложек из пьезоэлектриков с большим коэффициентом электромеханической связи) или середине зазора между n и $(n+1)$ электродами для подложки из слабых пьезоэлектриков.

Импульсная характеристика выходного преобразователя имеет аналогичный вид. При прохождении возмущения от входного преобразователя под точками максимального возбуждения ПАВ в выходном преобразователе наводится электрический заряд. Импульсная характеристика фильтра определяется сверткой импульсных характеристик входного и выходного ВШП.

$$h(t) = \sum_n \sum_m (-1)^{n+m} A_n A_m \delta(t - t_n + t_m) \quad (1.6)$$

Выполняя преобразование Фурье от этого выражения, получим выражение для АЧХ фильтра

$$\dot{K}(\omega) = \sum_n \sum_m (-1)^{n+m} A_n A_m e^{j\omega(t_m - t_n)} \quad (1.7)$$

или в виде

$$\dot{K}(\omega) = \sum_n (-1)^n A_n e^{-j\omega t_n} \sum_m (-1)^m A_m e^{j\omega t_m} = \dot{K}_1(\omega) \cdot \dot{K}_2(\omega), \quad (1.8)$$

которое представляет собой произведение частотных характеристик входного и выходного ВШП. Если выходной преобразователь широкополосный (содержит малое число электродов), то

$$\dot{K}(\omega) = \sum_n (-1)^n A_n e^{-j\omega t_n}, \quad (1.9)$$

следовательно, АЧХ акустоэлектронного фильтра находится прямым Фурье-преобразованием функции аподизации электродов $A(x_n)$. В частности, для неаподизованного входного преобразователя, состоящего из N электродов,

$$A_n = A_0 = \text{const}; t_n = n(2f_0)^{-1}; (-1)^n = e^{j\pi n}.$$

Выражение в правой части для АЧХ является геометрической прогрессией, и сумма может быть легко вычислена:

$$K(f) = A_0 N \frac{\sin \left[\pi N (f - f_0) (2f_0)^{-1} \right]}{\pi N (f - f_0) (2f_0)^{-1}} \sim \frac{\sin x}{x} \quad (1.10)$$

Первые нули АЧХ соответствуют частотам

$$f_{1,2} = f_0 \pm \frac{f_0}{N},$$

а относительная ширина полосы пропускания

$$\Delta f = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{2}{N}, \quad (1.11)$$

то есть обратно пропорциональна числу электродов.

1.5. СИНТЕЗ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Как уже говорилось, форма импульсного отклика идеального полосового фильтра (рис. 1.4, а) описывается бесконечной во времени функцией типа $(\sin x)/x$ (рис. 1.4, б). Для определения положения δ -источников $x_n = vt_n$ произведем выборки $h(t)$ в такие моменты времени t_n , чтобы $2\pi f_0 t_n = \pi n$ ($t_n = n/2f_0$).

Тогда $(-1)^n = e^{j2\pi f_0 t_n}$. Следовательно, чтобы реализовать идеальную АЧХ с помощью фильтра на ПАВ, необходимо иметь преобразователь с бесконечным числом электродов, длина перекрытия которых пропорциональна $h(t_n)$ (рис. 1.4, в). Если ограничить слева и справа импульсную характеристику некоторым выбранным значением времени T , то АЧХ фильтра имеет вид, показанный на рис. 1.4, г.

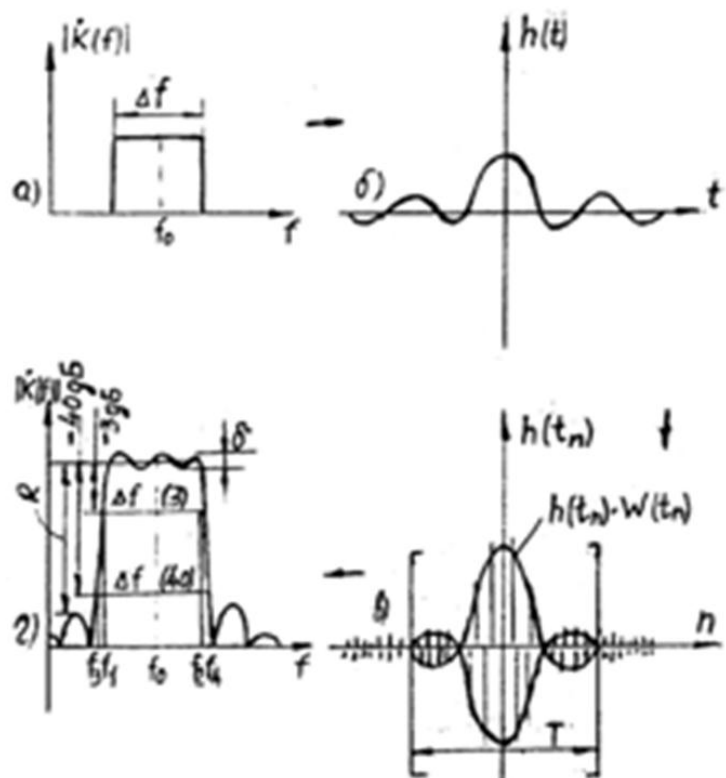


Рис. 1.4. Частотная и импульсная характеристики идеального и реального полосовых фильтров

На практике обычно не задают точный вид АЧХ, а требуют, чтобы в полосе пропускания от f_1 до f_2 коэффициент передачи был достаточно близок к единице, ширина переходной области между полосой пропускания и областью задерживания была меньше заданной и вне полосы пропускания коэффициент передачи был достаточно близок к нулю или в заданное число раз меньше, чем в середине полосы пропускания.

У реального фильтра полосу пропускания определяют обычно по некоторому условному уровню. Например, на рис. 1.4, г частоты f_1 и f_2 определяют полосу пропускания по уровню - 3 дБ от пропускания вблизи центральной частоты f_0 . Область задерживания также определяют по условному уровню, например, по уровню ослабления сигнала на 40 дБ по сравнению с ослаблением на частоте f_0 . Данному уровню соответствуют частоты f_3 и f_4 , так что при $f < f_3$ и $f > f_4$ расположена область задерживания. Ширину переходных участков $[f_3, f_1]$ и $[f_2, f_4]$ задают коэффициентом прямоугольности (например, по уровням - 3 и -40 дБ):

$$k_{\pi}(3/40) = \frac{f_4 - f_3}{f_2 - f_1} \quad (1.12)$$

Отклонение коэффициента передачи в полосе пропускания от максимального значения характеризуют параметром - неравномерностью в полосе пропускания, выраженной в децибелах. Вне полосы пропускания коэффициент передачи характеризуют величиной R -уровнем боковых

лепестков, то есть максимальным значением отношения $|K(f)|/K(f_0)$ в области задерживания, часто выражаемым в децибелах.

Такое определение частотной характеристики не приводит однозначно к импульсной характеристике фильтра, но позволяет подбирать приемлемую конечную импульсную характеристику исходя из известных δ , k_n и R .

Рассмотрим вопрос о количестве электродов в преобразователе. Предположим, что АЧХ должна иметь прямоугольную форму (рис. 1.5, а).

Преобразование Фурье $K(f)$ представляет функцию $\sin t/t$, которая во времени не ограничена (рис. 1.5, б). Естественно, что преобразователь с бесконечным числом электродов изготовить нельзя. Однако если $h(t) \sim \sin t/t$ ограничить во времени (рис. 1.5, в), то это приведет к искажению $K(f)$ (рис. 1.5, г). Ограничение $h(t)$ во времени эквивалентно умножению бесконечного отклика на функцию окна $W(t)$ (рис. 1.5, д, е). Перемножение во временной области $h(t)$ и $W(t)$ эквивалентно операции свертки $K(f)$ и $W(f)$ в частотной области. Результатом и является АЧХ (рис. 1.5, г).

