

Концепция проектирования и оптимизации параметров приборов на поверхностных акустических волнах

А. С. Койгеров[✉], А. В. Корляков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ a.koigerov@gmail.com

Аннотация

Введение. Полосовые фильтры (ПФ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) используются в качестве устройств частотной селекции приемной и передающей радиоэлектронной аппаратуры. Среди множества требований к ПФ на ПАВ на первый план выходят как требования к качеству характеристик – уменьшение вносимых потерь, уменьшение неравномерности в полосе пропускания и т. д., так и требования по сокращению времени разработки фильтра. Сокращение времени разработки с одновременным снижением затрат на нее достигается за счет предварительного компьютерного моделирования. Указанная задача решается при комплексном подходе к построению системы автоматизированного проектирования с возможностью решения задач оптимизации с большим числом степеней свободы.

Цель работы. Разработка концепции проектирования ПФ на ПАВ с помощью оптимизационных алгоритмов. Апробация работы по созданию реальных частотных фильтров на примере резонаторных фильтров с малыми потерями на вытекающих ПАВ.

Материалы и методы. Теоретическая часть работы выполнена с применением методов статистического анализа, теории цепей и модели связанных мод. В ходе работы применялась математическая обработка и расчет в программе MATLAB.

Результаты. Разработана концепция построения системы автоматизированного проектирования фильтров на ПАВ с заданными частотными характеристиками. Предложен оригинальный метод оптимизации элементов топологии ПФ на ПАВ для получения заданных частотных характеристик. В качестве апробации предложенного подхода рассчитан и изготовлен резонаторный фильтр на вытекающих ПАВ на 64° УХ-срезе ниобата лития.

Заключение. Предложенный комплексный подход к проектированию ПФ на ПАВ позволяет быстро и относительно точно прогнозировать характеристики фильтра на стадии моделирования, что дает существенный выигрыш по сравнению с проведением многочисленных натурных экспериментальных исследований или численных исследований при наличии большого числа степеней свободы.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, встречно-штыревой преобразователь, фильтр на ПАВ, модель связанных мод, СОМ-метод, пьезоэлектрическая подложка, сильный пьезоэлектрический материал, ниобат лития, глобальная оптимизация, многоэкстремальная целевая функция

Для цитирования: Койгеров А. С., Корляков А. В. Концепция проектирования и оптимизации параметров приборов на поверхностных акустических волнах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 17–32. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-17-32

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Генеральному директору – главному конструктору ООО "АЭК Дизайн" В. Р. Реуту за предоставленные экспериментальные данные.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; принята к публикации после рецензирования 19.09.2023; опубликована онлайн 29.02.2024



Concept for Parameter Design and Optimization of Surface Acoustic Wave Devices

Aleksey S. Koigerov[✉], Andrey V. Korlyakov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ a.koigerov@gmail.com

Abstract

Introduction. Bandpass filters on surface acoustic waves (SAW) are important components in frequency selection devices for receiving and transmitting electronic equipment. Among the variety of existing requirements for SAW filters, particular attention is paid to those for the quality of characteristics, including reduction of insertion losses, unevenness in the bandwidth, etc., and those for reducing the development time of the filter. Reduction in the development time along with a simultaneous reduction in expenses can be achieved through the application of preliminary computer simulation. This task can be implemented only through an integrated approach to developing a computer-aided design system capable of solving optimization problems with a large number of degrees of freedom.

Aim. Development of a prototype of a fully functional complex for simulating and calculating SAW filters. Approximation of work on the creation of actual frequency filters on the example of resonator SAW filters with low losses on leaky SAWs. Development of a methodological approach to creation of a technology of computer-aided design of SAW filters using optimization algorithms.

Materials and methods. The theoretical part of the work was carried out using statistical analysis methods, circuit theory, and coupled mode theory. In the course of the work, mathematical processing and calculation were carried out in the MATLAB environment.

Results. A concept for creating a system of automated design of SAW filters with specified frequency characteristics was developed. An original method is proposed for optimizing the topology of SAW filter elements to obtain the maximum achievable frequency responses. The proposed approach was tested when calculating a resonator filter on leaky SAWs at 64° YX-cut lithium niobate.

Conclusion. The proposed integrated approach to designing SAW filters allows a rapid and relatively accurate prediction of filter characteristics at the modeling stage, which has a significant advantage compared to conducting numerous real experimental studies or numerical studies in the presence of a large number of degrees of freedom.

Keywords: surface acoustic waves, inter-digital transducer, SAW filter, coupling of modes model, COM method, piezoelectric substrate, strong piezoelectric material, lithium niobate, global optimization, multi-extreme objective function

For citation: Koigerov A. S., Korlyakov A. V. Concept for Parameter Design and Optimization of Surface Acoustic Wave Devices. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 17–32. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-17-32

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgments. The authors express his gratitude to the general director and the general designer "АЕС-Design" V. R. Reut for the experimental data provided

Submitted 12.05.2023; accepted 19.09.2023; published online 29.02.2024

Введение. Разработка приборов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) – одно из актуальных направлений функциональной электроники, в частности акустоэлектроники [1]. Устройства частотной фильтрации, такие, как полосовые фильтры (ПФ) на ПАВ [2], являются важными компонентами современных систем связи, а радиометки [3] и датчики [4, 5] на ПАВ решают задачи идентификации и измерения внешних воздействующих факторов для раз-

личных приложений, в частности в системах промышленной автоматизации и для применения отдельных автономных датчиков.

При решении ряда задач, например синтезе топологии ПФ, обеспечивающей выполнение требований технического задания или спецификации в отношении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ), обычно необходимо установить функциональную зависимость указанных ча-

стотных характеристик от входных параметров элементов топологии. Аналитическое описание такой зависимости – сложная задача. Прямой перебор входных параметров тоже не приводит к необходимому результату, поскольку, с одной стороны, требует неоправданно длительного времени, а с другой – не всегда известна зависимость целевой функции от многочисленных входных параметров. Таким образом, актуально применение более адекватных и эффективных методов, которые позволят синтезировать и оптимизировать топологию устройства на ПАВ.

Синтез топологии устройства на ПАВ более сложен с математической точки зрения, чем непосредственный расчет характеристик фильтра, который является одним из ключевых (но не единственным) этапов при проектировании фильтра.

Настоящая статья описывает концепцию и построенный на ее основе программный комплексный подход, позволяющий выбрать топологию ПФ на ПАВ с заданными или предельно возможными характеристиками.

Концепция подхода. Успешный подход к решению задачи по разработке приборов на ПАВ с предельно достижимыми характеристиками [6, 7] возможен только на основе сопряжения конструктивных, технологических, материаловедческих, физических и схемотехнических принципов построения.

В основе концепции, позволяющей синтезировать ПФ с нужными характеристиками, лежит несколько фундаментальных блоков, отображенных на функциональной схеме (рис. 1):

- анализ технического задания;
- структурный синтез;
- параметрический синтез, содержащий в себе расчетный и оптимизационный модули;
- технологический (производство).