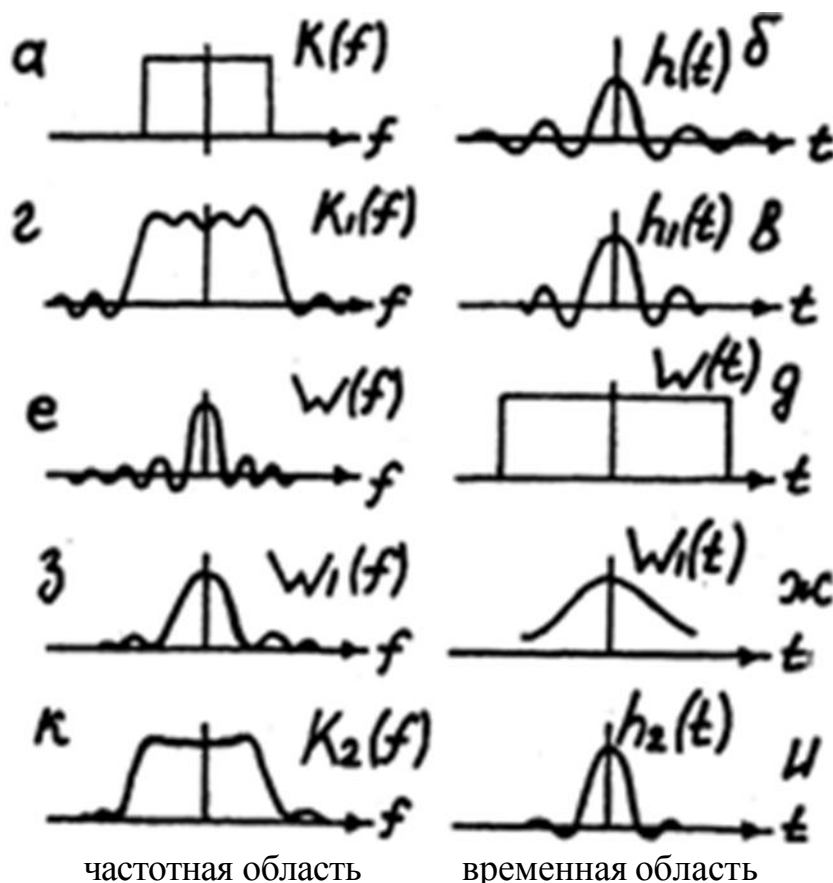


Рис. 1.5. Расчет преобразователя ПАВ методом преобразования Фурье и ограничения импульсного отклика

$K_1(f)$ имеет осциллирующий характер и крутизна склонов у нее меньше, чем у $K(f)$. На практике неравномерность АЧХ нежелательна. Простым увеличением числа боковых лепестков можно улучшить коэффициент

прямоугольности АЧХ, но ее изрезанность δ и уровень боковых лепестков R существенно не улучшаются (табл. 1.2).

Число электродов в преобразователе, импульсная характеристика которого содержит l боковых лепестков, определяется из выражения

$$N_{\text{общ}} = 2N + 1 = 2 \cdot 2f_0 T + 1 = 4 \frac{f_0}{\Delta f} (1 + l) + 1 \quad (1.13)$$

Таблица 1.2

Зависимость параметров АЧХ от числа боковых лепестков

1	1	2	3	4	5	6	7	8
k_{Π}	1,75	1,49	1,3	1,25	1,19	1,14	1,13	1,11
$\delta\%$	19,2	16	15,8	15,2	14,5	14,2	14,0	12,8
$R\%$	7,7	7,2	7,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0

Можно выбрать более гладкую функцию окна (рис. 1.5, ж, з). В результате функция свертки $K_2(f)$ (рис.1.5,к) имеет меньше осцилляций на вершине; меньше уровень боковых лепестков, но зато больше ширина переходной области по сравнению с прямоугольной $W(t)$. Действие различных $W(t)$ на параметры АЧХ разные, поэтому вид $W(t)$ определяется конкретным техническим заданием на фильтр. Исследовано большое число оконных весовых функций (функций аподизации): Хемминга (уровень подавления боковых лепестков $R = -42,8$ дБ); Чебышева ($R = -42,8$ дБ); Кайзера ($R = -54,2$ дБ) и другие, а также комбинация функций у входного и выходного преобразователей.

Аналитическое выражение для функции Хемминга имеет вид

$$W_x(t) = k + (1 - k) \cos^m(\pi t / 2T), \quad (1.14)$$

где $2T$ - полная длительность импульсного отклика; k и m - параметры функции; в общем случае они могут быть различными, однако чаще всего берут $k = 0,08$ и $m = 2$ (рис.1.6).

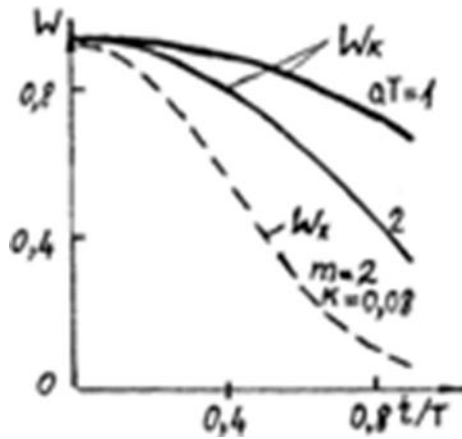


Рис. 1.6. Функции аподизации Хемминга и Кайзера

Веса отсчетов импульсного отклика

$$A_n = (-1)^n \left[k + (1-k) \cos^2(\pi n / 4f_0 T) \right], \quad (1.15)$$

где

$$-N_{\max} \leq n \leq N_{\max}; N_{\max} = 2f_0 T. \quad (1.16)$$

АЧХ такого фильтр

$$|K(f)| = \frac{1+k}{2} \cdot \frac{\sin 2\pi f T}{\pi f} + \frac{1-k}{4} \left[\frac{\sin 2\pi T(f - 1/2T)}{\pi(f - 1/2T)} + \frac{\sin 2\pi T(f + 1/2T)}{\pi(f + 1/2T)} \right]. \quad (1.17)$$

Функцию аподизации Кайзера определяют соотношениями:

$$W_K(t) = \begin{cases} J_0(a \sqrt{T^2 - t^2}) / J_0(aT), & \text{при } |t| \leq T \\ 0, & \text{при } |t| > T \end{cases} \quad (1.18)$$

где $J_0(x)$ - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка (приложение 1); а T - параметр функции, определяющий полосу пропускания; можно принять $aT = 1,0$ или $aT = 2,0$ (рис.1.6).

Для отсчётов импульсной характеристики получаем:

$$A_n = \begin{cases} \frac{(-1)^n \sin(\pi \Delta f n / 2f_0)}{\pi \Delta f n / 2f_0} \cdot \frac{J_0[aT \sqrt{1 - (n/2f_0 T)^2}]}{J_0(aT)}, & \text{при } |n| \geq N_{\max} \\ 0, & \text{при } |n| < N_{\max} \end{cases} \quad (1.19)$$

АЧХ такого фильтра

$$|K(f)| = \left| \sum_{n=-N}^N (-1)^n \cdot \frac{\sin(\pi \Delta f n / 2f_0)}{\pi \Delta f n / 2f_0} \cdot \frac{J_0[aT \sqrt{1 - (n/2f_0 T)^2}]}{J_0(aT)} \cdot e^{-j \frac{\pi f n}{f_0}} \right|. \quad (1.20)$$

Для других функций аподизации аналитические соотношения можно найти в [4, 7].

1.6. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ НА ПАВ

Основой любого устройства на ПАВ является пьезоэлектрик, в котором происходит возбуждение, детектирование и распространение поверхностных акустических волн. Поэтому свойства этих материалов определяют параметры устройств. Параметры наиболее часто используемых пьезоэлектриков приведены в табл. 1.3.

Скорость распространения ПАВ в пьезоэлектрике является основным параметром. Она определяет границу верхних частот, а также габариты устройства.

Для расширения высокочастотного диапазона устройств на ПАВ необходимы материалы с высокой скоростью распространения. Так, процессы фотолитографии позволяют создавать минимальные размеры элементов 1 мкм, то есть средняя частота устройства на ниобате лития составляет 872 МГц.

Для расширения низкочастотного диапазона необходимы материалы с малой скоростью распространения. Например, размеры подложки из кварца для фильтра промежуточной частоты УКВ ЧМ приёмников на 10,7 МГц составляют 40x15x2 мм, причем коэффициент прямоугольности этого фильтра по уровням 3 и 40 дБ не менее 3,5. Снижение коэффициента прямоугольности до 2,5 приводит к возрастанию размеров подложки до 70x15x2 мм. А размеры подложки из силиката висмута для того же фильтра составляет 20x8x0,5 мм, а из сульфида талия ванадия 11x4,5x0,5 мм. Объем подложки из этого материала меньше объема кварцевой подложки почти в 50 раз.