Анализ технического задания (ТЗ) позволяет определить требования разрабатываемого ПФ на ПАВ. Обобщив набор требований по параметрам, можно выделить следующие тенденции разработок ПФ на ПАВ:

- а) повышение рабочих частот;
- б) улучшение температурной стабильности [8, 9];
- в) увеличение входной мощности обрабатываемого сигнала [10];
- г) обеспечение предельных характеристик микроприборов на ПАВ [6, 11, 12]:



Рис. 1. Концепция подхода

Fig. 1. Conceptual approach

- снижение вносимого затухания;
- увеличение гарантированного относительного затухания в полосе заграждения;
- уменьшение неравномерности АЧХ в полосе пропускания;
- уменьшение неравномерности группового времени задержки (ГВЗ) в полосе пропускания;
- повышение селективности;
- минимизация коэффициента стоячей волны (КСВ).

Некоторые требования, например к АЧХ, можно представить в виде спецификаций или трафаретов частотной характеристики.

На рассматриваемом этапе необходимо проанализировать все технические требования, провести анализ существующих прототипов и технической литературы. Выявляются специфические требования проекта, позволяющие определить вариант исполнения фильтра. Проводится сравнительная оценка существующих решений и оценка вариантов возможного исполнения. Все варианты предложенного решения должны допускать возможности технической реализации.

На этапе анализа с опорой на перечисленные ранее данные и собственный опыт разработчика выдвигаются различные варианты выполнения задания, чем осуществляется переход к структурному синтезу. В результате анализа ТЗ целесообразность разработки избранного варианта ПФ обосновывается с технической точки зрения.

Структурный синтез. Особое место в процессе совершенствования акустоэлектронных

устройств занимают исследования и разработка новых рациональных, но в то же время нетривиальных топологических и схмотехнических решений, поскольку неудачный выбор топологии на стадии проектирования не может быть восполнен даже самыми современными подходами расчета и оптимизации. Наиболее остро значимость выбора и поиска новых топологических решений проявляется, когда возможности базовых и наиболее популярных решений исчерпаны и дальнейшее развитие наталкивается на существенные физические и технологические ограничения и противоречия.

Следует отметить, что, несмотря на значительные успехи в области технологии изготовления планарных устройств вообще и акустоэлектронных в частности, топология и схмотехнические решения не претерпели существенных изменений и базируются в основном на следующих элементах: встречно-штыревых преобразователях (ВШП), отражательных структурах (ОС) в виде полосок и канавок и ответвителях. Комбинация этих элементов формирует топологии различного типа. Понимание принципов работы и волновых процессов с сопряженными вторичными эффектами, от которых зависят рабочие характеристики

устройств, помогает на начальной стадии разработки выбрать наиболее подходящее решение.

Выбор типа прибора (архитектура или топологическое решение). Суть выбора – поиск реализации прибора в базе доступных решений или комбинации доступных элементов на основе опыта разработчика и физической реализуемости в рамках спецификации.

Этап структурного синтеза является основным, так как все преимущества и недостатки устройства определяются выбранной архитектурой. Успешное решение задачи синтеза в рамках традиционных подходов во многом определяется опытом разработчика и уровнем развития библиотеки базовых элементов и доступных стандартных решений. При использовании новых принципов и нетривиальных топологических решений синтез усложняется. Необходимо понять физику волновых процессов, после чего переходить к их моделированию и анализу топологии.

Типовые структуры приборов или топологических решений можно разделить на две большие группы [13, 14]:

- трансверсальные (рис. 2);
- резонаторные (рис. 3).

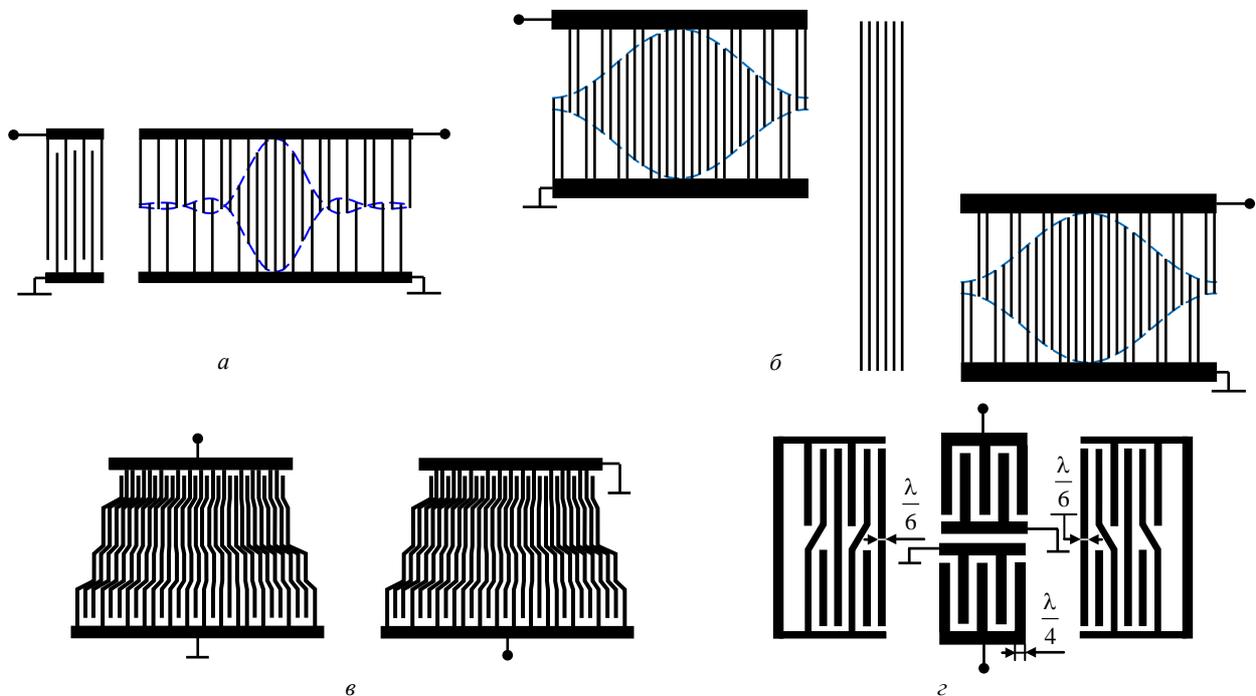


Рис. 2. Типовые структуры трансверсальных фильтров на ПАВ: а – одноканальная; б – двухканальная на основе МПО; в – веерная; з – кольцевая на основе реверсивного МПО

Fig. 2. Typical structures of transversal SAW filters: а – single channel; б – two channel based on multistrip couplers (MSC); в – quasi-fan; з – ring based on reversing MSC

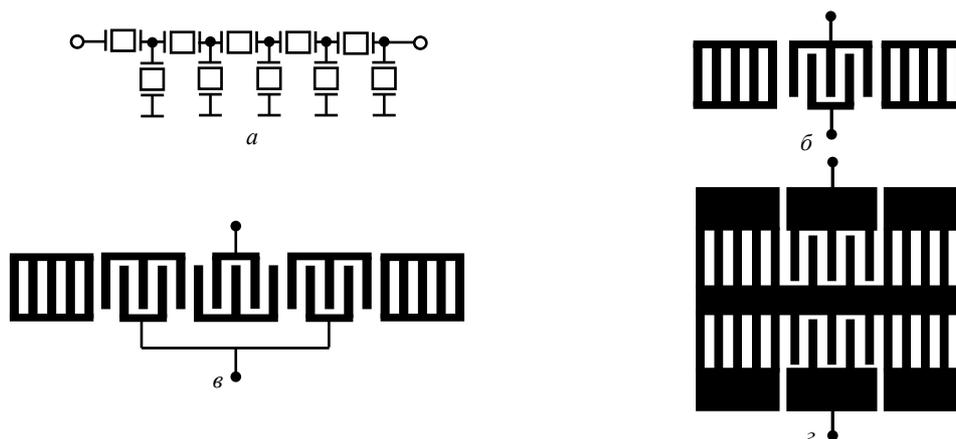


Рис. 3. Типовые резонаторных структуры на ПАВ: а – лестничная схема фильтра на основе однопортовых резонаторов; б – однопортовый резонатор; в – ПФ на основе продольных мод; г – ПФ на основе поперечных мод

Fig. 3. Typical structures of resonator SAW filters: а – ladder filters based on one-port resonators; б – one-port resonator; в – filter based on longitudinal modes; г – filter based on transverse modes

Базовые конструкции топологических решений для трансверсальных фильтров представлены одноканальной схемой (рис. 2, а), конструкцией на основе многополоскового ответвителя (МПО) (рис. 2, б), веерной структурой (рис. 2, в) и кольцевой структурой на основе реверсивного МПО (рис. 2, г).

Трансверсальные фильтры на ПАВ позволяют за счет амплитудной аподизации (показанной на рис. 2, а, б штриховой линией) и взвешивания ВШП создавать АЧХ и ФЧХ сложной формы с полосой пропускания до 80 %. Вносимые потери составляют $-6...-40$ дБ в зависимости от полосы пропускания. Преимуществом резонаторных фильтров являются малые вносимые потери: $-0.5...-4$ дБ. При этом реализуется полоса пропускания $0.01...10$ %.

К основным резонаторным структурам можно отнести лестничный фильтр (рис. 3, а) на основе однопортовых резонаторов (рис. 3, б), конструкции фильтров на продольных (рис. 3, в) и поперечных акустических модах (рис. 3, г).

Выбор материала подразумевает выбор пьезоэлектрического материала, его кристаллического среза и типа волны. Выбор материала тесно связан с выбранным топологическим решением.

На сегодняшний день наиболее широко применяемыми типами поверхностных волн для приборов на ПАВ являются [3] (рис. 4):

- волны Рэлея (рис. 4, а);
- вытекающие или псевдоповерхностные ПАВ (ВПАВ) (leaky surface acoustic wave – LSAW) (рис. 4, б);

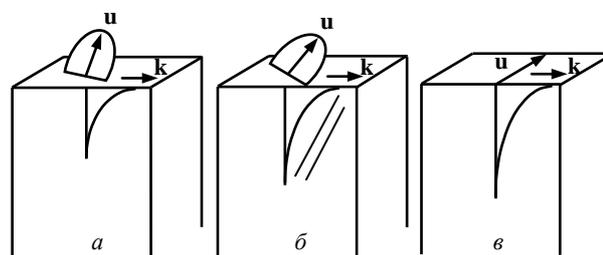


Рис. 4. Типы волн для устройств на ПАВ: а – волна Рэлея; б – вытекающая ПАВ; в – SH-волна (\mathbf{k} – направление распространения; \mathbf{u} – смещение)

Fig. 4. Wave types for SAW devices: а – Rayleigh wave; б – leaky SAW; в – SH-wave (\mathbf{k} – propagation direction; \mathbf{u} – displacement)

– волны с чисто сдвиговой горизонтальной поляризацией (shift horizontal – SH) (рис. 4, в). Одни из ярких представителей SH-волн – квазиповерхностные волны (surface transverse wave – STW).

Основные параметры наиболее используемых материалов приведены в табл. 1 [3, 15, 16]. К ним можно отнести скорость волны, коэффициент электромеханической связи (КЭМС), относительную эффективную диэлектрическую проницаемость (ДП) $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ (ϵ – абсолютная ДП; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ – абсолютная ДП вакуума), температурный коэффициент частоты (ТКЧ).

Как показывает практика, для каждого материала существует своя область применения.

Анализ вторичных эффектов. Для реализации предельных селективных параметров фильтра при выборе архитектуры и последующем расчете необходимо учитывать ряд эф-

Табл. 1. Параметры материалов

Tab. 1. Material parameters

Подложка	Основной тип волны	Скорость на свободной поверхности, м/с	ТКЧ, ppm/°C	КЭМС, %	Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r)	Применение
Ниобат лития LiNbO ₃ , Y-Z	Рэлея	3488	94	4.5	46	Широкополосные фильтры, линии задержки, ДЛЗ (трансверсальные фильтры)
Ниобат лития LiNbO ₃ , 128° Y-X	Рэлея	3981	75	5.5	56	Широкополосные фильтры, линии задержки, ДЛЗ (трансверсальные фильтры)
Танталат лития LiTaO ₃ , X-112° Y	Рэлея	3302	18	0.9	48	Полосовые фильтры (средние) (трансверсальные фильтры)
Кварц, 42.75° Y-X	Рэлея	3154	0.033	0.15	5.5	Узкополосные трансверсальные фильтры, ПФ на основе поперечных мод, резонаторы
Ниобат лития LiNbO ₃ , 64° Y-X	ВПАВ	4696	76	11.2	52	Резонаторные фильтры с малыми потерями
Ниобат лития LiNbO ₃ , 49° Y-X	ВПАВ	4748	79	14	60	Резонаторные фильтры с малыми потерями
Танталат лития LiTaO ₃ , 36° Y-X	ВПАВ	4225	35	5.5	50	Резонаторные фильтры с малыми потерями
Кварц, 36° Y-X+90°	STW	5000	0.033	0.11	5.5	Узкополосные фильтры, резонаторы

фактов "второго" порядка и различные механизмы потерь:

- потери на распространение (за счет вязкостных свойств материала и воздушной нагрузки);
- направленность преобразователя;
- паразитные отражения ПАВ внутри преобразователя, решетки;
- массэлектрические отражения от отдельного электрода;
- сигнал тройного прохождения (и другие сигналы многократного отражения);
- дифракционные потери;
- резистивные потери в электродах;
- возбуждение паразитных объемных акустических волн (ОАВ), распространяющихся в глубь подложки;
- генерацию гармоник ПАВ;
- потери на рассогласование;
- паразитные емкости и индуктивности контактных площадок и проводников, взаимные индуктивности;
- неоднородность распределения заряда по ширине электродов преобразователя;
- волноводный эффект.

Накопленный авторами настоящей статьи опыт проектирования устройств на ПАВ позволяет сделать вывод, что многие "вторичные" эффекты необходимо минимизировать еще на стадии структурного синтеза грамотным выбо-

ром параметров топологии и учета технологических особенностей при изготовлении.