Следующий важный параметр материала - его пьезоэлектрические свойства, мерой которых является коэффициент электромеханической связи k^2 .

Чтобы потери в устройстве были минимальными, необходимо выполнить условие

$$\frac{\Delta f}{f} \leq \frac{2k}{\sqrt{\pi}} \quad (1.21)$$

Таблица 1.3

Параметры пьезоэлектрических материалов

Материал	Ориентация	Скорость ПАВ v_a , /с	Коэффициент электромеха- нической связи, K^2	Оптималь- ная полоса пропускания $\Delta f/f$, %	Коэффициенты поглощения ПАВ		Емкость пары элект- родов $C_{\text{поз}}$	Параметр анизотропии γ	ТКЗ, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	$\alpha_l \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
					α_m	β_m				
Кварц SiO_2	Y, X	3159	0,0023	5,3	0,45	2,15	50	+0,653	-24	14,8
	$Y+42^\circ, X$	3158	0,0016	4,6	0,47	2,62	50	+0,378	0	9
Ниобат ли- тия LiNbO_3	$Y+41,5^\circ$	4000	0,057	27	0,3	0,75	618	-0,45	72	14,4
	$X Y, Z$	3488	0,045	24	0,19	0,88	464	-1,08	94	15,9
Танталат лития LiTaO_3	Z, Y	3329	0,012	11	0,23	0,77	443	-1,24	69	22
	Y, Z	3230	0,0066	9,5	0,2	0,94	443	-0,21	35	16,1
Германат висмута $\text{Bi}_{12}\text{BeO}_{20}$	(111)	1708	0,017	15	0,19	1,45	404	+0,366	115	100
	[110] (001)	1681	0,015	14,5	0,19	1,45	404	-0,304	115	100
	[110]									

Таким образом, для получения широкополосных устройств на ПАВ требуются материалы с более высоким коэффициентом электромеханической связи и относительная полоса пропускания устройств для каждого пьезоэлектрика ограничена. Например, кварц ST-среза используется для устройств с полосой (0.3...2)%, LiTaO_3 - (4...10)%, LiNbO_3 – (10...23)%.

Для преобразователя с равномерной решеткой из N электродов, учитывая (1.11) и (1.21), можно сделать вывод, что для каждого пьезоэлектрического материала существует оптимальное число электродов

$$N_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\pi}{k^2}}, \quad (1.22)$$

при котором $(\Delta f / f_0)_{\text{max}} \approx k$.

Каждый материал имеет свой температурный коэффициент частоты

$$a_f = \frac{\Delta f}{f \Delta T}, \quad (1.23)$$

где ΔT разность температур эксплуатации.

Наибольшей температурной стабильностью из всех пьезоэлектриков обладает кварц, пьезоэлектрики с сильным пьезоэффектом значительно уступают ему по температурной стабильности.

Кроме этих параметров материалов при создании высокочастотных устройств на ПАВ необходимо учитывать затухание поверхностных волн при распространении.

В качестве материала для решетки ВШП в большинстве устройств на ПАВ используют алюминий, нанесенный в виде пленки методом термовакuumного испарения. Толщина пленки колеблется в пределах 0,08...0,3 мкм, в зависимости от рабочей частоты устройств. Для увеличения адгезии алюминия используется подслой ванадия толщиной 5...30 нм.

Для устранения отражений акустический поглотитель наносят на торцы звукопровода и на участки рабочей поверхности непосредственно за преобразователем. Толщина поглотителя обычно находится в пределах 0,1...0,8 мм. В качестве акустических поглотителей можно применять материалы на основе клея БФ-4, эпоксидных смол ЭД-5, К-411-02, ВМЛ-915, а также материалы на основе элементоорганических каучуков и их смесей. Наиболее технологичными из них и обладающими хорошими поглощающими свойствами являются кремний - органические компаунды на основе СКТ Н и К-18 и компаунды ВГО-1, КЛТ-30.

1.7. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

По заданию преподавателя (см. табл.1.4) спроектировать фильтр на ПАВ. Должна быть рассчитана топология входного и выходного преобразователей фильтра и его АЧХ.

Как правило, аподизованную решетку содержит один преобразователь, другой же является достаточно широкополосным, чтобы не искажать синтезируемую характеристику.

Отчет должен содержать соответствующие расчеты, вычерченную АЧХ, анализ полученной АЧХ и топологический чертеж фильтра.

1.8. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Проанализировав задание, выбрать пьезоэлектрический материал для звукопровода фильтра.
2. Проанализировав задание и табл. 1.2, определить, какое число боковых лепестков функции $\sin x / x$ нужно оставить, чтобы выполнить требования задания.
3. По формуле (1.13) определить число электродов N_1 полосозадающего (аподизованного) преобразователя. Число электродов другого преобразователя (широкополосного) N_2 выбирают небольшим. Из условия минимума потерь и оптимального преобразования можно выбрать $N_2 = N_{\text{опт}}$ (1.22).

Таблица 1.4

Варианты заданий на проектирование полосового фильтра на ПАВ

Вариант	Центральная частота f_0 , МГц	Полоса пропускания $\Delta f/f_0$, % на уровне 3 дБ	Коэффициент прямо-угольности k_n	Уровень подавления боковых лепестков R , дБ	Вносимые потери $B_{\text{вн}}$, дБ не более	Дополнительные требования
1	20	40	1,2	35	-12	Уменьшение габаритов
2	30	35	1,3	40	-14	
3	40	30	1,4	45	-16	
4	50	25	1,5	50	-18	
5	60	20	1,6	55	-20	
6	70	15	1,7	50	-22	Повышение стабильности
7	80	10	1,8	45	-24	
8	90	5,0	1,7	40	-22	
9	100	4,5	1,6	35	-20	
10	200	4,0	1,5	40	-18	
11	300	3,0	1,4	45	-16	Уменьшение потерь
12	400	2,5	1,3	50	-14	
13	500	2,0	1,2	55	-12	
14	600	1,5	1,3	50	-16	
15	700	1,0	1,4	45	-20	
16	800	0,5	1,5	40	-24	

Выбором числа электродов неаподизованного преобразователя можно получить дополнительное подавление боковых лепестков АЧХ. Максимальное подавление боковых лепестков достигается в случае совпадения нулей основных лепестков АЧХ входного и выходного преобразователей, для функции Хемминга, например, это происходит при соотношении чисел электродов $N_2 = N_1 / 2$.

4. По формулам (1.1) и (1.2) определить параметры топологической структуры преобразователей. Апертура W неаподизованного преобразователя будет максимальной апертурой для аподизованного преобразователя W_{1max} .

5. Выбрать функцию аподизации для полосозадающего преобразователя и ее параметры.

6. Рассчитать по соответствующим формулам (1.14 – 1.20) АЧХ фильтров веса отсчета импульсной характеристики.

7. Вычертить АЧХ, нанести соответствующие уровни (3 дБ, 40 дБ), определить полученные параметры сделать выводы. Δf , $k_{П}$, R , δ сравнить их с заданными, определить размеры звукопровода.

Длина звукопровода L получается в процессе расчета равной сумме длин двух преобразователей l_1 , l_2 , расстояния между ними l и двух топологических допусков Δl :

$$L = l_1 + l_2 + l + 2\Delta l. \quad (1.24)$$

Минимальная величина l определяется уровнем прямо прошедшего незадержанного сигнала, величина которого в основном зависит от диэлектрической проницаемости материала звукопровода. Чтобы прямо прошедший сигнал был мал по сравнению с ПАВ - сигналом, должно выполняться условие

$$\frac{l_{min}}{h} \geq 5, \quad (1.25)$$

где h - толщина звукопровода - обычно выбирается не менее $20\lambda_a$.

Величина Δl выбирается равной 2...5 мм в зависимости от технологии крепления звукопровода.

Ширина звукопровода B выбирается из тех же соображений:

$$B = W_{max} + 2b_1 + 2\Delta b_1,$$

где W_{max} - максимальная апертура; b_1 - ширина пассивной части и подводящих шин; b_1 выбирается с учетом ограничений для тонкопленочной технологии; Δb_1 - технологический допуск, $\Delta b_1 = 2 \dots 5$ мм.

8. Выбрать материалы для решетки преобразователей и поглотителей.

9. Вычертить эскиз фильтра с необходимыми (рассчитанными) размерами.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО ФИЛЬТРА НА ПАВ

2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В основе расчета и конструирования устройств на ПАВ лежит представление об однозначной связи между топологией электродной структуры устройства с его электрическими характеристиками. Для широко используемой в практике проектирования устройств на ПАВ модели δ - источников (см. лаб. раб. №1) предполагается, что каждый электрод или пара электродов ВШП являются независимыми источниками ПАВ, а каждый источник соответствует отсчету (выборке) импульсной характеристики. Такое приближение соответствует модели первого порядка, позволяет рассматривать ВШП как трансверсальный фильтр и использовать для синтеза устройств на ПАВ методы расчета цифровых фильтров, такие как «оконных функций», частотной выборки и т.д.

Однако на практике параметры устройств на ПАВ часто не совпадают с расчетными. Как правило, это объясняется эффектами второго порядка. Под этими эффектами понимают все механизмы и явления, из-за которых происходят отклонения и искажения характеристик устройств на ПАВ от соотношений, описываемых моделью первого порядка. Эффекты второго порядка влияют на импульсную характеристику, АЧХ и ФЧХ, уровень затухания сигнала и другие параметры устройств на ПАВ.

По механизмам воздействия эффекты второго порядка могут быть классифицированы следующим образом.

Электростатические эффекты: неоднородность распределения поверхностного заряда по ширине и апертуре электродов преобразователя; зависимость распределения заряда от топологии преобразователя и расположения электродов в преобразователе.

Эффекты взаимодействия ПАВ с электродной структурой и внешней электрической цепью: двунаправленность излучения ПАВ; омические потери; неоднородность амплитудных и фазовых фронтов ПАВ; регенерация ПАВ; масс-электрические отражения.

Эффекты распространения ПАВ: дифракция и потери на распространение, излучение и прием паразитных сигналов: электромагнитная и электростатическая наводка; излучение и прием объемных волн; отражение объемных и поверхностных волн от краев звукопровода.

Температурная нестабильность и нелинейность свойств материалов звукопровода.

Технологические погрешности изготовления: отклонение размеров и положения электродов; их обрывы и закорачивания; неточность ориентации подложки и размещения на ней электродной структуры; разброс электрофизических параметров пьезоэлектрической подложки.

Некоторые из перечисленных эффектов принципиально присущи устройствам на ПАВ и не могут быть полностью устранены, Это, например,

электростатические эффекты, регенерация ПАВ в преобразователе, дифракция акустических волн, омические потери и т.д. Влияние таких эффектов может быть учтено расчетным путем или скомпенсировано изменением топологии электродной структуры преобразователя и подбором соответствующего материала пьезоэлектрической подложки. Другие явления, такие как отражения от краев подложки, электромагнитная и электростатическая наводки, могут быть практически полностью устранены различными методами.

В зависимости от заданных требований, конструкции устройства и материала подложки могут преобладать те или иные вторичные эффекты. Поэтому при разработке устройств на ПАВ можно ограничиться лишь учетом нескольких эффектов или использовать конструктивные методы, приводящие к их уменьшению или компенсации. Эти методы подробно изложены в литературе [4,6,7]. В данной работе ограничимся рассмотрением эффектов второго порядка, связанных с включением фильтра в электрическую цепь и вносящих наибольшие потери.

2.2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Знакомство с эффектами второго порядка в устройствах на ПАВ, способами согласования фильтров с внешними радиоэлектронными схемами, расчет энергетических характеристик фильтров на ПАВ.

2.3. ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАВ С ЭЛЕКТРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

Обобщенная структурная схема устройства на ПАВ приведена на рисунке 2.1, а. Схема содержит два преобразователя 1, 2, расположенных на некотором расстоянии друг от друга в общем акустическом потоке на поверхности пьезоэлектрического звукопровода 3; на торцах звукопровода нанесено поглощающее покрытие 15, 16.

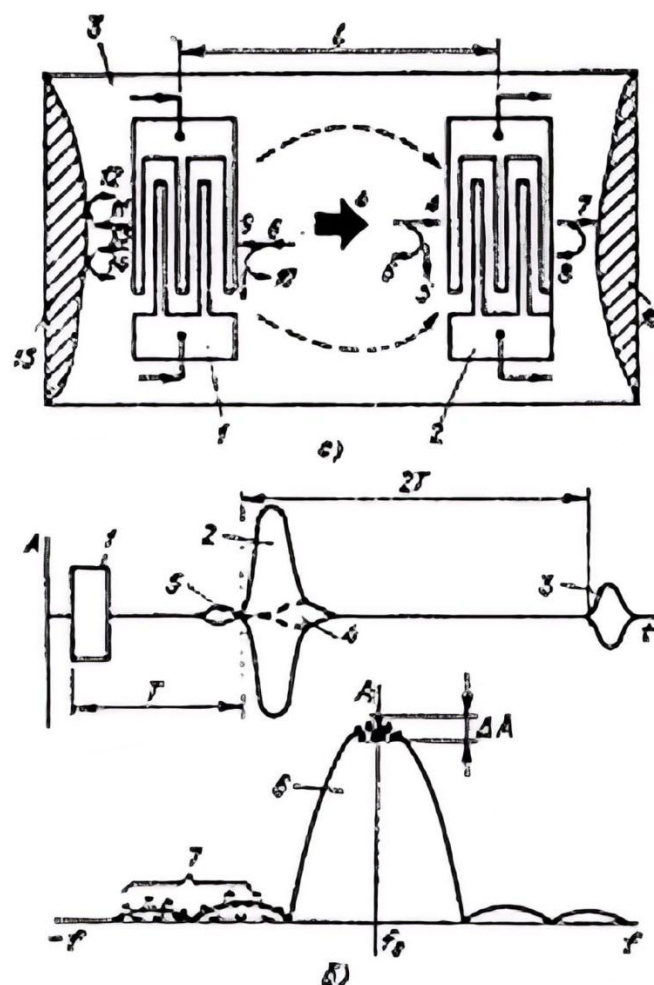


Рис. 2.1. Обобщенная структурная схема устройства на ПАВ

При подаче на входной преобразователь 1 электрического сигнала, частота которого совпадает с частотой акустического синхронизма преобразователя, он возбуждает ПАВ, распространяющуюся в двух противоположных направлениях, т. е. к выходному преобразователю 2 и противоположному ему торцу звукопровода. Волна 4, распространяющаяся к выходному преобразователю, частично отражается от него (6), частично преобразуется в электрический сигнал и поглощается в нагрузке (5), и частично проходит в прежнем направлении (7). Значительный вклад в искажение импульсного отклика $h(t)$ и АЧХ устройства, изображенные на рисунке 2.1 б, вносят переотражения ПАВ между преобразователями. Часть падающей на выходной преобразователь волны, отраженная в обратном направлении (6, рис. 2.1, а), достигает входного преобразователя. Перераспределение волны 6 при взаимодействии с преобразователем 1 аналогично перераспределению ее при взаимодействии с преобразователем 2. Таким образом, часть 10 энергии волны 6 переотражается в направлении преобразователя 2 и служит причиной возникновения трехзаходного сигнала. На рисунке 2.1 б в качестве базы отсчета задержки принимается сигнал 1, соответствующий по временному положению

электрическому сигналу, поступающему на входной преобразователь. Физическая природа возникновения незадержанного сигнала 1 обусловлена прямым походом (наводкой) электрического сигнала со входа на выход устройства (на рисунке 2.1, а обозначен штриховыми линиями). Основным выделенный на нагрузке сигнал 2 (рис. 2.1, б) смещен по отношению к входному сигналу на время

$$T \approx \frac{L}{v_a}$$

где L – расстояние между преобразователями, v_a – скорость распространения ПАВ. Трёхзаходный сигнал 3, обусловленный переотражением ПАВ, имеет задержку относительно сигнала 2 – $2T$ и относительно входного сигнала – $3T$. При анализе импульсного отклика можно отметить наличие в нём ещё двух ложных сигналов, связанных со вторичными акустическими эффектами. Один из них (4) обусловлен переотражениями ПАВ собственно в электродной структуре входного и в меньшей степени выходного преобразователей; он вызывает «затягивание» спада основного сигнала. Другой сигнал (5) обусловлен распространением между входным и выходным преобразователями объёмной акустической волны (ОАВ). Ввиду отличия скоростей ОАВ и ПАВ его расположение на временной оси не совпадает с расположением основного сигнала. Проследим роль указанных искажений импульсного отклика в формировании АЧХ устройства (рис. 2.1, б). Наличие сигнала прямого прохождения (1, рис. 2.1, б) между преобразователями приводит к изрезанности АЧХ во всей рабочей полосе частот (на рис. 2.1, б изрезанность АЧХ 6 показана штриховой линией только на участке 7). Период изрезанности связан с расстоянием между преобразователями, а «глубина» – с относительным уровнем сигнала прямого прохождения. Наличие трехзаходного сигнала 3 обуславливает изрезанность АЧХ в районе центральной частоты f_0 , причем относительный уровень её δ пропорционален относительному уровню трехзаходного сигнала.