Параметрический синтез. На этом этапе определяются параметры выбранной топологии, рассчитываются, анализируются и оптимизируются входные параметры.

Расчетный модуль. В результате реализации модуля рассчитываются рабочие характеристики прибора на ПАВ на основе набора входных параметров топологии и характеристик материала.

Физико-математическая модель. В основе моделирования приборов на ПАВ лежит замена сложного реального объекта на относительно простую, доступную и понятную для элементарного математического описания модель. В результате упрощения некоторые особенности реальных устройств, например различные "вторичные" эффекты, могут опускаться. Для их учета существуют различные модификации модели и ее дополнительные расширения.

В настоящей статье использована модифицированная модель связанных мод (МСМ), реализованная в среде MATLAB, и Р-матричный подход [17, 18]. С помощью МСМ можно рассчитать характеристики в виде полного набора Y-параметров, после чего по известным формулам теории цепей перейти к набору S-параметров, в том числе к АЧХ и ФЧХ фильтра.

Принцип расчета фильтров на ПАВ на основе МСМ и Р-матричного подхода графиче-

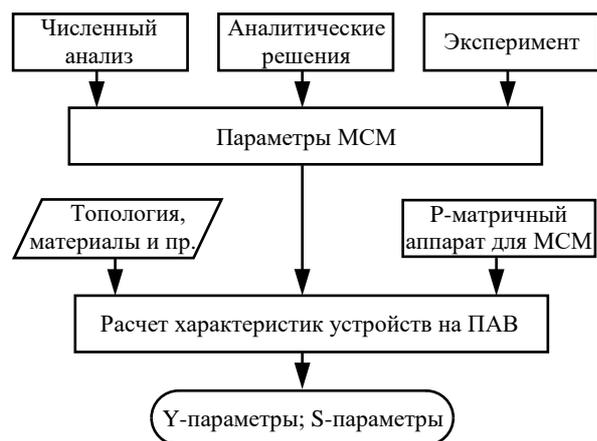


Рис. 5. Принцип расчета характеристик устройств на ПАВ

Fig. 5. Principle of calculating the SAW device responses

ски представлен на рис. 5. Одним из ключевых элементов расчета является ввод параметров материала. Параметры МСМ (скорость волны, коэффициент отражения, КЭМС и др.) не могут быть получены в рамках самой модели. Наиболее распространенными способами получения МСМ-параметров являются их извлечение из экспериментальных данных с последующим построением эмпирических зависимостей, аналитические решения или численные решения на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Параметры модели. В рамках подхода, представленного в настоящей статье, параметры МСМ извлекаются МКЭ из COMSOL – программного пакета, успешно применявшегося при решении ряда задач акустоэлектроники [19–21].

Для моделирования устройств на ПАВ необходимо определить следующие МСМ-параметры:

- скорость ПАВ на свободной и металлизированной поверхности;
- скорость ПАВ под элементами ВШП и ОС;
- коэффициент отражения ПАВ от электрода;
- коэффициент прохождения ПАВ через электрод;
- коэффициент электромеханической связи;
- затухание ПАВ в подложке;
- статическую емкость.

Для анализа и расчета МСМ-параметров применяется анализ собственных частот с помощью МКЭ [16]. В рамках рассматриваемой задачи вместо затухающей бегущей волны рассматриваются незатухающие стоячие волны, для ко-

торых можно определить собственные частоты.

Расчет и анализ собственных частот – один из способов анализа акустических мод, возбуждаемых в изучаемой топологической структуре или элементарной ячейке. Если создать условия, при которых ячейке сообщается энергия за счет пьезоэлектрического эффекта, а последующие внешние воздействия на колебательную систему отсутствуют, то в отсутствие потерь в ней возникнут незатухающие собственные (или свободные) колебания на частотах, называемых собственными. В ограниченных системах, в частности, в тестовой ячейке с конечными размерами, но с бесконечными периодическими условиями, может существовать ограниченный набор собственных колебаний (акустических мод). Каждая возбуждаемая на собственных частотах акустическая мода (ПАВ, ВПАВ, ОАВ и их гармоники) характеризуется отдельными формами колебания.

В силу симметрии при рассмотрении ячейки бесконечной периодической системы неоднородностей (металлических электродов) для анализируемой акустической моды фиксируется пара собственных частот, между которыми располагается полоса брэгговского отражения волн. Для решетки с конечной протяженностью вдоль направления распространения волны имеющиеся собственные частоты соответствуют нулям коэффициента отражения ограниченной системы поверхностных неоднородностей. В однородной ячейке без условий для отражения (полностью свободная или металлизированная поверхность) собственная частота рассматриваемой акустической моды будет единственной, поскольку отсутствует условие Брэгга (условие синхронного отражения волны от системы периодических неоднородностей).

При моделировании необходимо учитывать значительное число степеней свободы, относящихся к топологическим, конструктивным и технологическим особенностям устройств, а именно:

- тип элементарной структуры ВШП;
- профиль электрода;
- геометрию контактных площадок и шин преобразователя;
- тип отражательной структуры (электрически закороченная или разомкнутая);
- толщину металлизации;
- коэффициент металлизации.

Модуль оптимизации. Широкий круг задач оптимизации применительно к микроприборам на ПАВ рассмотрен в [22–28], где в частности использованы стандартные современные методы статистического анализа на генетических алгоритмах [22, 26].

Модуль оптимизации является одним из ключевых базисов разрабатываемого комплексного подхода к проектированию. В основе рассматриваемого подхода лежит метод случайного поиска, что позволяет выйти на глобальные оптимальные решения. Начальное состояние формируется случайным образом в диапазоне параметров топологии, заданных конструктором-разработчиком.

Модуль оптимизации анализирует полученное в результате расчета на текущей итерации решение и выполняет переход к следующей итерации. Оптимизации подвергаются лишь геометрические параметры топологии в пределах выбранной архитектуры прибора. Выбор материала и типа среза не закладывается в алгоритм автоматической оптимизации, а выполняется на предварительном этапе. Противоположный подход требует усложнения программы расчета, что является нецелесообразным [22]. В рамках подхода, рассмотренного в настоящей статье, в результате оптимизации должны быть определены параметры элементов топологии разрабатываемого прибора, предусмотренные выбранной на этапе структурного синтеза архитектурой.

Количество параметров оптимизации изменяется от десятков до сотен в зависимости от выбранной архитектуры фильтра. Основная сложность заключается в том, что изменение одного параметра ведет к изменению влияния и других параметров на выходные характеристики, что следует понимать как сложный комплексный вклад каждого параметра. Предположим, что оптимизируемая функция содержит много экстремумов. Метод случайного поиска позволяет варьировать многие параметры или переменные одновременно, находя при этом наиболее рациональное решение при оптимизации многоэкстремальных и многопараметрических функций.

Рассмотрим общую задачу условной оптимизации:

$$\max CF(\mathbf{x}), \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N), \\ x_i \in [a, b], i = 1, N$$

где $CF(\mathbf{x})$ – максимизируемая целевая функция (ЦФ), имеющая априори неизвестное число экстремумов.