Мы рассмотрели основные причины возникновения искажений основных электрических характеристик устройств на ПАВ. Можно отметить еще ряд эффектов, вклад которых по сравнению с указанными выше незначителен. Среди них нужно упомянуть отражения ПАВ от торцов звукопровода (рис. 2.1, а): отражение 12 волны 11, излученной входным преобразователем 1 в направлении торца звукопровода; отражение 14 волны 6, прошедшей через преобразователь 1 (9,13); отражение 8 энергии волны 7, прошедшей через выходной преобразователь. Все эти отражения обуславливают сигналы, дополнительно «засоряющие» импульсный отклик устройства и соответственно искажающие её АЧХ.

Уровень рассмотренных эффектов второго порядка во многом определяется энергетическими соотношениями и в конечном счете параметрами преобразователей и согласующих цепей.

2.4. ОСНОВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ НА ПАВ

Модель δ - источников, используемая в лабораторной работе №1 для анализа импульсной и частотной характеристик фильтра на ПАВ, а также для синтеза устройств на ПАВ, не дает ответа на вопросы электрического согласования и потерь преобразования, не учитываются также вторичные эффекты. Для этих целей можно использовать еще одну модель устройств на ПАВ - эквивалентную электрическую схему.

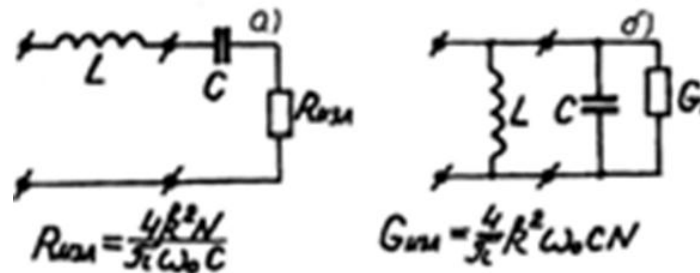


Рис. 2.2. Эквивалентные электрические схемы преобразователя ПАВ вблизи резонансной частоты: а - для слабых пьезоэлектриков; б - для сильных пьезоэлектриков

Эквивалентная схема преобразователя, состоящего из N электродов, вблизи резонансной частоты может быть сведена к двухполюснику, изображенному на рис. 2.2 в двух вариантах - для пьезоэлектриков с большим коэффициентом электромеханической связи (сильных) k^2 и с малым (слабых) k^2 . На рисунке также даны зависимости для сопротивления излучения $R_{изл.}$ и проводимости излучения $G_{изл.}$. Емкость C является статической емкостью преобразователя

$$C = C_0 N; C_0 = C_{пог} W \quad (2.1)$$

где C_0 - емкость пары электродов; $C_{пог.}$ - емкость на единицу длины электродов в соответствии с таблицей 1.3.

Анализ и расчет схем следует проводить, учитывая параметры эквивалентной схемы ПАВ устройства (рис. 2.3).

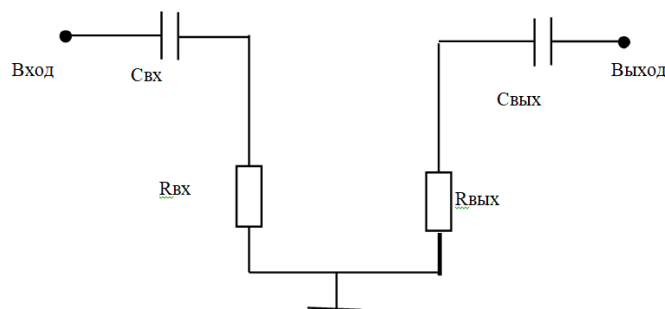


Рис. 2.3. Эквивалентная схема ПАВ-устройства

Известно, что в энергию акустической волны преобразуется только та часть энергии входного сигнала, которая подводится непосредственно к $R_{вх.}$ преобразователя. Таким образом, емкости $C_{вх.}$ и $C_{вых.}$ являются паразитными элементами ПАВ устройства. Входная цепь фильтра ПАВ является частотнозависимым делителем, причем сопротивление реактивной части превышает сопротивление активной части в несколько раз. Следовательно, в состав радиоэлектронного тракта должна входить схема, нейтрализующая влияние паразитной входной емкости ПАВ устройства, то есть согласование по мощности. Выходная емкость ПАВ и сопротивление нагрузки также образуют частотнозависимый делитель. Поэтому выходная цепь должна быть согласована по напряжению. Сущность согласования заключается в построении цепи, импеданс которой в сечении входа (выхода) равен сопряженному входному (выходному) импедансу ПАВ фильтра.

Наиболее простой способ согласования - использование последовательной или параллельной катушки индуктивности, предназначенной в основном для компенсации статической емкости C (рис. 2.4).

Такое согласование применимо для фильтров с узкой полосой пропускания $\Delta f/f < 10\%$. Для фильтров со средней полосой пропускания $\Delta f/f = 10...20\%$ целесообразно использование простейших согласующих LC-цепочек (рис. 2.5).

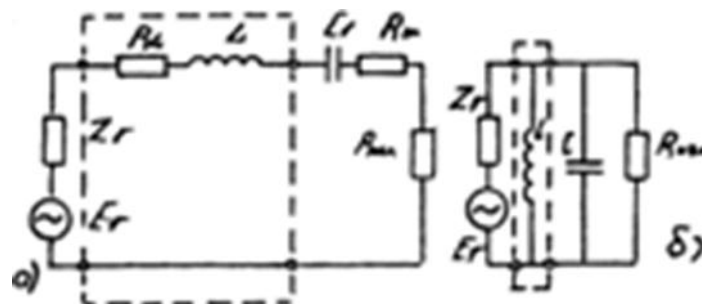


Рис. 2.4. Цепи для узкополосного согласования ВШП: а - последовательная; б - параллельная

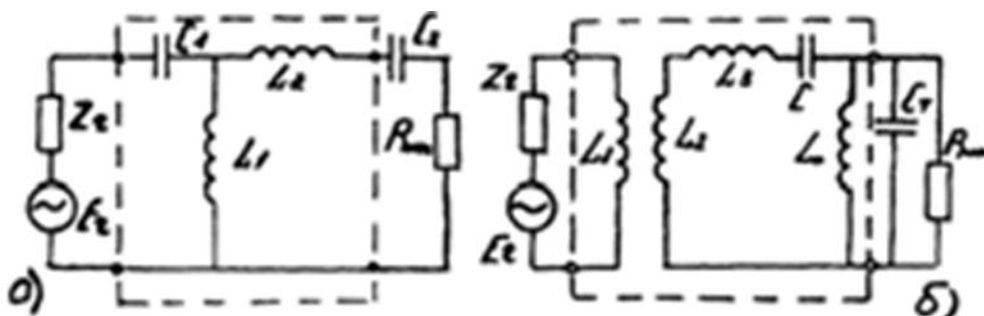


Рис. 2.5. Цепи для согласования ВШП со средней полосой пропускания: а) Т - образный четырехполюсник; б) Г - образный четырехполюсник с трансформатором

При более широкополосном согласовании, $\Delta f/f = 20...30\%$, рекомендуется использовать активные цепи, которые имитируют индуктивность, или дифференциальные трансформаторы, выполнение которых возможно в виде интегральных функциональных узлов.

Для фильтров с полосой $\Delta f/f = 40...50\%$ целесообразно отказаться от полного согласования и ограничиться только согласованием по активной части со-противлений генератора и фильтра, так как в этом случае число навесных элементов согласующей цепи возрастает до 5...10, что сводит на нет идею миниатюризации.

Недостатком всех перечисленных методов является наличие дискретных катушек индуктивности. Резонансная частота образующегося при согласовании контура должна совпадать с f_0 . Его добротность (электрическая добротность преобразователя)

$$Q_{эл} = Q_{посл} = \frac{1}{\omega_0 C R_{изл.}} = Q_{пар} = \omega_0 C R_{изл.} = \frac{\pi}{k^2 N} \quad (2.2)$$

Если ввести понятие акустической добротности преобразователя

$$Q_{АК} = \frac{f_0}{\Delta f} \approx N \quad (2.3)$$

Оптимальным условием получения высокой эффективности преобразования в широкой полосе является условие

$$Q_{АК} = Q_{эл} \quad (2.4)$$

Это означает, что для каждого материала существует определенное оптимальное число электродов (см. п. 1.6)

$$N_{опт} = \sqrt{\frac{\pi}{k^2}} \quad (2.5)$$

при котором достигается высокая эффективность преобразования в относительной полосе частот (рис. 2.6)



Рис. 2.6. Графики добротности преобразователя и согласующей цепи

$$\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_{опт} = \frac{1}{N_{опт}} \approx k \quad (2.6)$$

Если $N \neq N_{опт}$, то (см. рис. 2.6): если $N > N_{опт}$, то $\Delta f_{эл} > \Delta f_{АК}$; если $N_{опт} < N$, то $\Delta f_{эл} < \Delta f_{АК}$.

Величина отношения

$$\left(\frac{N_{\text{опт}}}{N}\right)^2 = p = \frac{R_H}{R_{\text{изл}}(\omega_0)} \quad (2.7)$$

где R_H - сопротивление нагрузки (или сопротивление R_2 генератора), называется степенью рассогласования преобразователя.

Когда ПАВ достигает приемного преобразователя, часть акустической энергии отражается от него, другая часть преобразуется в электрический сигнал и выделяется на нагрузке, а оставшаяся часть проходит в прежнем направлении (рис. 2.1).

Коэффициенты прохождения B_{21} , отражения B_{11} и поглощения B_{31} определяются выражениями:

$$B_{11} = -10 \lg \frac{1}{(1+p)^2} \quad B_{21} = -10 \lg \frac{p^2}{(1+p)^2} \quad B_{31} = -10 \lg \frac{2p}{(1+p)^2} \quad (2.8)$$

На рисунке 2.7 представлены графики зависимостей коэффициентов B_{ij} от степени рассогласования.

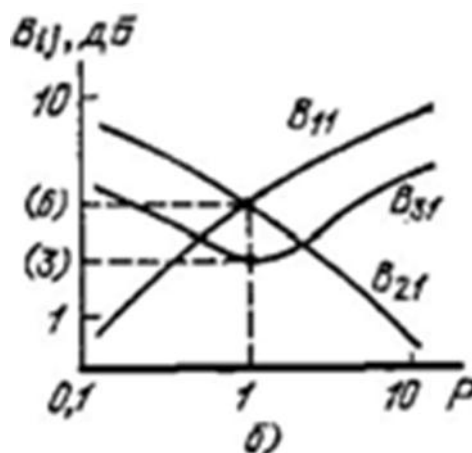


Рис. 2.7. Энергетические соотношения в ВПП

В согласованном режиме $N = N_{\text{опт}}$; $R_H / R_{\text{изл.}} = 1$, то есть в нагрузке выделяется 50% энергии падающей волны ($B_{31} = 3$ дБ); 25% энергии отражается обратно ($B_{11} = 6$ дБ) и 25% энергии ($B_{21} = 6$ дБ) проходит преобразователь. В фильтрах чаще всего $N > N_{\text{опт}}$, в этом случае увеличивается акустическая добротность по сравнению с электрической. Чтобы уравнивать в этом случае акустическую и электрическую полосы пропускания, нужно уменьшить R_H и, следовательно, повысить добротность электрического контура.

Выражения (2.8) для коэффициентов отражения (B_{11}), прохождения (B_{21}) и поглощения (B_{31}) позволяют при известной степени рассогласования определить энергетические соотношения в устройстве на ПАВ и, в частности, величину вносимых преобразователями потерь B_2 :

$$B_2 = 2(B_{31} + B_3) \quad (2.9)$$

где B_3 – дополнительные потери на омическом сопротивлении электродов r .

$$B_3 = -10 \lg \frac{R_n - R_э}{R_n} \quad (2.10)$$

где $R_э = 2r / N$, $r = rW / ah_э$, a – ширина электрода, $h_э$ – толщина электрода (раздел 6 лаб. раб. 1).

В разделе 2.2, при анализе импульсного отклика $h(t)$, была рассмотрена структура ложных сигналов, сопровождающих работу устройства на ПАВ. Преобладает среди этих сигналов чаще всего сигнал тройного прохождения. В связи с тем, что устройства на ПАВ используются для обработки сигналов, к которым предъявляются высокие требования по разрешению слабых сигналов на фоне сильных, уровень ложных сигналов $B_{ЛС}$ необходимо контролировать.

$$B_{ЛС} \approx 2B_{11} \quad (2.11)$$

Уровень ложных сигналов влияет на изрезанность АЧХ (неравномерности затухания) в полосе пропускания (рис. 2.1 б)

Таблица 2.1

Удельное сопротивление материала электродов

Металл	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Алюминий	0,027
Медь	0,017
Золото	0,023
Серебро	0,016
Вольфрам	0,051
Платина	0,106

2.5. ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАВ

При распространении ПАВ наибольшие потери вносят эффекты поглощения и дифракционные эффекты.

Поглощение ПАВ при распространении обусловлено взаимодействием с тепловыми фононами, рассеянием на кристаллических дефектах и трещинах поверхности звукопровода, т.е. вязкостными свойствами материалов звукопровода (α_{p1}) и взаимодействием с газом над поверхностью звукопровода и (β_M) зависит от частоты :

$$B_p = a_m f^2 + \beta_m f, \quad (2.12)$$

где B_p – коэффициент поглощения, дБ/мкс; f – частота, ГГц; a_m, β_m – коэффициенты, приведенные в таблице 1.3.

Как следует из данных, приведенных в таблице 1.3, подложка из кварца, танталата и ниобата лития, германата висмута употребимы вплоть до частот несколько гигагерц.

Коэффициенты поглощения для пьезокерамики очень сильно зависят от ее состава и технологии изготовления и в таблице не приведены. Область применения пьезокерамики в качестве материала подложки ПАВ – устройств ограничивается частотами ≤ 30 МГц.

Дифракционные потери обусловлены расширением пучка ПАВ по мере его удаления от излучателя с ограниченной апертурой. В монокристаллических средах дифракционное расширение акустических пучков оценивается параметром анизотропии. При $\gamma > 0$ дифракционные потери больше, чем в изотропной среде ($\gamma = 0$), а при $\gamma < 0$ меньше. При $\gamma = -1$ в анизотропной среде наблюдается явление, близкое к автоколлимации, когда расширение акустического пучка минимально или полностью отсутствует. Значения параметра анизотропии для некоторых материалов приведены в таблице 1.4. С точки зрения дифракционных эффектов идеальным является материал со значением близким к -1 . При других значениях дифракционная картина ПАВ, распространяющейся в анизотропной среде, определяется значением волнового параметра Q_d :

$$Q_d = \lambda_a x |1 + \gamma| / w^2, \quad (2.13)$$

где x – расстояние от ВШП; $x = 1$; w – апертура акустического пучка.

Для области $Q_d < 1$ (так называемой зоны Френеля или ближней зоны) расширение пучка ПАВ незначительно. Однако в этой зоне наблюдается неоднородность фронта волны, связанная с электростатическими эффектами. При $Q_d > 1$ (зона Фраунгоффера или дальняя зона) потери на дифракцию возрастают с расстоянием по логарифмическому закону. Дифракционные потери можно аппроксимировать формулой:

$$B_d(\text{дБ}) = -10 \lg Q_d \quad (2.14)$$

Дифракционные эффекты влияют на выходные параметры фильтров ПАВ. Простое расхождение акустического пучка приводит к тому, что электроды выходного ВШП принимают только часть энергии волны. Кроме того, часть пучка ПАВ попадает на боковые грани подложки и, отражаясь от них приводит к появлению ложных сигналов в импульсном отклике фильтра.