В рассматриваемом случае задача многокритериальная. Имеет смысл свести ее в один комплексный критерий, обозначаемый как CF:

$$CF = \prod_{i=1}^N w_i CF_i(\mathbf{x}), \quad (1)$$

где N – количество критериев; w_i – весовой коэффициент i -го критерия, с помощью которого задается его приоритет; $CF_i(\mathbf{x})$ – целевая функция i -го критерия.

У частных критериев могут устанавливаться весовые коэффициенты w_i , учитывающие важность их вклада в ЦФ.

Мультипликативный принцип формирования комплексного критерия (1) выбран исходя из того, что для принятия решения необходимо полное выполнение ТЗ, т. е. выполнение всех частных критериев, что соответствует значению $CF=1$. Невыполнение хотя бы одного частного критерия обнуляет CF, тем самым решение отбрасывается. Преимущество мультипликативного формирования критерия по сравнению с традиционным подходом в виде суммы взвешенных частных критериев состоит в том, что реализованный в MATLAB алгоритм оптимизации базируется именно на таком принципе. Принципиально аддитивный и мультипликативный подходы к формированию комплексного критерия тождественны с точностью до выбора весовых коэффициентов.

Как правило, большинство практических задач характеризуется сложной зависимостью ЦФ от параметров, характеризующейся большим количеством локальных максимумов. Полный перебор параметров для нахождения абсолютного максимума таких функций или вообще неприменим, или затруднителен ввиду очень больших временных затрат. Для их уменьшения можно увеличить шаг анализа, но при этом снижается его точность, и за максимальное значение ЦФ может быть принято значение на скате глобального максимума. Ес-

ли же уменьшать шаг, то точность растет, но очень существенно увеличивается время анализа.

При случайном выборе значений параметров точность результата определится количеством итераций и задаваемым ограничением области исследуемых значений параметров.

В рассмотренном далее алгоритме оптимизации предполагается, что исходные параметры x имеют известные ограничения области определения. Прочая дополнительная информация о характере целевой функции и ее свойствах (дифференцируемость, непрерывность и т. д.) неизвестна и не учитывается в процессе поиска решения.

Комплексный критерий с помощью нормировки и весовых коэффициентов приводится к виду:

- $CF \geq 1$ удовлетворяет ТЗ;
- $CF < 1$ не удовлетворяет ТЗ.

На рис. 6 представлен алгоритм оптимизации для определения максимума ЦФ на базе двухэтапного анализа. Этапы определяются числом итераций: при числе итераций $k \leq N_1$ реализуется первый этап – метод случайного поиска решения задач на основе равномерного распределения параметров в некоторой широкой области определения; при $N_1 < k < N$ – второй этап – аналогичный поиск при нормальном законе распределения в более узкой области, выбранной после первого этапа.

Шаг 1. Ввод числа итераций, предусмотренных для этапов 1 и 2.

Шаг 2. Ввод границ спецификации и требований к характеристикам фильтра, на основании которых будет рассчитываться ЦФ.

Шаг 3. Установить базовые значения ЦФ. Например, если характеристика фильтра полностью удовлетворяют требованиям ТЗ, то значение ЦФ приравнивается к 1. Таким образом, если по каким-либо частным критериям в результате оптимизации будут наблюдаться превышения заданных параметров, текущее значение CF_{ik} будет больше 1, а если же по каким-либо частным критериям заданные параметры не достигают требований ТЗ, $CF_{ik} < 1$. Поскольку результат оптимизации заранее неизвестен, есть смысл установить некое поро-

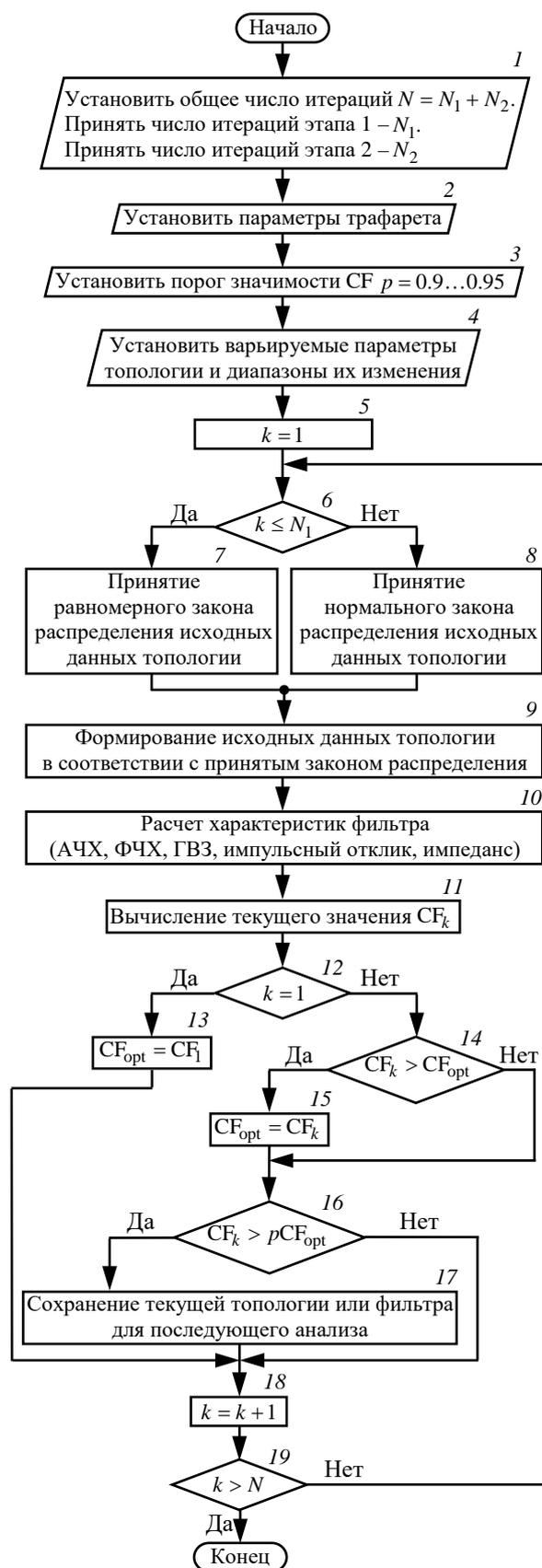


Рис. 6. Алгоритм поиска оптимального решения
 Fig. 6. Optimal solution search algorithm

вое значение ЦФ, при достижении которого результат оптимизации будет все же сохраняться и учитываться в дальнейшем.

Шаг 4. Установить параметры топологии, по которым будет происходить оптимизация, по сути, определить число степеней свободы. Также необходимо задать диапазон изменения параметров топологии на основе анализа ТЗ и возможности технической и технологической реализации.

Шаг 5. Установить счетчик $k = 1$.

Шаг 6. Для исходных данных топологии проверить условие:

а) если $k \leq N_1$, формирование исходных данных топологии осуществляется случайным образом по закону с равномерной функцией распределения;

б) если $k > N_1$, формирование исходных данных топологии осуществляется случайным образом по закону с нормальной функцией распределения, максимум которого соответствует наибольшему значению ЦФ на первом этапе.