Особенно сильно подвержены влиянию дифракции ВШП со взвешиванием длины электродов, так как для реализации в АЧХ таких ВШП затухания боковых лепестков порядка $R = -60$ дБ необходимо иметь области малых перекрытий электродов и точно выдерживать закон анодизации.

2.6. ОБЩИЕ ВНОСИМЫЕ ПОТЕРИ

Общие вносимые потери устройством на ПАВ при передаче электрического сигнала от генератора к нагрузке определяются как:

$$B_{\Sigma} = B_1 + B_2 + B_{11} + B_{21} + B_P + B_D, \quad (2.15)$$

где B_1 – потери на двунаправленное излучение входного преобразователя (3 дБ); B_2 – потери, вносимые преобразователями; B_{11} – потери на отражение; B_{12} – потери на прямое прохождение; B_P – потери на распространение; B_D – дифракционные потери.

2.7. ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ НА ПАВ

При изменении температуры окружающей среды изменяется скорость распространения упругих волн и линейные размеры в направлении распространения. Температурный коэффициент задержки (ТКЗ) – это параметр, который учитывает суммарный эффект обоих факторов и характеризует относительное изменение времени задержки при изменении температуры на 1°C .

$$\text{ТКЗ} = \frac{1}{T} \frac{\partial T_3}{\partial t^0} = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial t^0} - \frac{1}{v_a} \frac{\partial v_a}{\partial t^0} = \alpha_l - \alpha_v, \quad (2.16)$$

где T_3 – время задержки устройства,

$$T_3 = l / v_a \quad (2.17)$$

α_l – температурный коэффициент изменения размеров материалов подложки (таблица 1.4); α_v – температурный коэффициент изменения скорости акустических колебаний (таблица 1.4); l – расстояние между преобразователями.

Зная ТКЗ, можно определить температурный коэффициент частоты (ТКЧ).

$$\text{ТКЧ} = \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial t^0} = \frac{\text{ТКЗ}}{1 + \alpha_l \Delta t^0} \quad (2.18)$$

Температурная стабильность параметров – важная эксплуатационная характеристика. Если подходящий материал выбрать не удастся, применяют более сложные конструктивные решения.

Во временной области эффекты второго порядка приводят к появлению ложных сигналов, а в частной области взаимодействие этих сигналов с полезным сигналом приводит к неравномерности АЧХ и ФЧХ (рис. 2.8, а). Амплитуда пульсаций АЧХ зависит от амплитуды паразитных сигналов, а их частота определяется временем задержки между основным и паразитным сигналами.

Наиболее сильным паразитным сигналом является трёхкратно отраженный сигнал (ТОС). Его уровень на 12 дБ меньше основного сигнала. ТОС возникает из-за отражения ПАВ от акустической неоднородности под ВШП, а также из-за регенерации ПАВ выходным преобразователем. Для ослабления амплитуды ТОС применяют ВШП с расщеплёнными электродами; электрическое рассогласование с нагрузкой; поворот фазового фронта ПАВ путём разориентации ВШП или с помощью металлической плёнки треугольной

формы (рис. 2.8, б, в). Если позволяют размеры подложки, ТОС можно компенсировать за счет противофазного отражения от составного приёмного ВШП (рис. 2.8, г). Предложены способы уменьшения различия в импедансах свободного и металлизированного участка пьезоэлектрического звукопровода с помощью дополнительного осаждения тонкого акустически согласующего материала сверху или снизу электродов (рис. 2.8, д).

Электромагнитная наводка обусловлена емкостной связью между преобразователями через звукопровод и крышку корпуса. Для уменьшения этой емкости рекомендуется заземлять противоположные концы преобразователей, а в промежутке между ними устанавливать заземлённый металлический экран и заземлённые электроды (рис. 2.8, е).

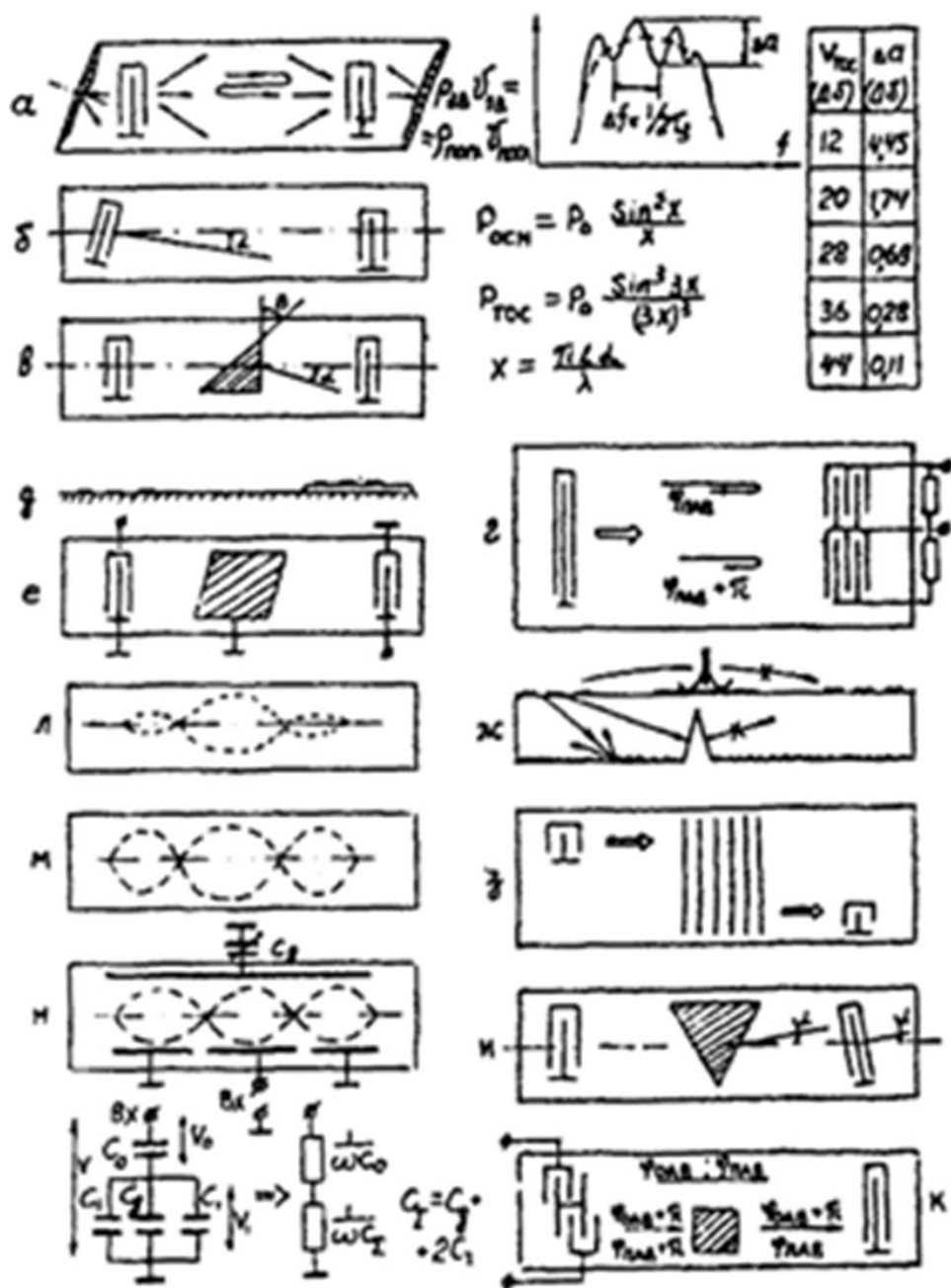


Рис. 2.8. Конструктивные методы ослабления эффектов второго порядка

Для подавления объёмных волн, отраженных от нерабочей поверхности звукопровода, применяют рифление нижней поверхности; клиновидное углубление и покрытие её поглотителем (рис. 2.8, ж). Снижение уровня сдвиговых объёмных волн, распространяющихся почти параллельно поверхности достигается выбором среза кристалла с минимальной эффективностью возбуждения ОАВ; переизлучением полезной ПАВ в соседний канал с помощью многополоскового ответвителя (рис. 2.8, з); поворотом фронта ПАВ с помощью треугольной металлической плёнки и соответствующим поворотом выходного ВШП (рис. 2.8, и); использованием двух параллельных акустических каналов (рис. 2.8, к).