Шаги 7 и 8. Определить закон распределения исходных данных топологии.

Шаг 9. Формируются исходные данные топологии в соответствии с принятым законом распределения.

Шаг 10. Запускается расчетный модуль. Расчет характеристик ПФ.

Шаг 11. Вычисляется значение функции ЦФ в текущей точке.

Шаги 12, 13. На первой итерации ($k = 1$) полученное значение ЦФ признается оптимальным.

Шаги 14, 15. Если полученное на текущей итерации значение ЦФ выше оптимального ($CF_k > CF_{opt}$), оно становится оптимальным.

Шаги 16, 17. Сохранение текущего состояния проекта, если значение ЦФ выше порогового ($CF_k > CF_1$).

Шаг 18. Приращение номера итерации.

Шаг 19. Проверка условия окончания процесса при $k > N$. В противном случае – переход к следующей итерации.

После окончания оптимизации необходимо проанализировать полученные рабочие характеристики и выбрать наилучшее компромисс-

ное решение из нескольких полученных, основываясь на эмпирическом опыте разработчика. Хотя в результате оптимизации и возможно получить наилучшее решение по максимуму ЦФ, однако в многокритериальных задачах абсолютно лучшее решение выбрать довольно сложно, поскольку при переходе от одного критерия к другому характеристики варьируются.

На основе представленного алгоритма разработана программа поиска максимума ЦФ, реализующая вышеописанный метод. Среда разработки – MATLAB.

Технологические особенности. От возможностей технологии изготовления приборов на ПАВ существенно зависят их характеристики. Выделим несколько важных моментов, которые показывают влияние технологии на структурный синтез, параметры ПАВ и на сходимость результата:

1. Применяемые способы литографии (прямая или обратная) влияют на профиль электрода, определяющий параметры волн, которые необходимо учитывать в аналитических моделях расчета.

2. Минимально достижимая ширина электрода определяет выбор типа преобразователя и архитектуру фильтра (на стадии структурного синтеза), поскольку этот параметр в первую очередь влияет на рабочую частоту устройства.

3. При изготовлении устройств необходимо выбирать окно процесса, обеспечивающее минимальное влияние технологических факторов производства. Правильный выбор окна процесса снижает неравномерность толщины и ширины электродов на пластине как по площади одного элемента (устройства/чипа), так и пластины в целом. На результат синтеза влияют такие критичные факторы, как ошибки при контроле времени экспонирования; неравномерность интенсивности ультрафиолетового излучения в рабочем поле установки; неравномерность фоторезиста на пластине и ее кривизна и т. д. [29, 30].

Технология, полученная в результате проектирования, должна обеспечивать повторяемость изделий при изготовлении и соответствие расчетных характеристик экспериментальным. Эти условия выполнимы, если все технологические этапы производства отработаны и соответствуют прецизионным требованиям.

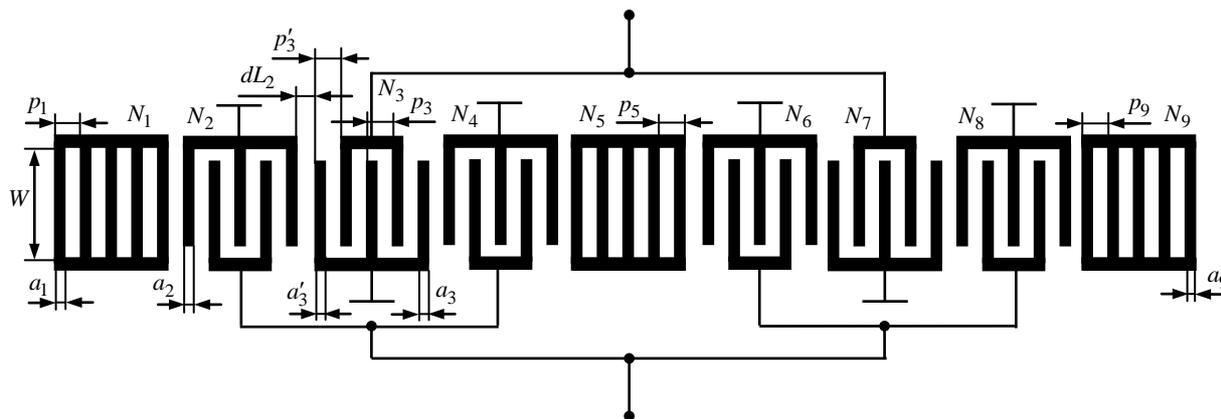


Рис. 7. Топология одной секции фильтра на продольных резонансных модах: W – апертюра; N – число электродов; p – период следования электродов; a – ширина электрода основного блока; a' – ширина электрода на краях блока; p' – период следования электродов на краях блока; dL – зазор между блоками

Fig. 7. Topology of one section filter on longitudinal resonant modes: W – aperture; N – number of electrodes; p – pitch of electrodes; a – electrode width of main block; a' – electrode width at the edges of the block; p' – pitch of electrodes at the edges of the block; dL – gap

Апробация. На основе предложенной концепции спроектирован резонаторный фильтр на ВПАВ на пьезоэлектрической подложке 64° УХ-среза ниобата лития. Фильтр состоит из двух секций фильтра на продольных резонансных модах (Double Mode SAW filter – DMS). На рис. 7 представлена топология первой секции фильтра и показаны основные топологические параметры: апертюра, количество, перио-

ды следования и ширина электродов ВШП и ОС, зазоры между ВШП и ОС. Исходя из особенностей работы резонаторных фильтров некоторые параметры полученной топологии являются взаимно зависимыми. Поэтому количество степеней свободы для этой конструкции не будет равно числу параметров. Параметры, по которым будет проходить оптимизация, представлены в табл. 2. Число независимых

Табл. 2. Параметры топологии, по которым проводится оптимизация, и их предельные значения

Tab. 2. Topology parameters used for optimization and their limit values

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Минимум	Максимум
Апертура	W	Длина волны	15	45
Толщина металлизации	H_m	мкм	0.1	0.5
Количество электродов ВШП	$N_2 = N_4 = N_6 = N_8$	–	5	75
Количество электродов ВШП	$N_3 = N_7$	–	5	75
Количество ОС	N_1	–	8	100
Количество ОС	N_5	–	8	100
Количество ОС	N_9	–	8	100
Зазоры	$dL_2 = dL_3 = dL_6 = dL_7$	Длина волны	0	1
Период следования электродов ВШП	$p_2 = p_3 = p_4 = p_6 = p_7 = p_8$	мкм	3.9	4.2
Период следования электродов на краях ВШП	$p'_2 = p'_3 = p'_4 = p'_6 = p'_7 = p'_8$	мкм	3.9	4.2
Период следования электродов ОС	p_1	мкм	3.9	4.2
Период следования электродов ОС	p_5	мкм	3.9	4.2
Период следования электродов ОС	p_9	мкм	3.9	4.2
Коэффициент металлизации электродов ВШП	$C_{m2} = C_{m3} = C_{m4} = C_{m6} = C_{m7} = C_{m8}$	–	0.3	0.7
Коэффициент металлизации электродов на краях ВШП	$C'_{m2} = C'_{m3} = C'_{m4} = C'_{m6} = C'_{m7} = C'_{m8}$	–	0.3	0.7
Коэффициент металлизации электродов ВШП ОС	C_{m1}	–	0.3	0.7
Коэффициент металлизации электродов ВШП ОС	C_{m5}	–	0.3	0.7
Коэффициент металлизации электродов ВШП ОС	C_{m9}	–	0.3	0.7

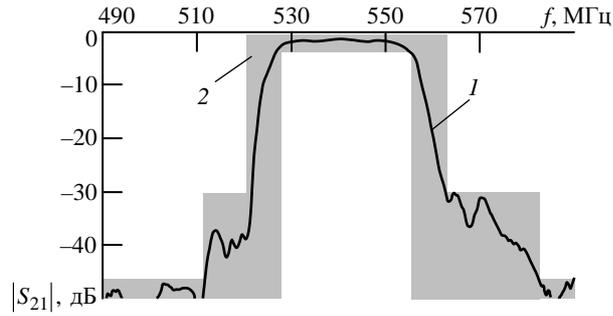


Рис. 8. Типовая АЧХ фильтра (1), вписанная в рамки заданной спецификации (2)

Fig. 8. Typical frequency response (1) within the given specification (2)

Табл. 3. Основные параметры ПФ

Tab. 3. Main filters parameters

Параметр	Значение
Рабочая (номинальная) частота, МГц	540
Вносимое затухание не более, дБ	-1.5
Полоса пропускания по уровню -2 дБ, МГц	28
Полоса пропускания по уровню -28 дБ не более, МГц	42
Неравномерность вносимого затухания в полосе пропускания не более, дБ	1
Гарантированное относительное затухание при отстройке от средней частоты на +40 МГц, дБ	-45
Гарантированное относительное затухание при отстройке от средней частоты на -30 МГц, дБ	-45

параметров составляет 17. Даже если каждый параметр получит 5–6 возможных значений, количество возможных топологий – более 10^{10} . На примере представленной конструкции рассмотрим процесс оптимизации топологии.

Задание на оптимизацию соответствует спецификации фильтра, представленной на рис. 8 и в табл. 3.

На рис. 9, 10 представлены результаты оптимизации параметров фильтра. Максимальное число итерации установлено 6400. Расчет ЦФ

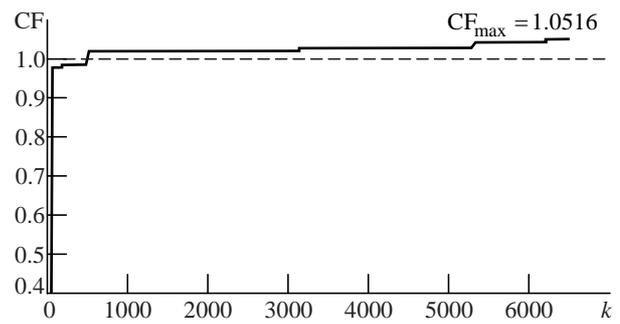


Рис. 9. Работа оптимизационного алгоритма на примере зависимости ЦФ в от числа итераций

Fig. 9. Operation of the optimization algorithm on the example of the dependence of the objective function on the number of iterations

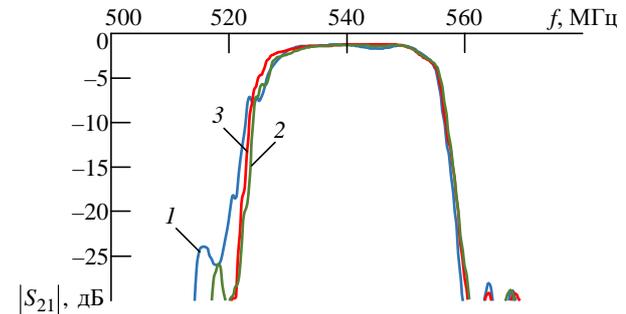


Рис. 10. Получение оптимального решения для резонаторного фильтра (1 – итерация № 35; 2 – итерация № 500; 3 – итерация № 6205)

Fig. 10. Obtaining of the optimal solution for the resonator filter

(1 – iteration № 35; 2 – iteration № 500; 3 – iteration № 6205)

показал, что потребовалось около 600 итераций, чтобы выйти на значение $CF > 1$. Это полностью соответствует требованиям спецификации. В интервале итераций 5200...6400 происходил более детальный анализ в окрестностях значений параметров, соответствующих наилучшим значениям ЦФ, и, как следует из рис. 9, максимум ЦФ при этом был еще раз улучшен.

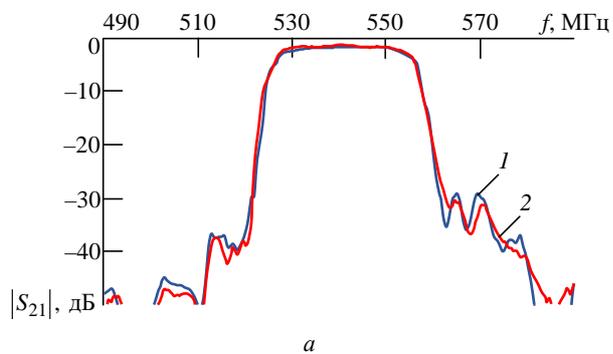
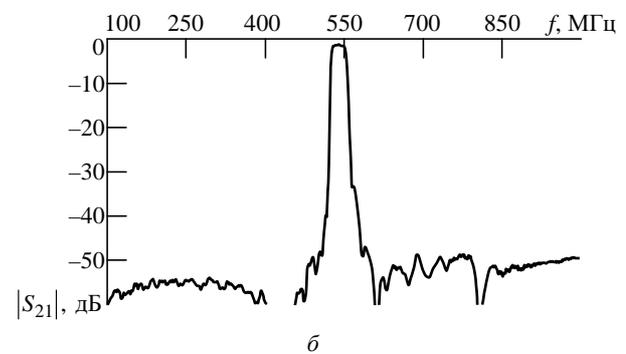


Рис. 11. АЧХ фильтра: а – сравнение расчетной (1) и измеренной (2) характеристик; б – измеренная характеристика в широком диапазоне частот

Fig. 11. Filter frequency response: а – comparison of calculated (1) and measured (2) responses; б – measured response over a wide frequency range



На рис. 11 представлены результаты расчета и измерения АЧХ разработанного резонаторного ПФ на ПАВ.

Как видно из сравнения характеристик, достигнуто хорошее их совпадение. Вносимые потери –1.25 дБ. Относительная полоса пропускания по уровню –2 дБ 5.2 %. Неравномерность в полосе –0.5 дБ. Подавление в полосе заграждения в ближней зоне –30...–40 дБ (рис. 11, а), в дальней зоне –48 дБ (рис. 11, б).

Заключение. Представлено описание комплексного подхода и концепции построения системы автоматизированного проектирования ПФ на ПАВ. Предложен оригинальный метод оптимизации топологии устройств на ПАВ. Проведена апробация подхода на примере рас-

чета и оптимизации ПФ на ВПАВ на 64° УХ-среде ниобата лития. Предложенный подход к проектированию фильтра на ПАВ позволяет быстро и относительно точно прогнозировать рабочие характеристики на стадии моделирования, а следовательно, уменьшить количество экспериментальных итераций и повысить эффективность разработки.