Дифракционные искажения приводят к изменению расчетного закона аподизации и к увеличению боковых лепестков в фильтрах, взвешенных по степени перекрытия электродов. Необходимо использовать материалы и срезы с минимальной дифракцией. Компенсация дифракционных искажений может быть достигнута расчетным методом и заключается в целенаправленном искажении рассчитанной без учета дифракции АЧХ. Уменьшить дифракционные искажения можно путём поиска метода взвешивания ВШП, слабо подверженного дифракции. Например, ВШП с ёмкостным взвешиванием электродов. Существенное уменьшение дифракционных эффектов получается при использовании ВШП с масштабированием отдельных групп электродов. Идея заключается в том, чтобы в несколько раз увеличить перекрытие электродов, соответствующих боковым лепесткам функции аподизации, но одновременно с помощью внешних делителей уменьшить амплитуду подаваемого на них напряжения сигнала. Это можно сделать, например, с помощью емкостного делителя (рис. 2.8 н, л, м). При большом числе боковых лепестков ВШП можно разделить на большее число групп.

2.8. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

В лабораторной работе необходимо провести анализ спроектированного в работе №1 фильтра на ПАВ.

Должны быть рассчитаны все виды потерь фильтра, проанализировано влияние этих потерь на выходные характеристики фильтра, предложены методы улучшения характеристик фильтра.

Отчет должен содержать соответствующие расчеты, анализ полученных результатов, обоснованные рекомендации по улучшению характеристик фильтра с иллюстрациями.

2.9. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Вычертить эскиз спроектированного в работе №1 фильтра и выписать его необходимые электрические и конструктивные характеристики.
2. Вычертить эскиз спроектированного в работе №1 фильтра и выписать его необходимые электрические и конструктивные характеристики.

3. Пользуясь рисунком 2.2, формулами 2.1 и таблицей 1.4, выбрать соответствующую эквивалентную электрическую схему преобразователя и рассчитать её параметры $R_{изл}$, $G_{изл}$, C .
4. Пользуясь формулами 2.2...2.10, рассчитать потери, связанные с эффектами взаимодействия ПАВ с электродной структурой и внешней электрической цепью.
5. Рассчитать уровень ложных сигналов по формуле 2.11.
6. Рассчитать потери, связанные с эффектами распространения ПАВ по формулам 2.12...2.14.
7. Рассчитать общие вносимые потери фильтром на ПАВ по формуле 2.15.
8. Пользуясь формулами 2.16...2.18 определить ТКЧ фильтра, а также уход Δf частоты f_0 при изменении температуры на 20°C .
9. Проанализировать влияние потерь на характеристики фильтра, предложить методы улучшения характеристик (рис. 2.1, 2.8)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение основ проектирования и исследование акустоэлектронных фильтров на ПАВ. При необходимости углубить теоретические знания по рассмотренным темам следует обратиться к библиографическому списку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 107.460.040.001-86 Устройства акустоэлектроники. Типы, основные параметры и размеры.
2. ГОСТ 4.223.002-88 Устройства акустоэлектроники. Технические требования ОТУ.
3. ГОСТ 107.460.021.001-86 Изделия акустоэлектронные на поверхностных акустических волнах. Конструирование.
4. ГОСТ 4.223.005-86 Устройства акустоэлектроники народно- хозяйственного и бытового назначения. Технические требования ОТУ.
5. Дмитриев В.В. Интегральные пьезоэлектрические устройство фильтраций и обработки сигналов: Справ. пособие / В.В. Дмитриев, Е.Г. Бронникова [и др.]; ред. Б.Ф. Высоцкий, В.В. Дмитриев. - М.: Радио и связь, 1985.- 176 с.
6. Речицкий В. И. Акустоэлектронные радиокомпоненты. Схемы, топология, конструкции. / В. И. Речицкий - М.: Радио и связь, 1987.- 192 с.
7. Орлов В.С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. / В.С. Орлов, В.С. Бондаренко – М.: Ради и связь, 1984.-272с.
8. Щука А. А. Основы интегральной электроники: учебное пособие / А. А. Щука – МИ- РЭА. – М., 1993. – 80 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ
ФУНКЦИИ БЕССЕЛЯ ПЕРВОГО РОДА НУЛЕВОГО ПОРЯДКА

X	$J_0(X)$	X	$J_0(X)$	X	$J_0(X)$	X	$J_0(X)$
0,0	+1,0000	2,5	-0,0484	5,0	-0,1776	7,5	+0,2663
0,1	0,9975	2,6	0,0968	5,1	0,1443	7,6	0,2516
0,2	0,9900	2,7	0,1424	5,2	0,1103	7,7	0,2346
0,3	0,9776	2,8	0,1850	5,3	0,0758	7,8	0,2154
0,4	0,9604	2,9	0,2243	5,4	0,0412	7,9	0,1944
0,5	+0,9385	3,0	-0,2601	5,5	-0,0068	8,0	+0,1717
0,6	0,9120	3,1	0,2921	5,6	+0,0270	8,1	0,1475
0,7	0,8812	3,2	0,3202	5,7	0,0599	8,2	0,1222
0,8	0,8463	3,3	0,3443	5,8	0,0917	8,3	0,0960
0,9	0,8075	3,4	0,3643	5,9	0,1220	8,4	0,0692
1,0	+0,7652	3,5	-0,3801	6,0	+0,1506	8,5	+0,0419
1,1	0,7196	3,6	0,3918	6,1	0,1773	8,6	+0,0146
1,2	0,6711	3,7	0,3992	6,2	0,2017	8,7	-0,0125
1,3	0,6201	3,8	0,4026	6,3	0,2238	8,8	0,0392
1,4	0,5669	3,9	0,4018	6,4	0,2433	8,9	0,0653
1,5	+0,5118	4,0	-0,3971	6,5	+0,2601	9,0	-0,0903
1,6	0,4554	4,1	0,3887	6,6	0,2740	9,1	-0,1142
1,7	0,3980	4,2	0,3766	6,7	0,2851	9,2	0,1367
1,8	0,3400	4,3	0,3610	6,8	0,2931	9,3	0,1577
1,9	0,2818	4,4	0,3423	6,9	0,2981	9,4	0,1768
2,0	+0,2239	4,5	-0,3205	7,0	+0,3001	9,5	-0,1939
2,1	0,1666	4,6	0,2961	7,1	0,2991	9,6	0,2090
2,2	0,1104	4,7	0,2693	7,2	0,2951	9,7	0,2218
2,3	0,0555	4,8	0,2404	7,3	0,2882	9,8	0,2323
2,4	0,0025	4,9	0,2097	7,4	0,2786	9,9	0,2403
						10,0	-0,2459

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Лабораторная работа №1. Проектирование акустоэлектронного фильтра на ПАВ.....	5
1.1. Цель работы	5
1.2. Физические основы	5
1.3. Конструкция фильтра на ПАВ	7
1.4. Импульсная или частотная характеристики фильтров на ПАВ	8
1.5. Синтез фильтров на ПАВ	10
1.6. Материалы для устройств на ПАВ	15
1.7. Лабораторное задание.....	17
1.8. Порядок выполнения работы	18
2. Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО ФИЛЬТРА НА ПАВ	20
2.1. Физические основы	20
2.2. Цель работы	21
2.3. Эффекты взаимодействия ПАВ с электродной структурой.....	21
2.4. Основные энергетические соотношения в устройствах на ПАВ	24
2.5. Эффекты распространения ПАВ	28
2.6. Общие вносимые потери	29
2.7. Температурная стабильность характеристик устройств на ПАВ ...	30
2.8. Лабораторное задание.....	32
2.9. Порядок выполнения работы	32
Заключение.....	33
Библиографический список.....	34
Приложение. Функции Бесселя первого рода нулевого порядка.....	35

Устройства функциональной электроники в радиоэлектронных системах и комплексах

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 1,2
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Составитель
Сукачев Александр Игоревич

В авторской редакции

Подписано к изданию 20.09.2022.
Уч.-изд. л. 1,9.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84