Результаты моделирования на основе МСМ подтверждаются результатами измерений характеристик экспериментальных образцов, что свидетельствует об адекватности рассмотренного подхода к моделированию. Представленный подход можно рассматривать как инструмент прогнозирования и оценки характеристик разрабатываемых фильтров на ПАВ.

Список литературы

1. Гуляев Ю. В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // Успехи физ. наук. 2005. Т. 175, № 8. С. 887–895. doi: 10.3367/UFN.0175.200508h.0887
2. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства / Г. М. Аристархов, Ю. В. Гуляев, В. Ф. Дмитриев и др.; под ред. Ю. В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2020. 504 с.
3. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / О. Л. Балышева, В. И. Григорьевский, Ю. В. Гуляев и др.; под ред. Ю. В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2012. 576 с.
4. Анцев И. Г., Богословский С. В. Эволюция систем мониторинга на основе меток и датчиков на поверхностных акустических волнах // Инновации. 2015. № 12. С. 115–122.
5. Пассивные беспроводные датчики и радиометки на принципах функциональной электроники / И. Г. Анцев, С. В. Богословский, Г. А. Сапожников, С. А. Жгун, А. Р. Жежерин, А. Н. Трофимов, А. С. Швецов. М.: Наука, 2021. 518 с.
6. Койгеров А. С. Достижение критических и предельных параметров в микроприборах на поверхностных акустических волнах // Нано- и микро-системная техника. 2022. Т. 24, № 4. С. 199–207. doi: 10.17587/nmst.24.199-207
7. Морозов А. И., Проклов В. В., Станковский Б. А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1981. 184 с.
8. Good Temperature Coefficient of Frequency SAW resonator on a SiO₂/Al/LiNbO₃ Structure / H. Nakanishi, H. Nakamura, T. Tsurunari, J. Fujiwara, Y. Hamaoka, K. Hashimoto // Int. IEEE Ultrasonics Symp. San Diego, USA, 11–14 Oct. 2010. IEEE, 2011. P. 1298–1301. doi: 10.1109/ULTSYM.2010.5935465
9. I.H.P. SAW Technology and its Application to Microacoustic Components (Invited) / T. Takai, H. Iwamoto, Y. Takamine, T. Fuyautsume, T. Nakao,

- M. Hiramoto, T. Toi, M. Koshino // IEEE Intern. Ultrasonics Symp. (IUS), Washington, DC, 6–9 Sept. 2017. IEEE, 2017. 8 p. doi: 10.1109/ULTSYM.2017.8091876
10. Фильтры на поверхностных акустических волнах с высокой входной мощностью для систем связи, радиолокационной и телекоммуникационной аппаратуры на номинальную частоту 2170 МГц / С. А. Никитов, А. С. Багдасарян, С. Н. Кондратьев, Т. В. Сеницына, О. В. Машинин, А. С. Груздев // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 4. С. 389–394. doi: 10.7868/S0033849416040100
11. Фильтры на ПАВ с малыми потерями – одно из главных конкурентных преимуществ техники ПАВ / А. С. Багдасарян, Ю. В. Гуляев, С. А. Доберштейн, Т. В. Сеницына // Техника радиосвязи. 2019. № 3 (42). С. 86–98. doi: 10.33286/2075-8693-2019-42-86-98
12. Применение однонаправленных встречно-штырьевых преобразователей при проектировании фильтров на поверхностных акустических волнах / И. Г. Анцев, С. В. Богословский, Г. А. Сапожников, А. Р. Жежерин // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 2. С. 58–70.
13. Устройства частотной селекции на ПАВ в современных системах связи, радиолокации и телекоммуникации / А. Багдасарян, Т. Сеницына, О. Машинин, П. Иванов, Р. Егоров // Электроника: наука, технология, бизнес. 2013. № 8. С. 128–136.
14. Прапорщиков В., Орлов В. Фильтры на ПАВ. Краткий обзор и методы расчета // СВЧ-электроника. 2020. № 3. С. 40–47.
15. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. N. Y.: Academic Press, 2010. 448 p.
16. Койгеров А. С., Балышева О. Л. Быстрый численный расчет параметров поверхностных акустических волн Рэлея для модели связанных мод // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 5. С. 67–79. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79

17. Дмитриев В. Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134–1143.

18. Койгеров А. С. Аналитический подход к расчету резонаторного комбинированного фильтра на поверхностных акустических волнах на основе модели связанных мод // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 2. С. 16–28. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28

19. Тимошенко П. Е., Широков В. Б., Калинин В. В. Конечно-элементное моделирование характеристик ПАВ-фильтров на основе тонких пленок титаната бария стронция // Экологический вестн. науч. центров черноморского экономического сотрудничества. 2020. Т. 17, № 4. С. 48–56. doi: 10.31429/vestnik-17-4-48-56

20. 3D Finite Element Modeling of Real Size SAW Devices and Experimental Validation / S. Zhgoon, D. Tsimbal, A. Shvetsov, K. Bhattacharjee // IEEE Ultrasonics Symp. Beijing, China, 02–05 Nov. 2008. P. 1932–1935. doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0476

21. Влияние апертуры встречно-штыревого преобразователя на характеристики его выходного сигнала в пьезоэлектрической пластине / И. Е. Кузнецова, А. В. Смирнов, Ю. В. Плеханова, А. Н. Решетилов, Г.-Ц. Ван // Изв. РАН. Сер. физическая. 2020. Т. 84, № 6. С. 790–793. doi: 10.31857/S0367676520060162

22. Бугаев А. С., Горский В. Б. Система оптимизации выходных характеристик электронных компонент // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 10. С. 1266–1276.

23. Бауск Е. В., Одаренко О. И. Оптимизация характеристик фильтров на поверхностных акусти-

ческих волнах с помощью критерия минимакса // Автоматика. 2001. № 4. С. 18–25.

24. Hybrid optimization techniques for the design of SAW-filters / J. Franz, C. C. W. Ruppel, F. Seifert, R. Weigel // IEEE Ultrasonic Symp. Proc. Toronto, Canada, 05–08 Oct. 1997. P. 33–36. doi: 10.1109/ULTSYM.1997.662974

25. Bi F. Z., Pyman A. C. A Fast Algorithm of Designing Minimum Phase Transducer and Its Application to SPUDT Design // IEEE Symp. on Ultrasonics, Honolulu, USA, 05–08 Oct. 2003. Vol. 1. P. 522–525. doi: 10.1109/ULTSYM.2003.1293457

26. Genetic optimization algorithms in design of coupled SAW / J. Meltaus, P. Hämmäläinen, M. M. Salomaa, V. P. Plessky // IEEE Ultrasonic Symp., Montreal, Canada, 23–27 Aug. 2004. Vol. 3. P. 1901–1904. doi: 10.1109/ULTSYM.2004.1418202

27. Bausk E., Taziev R., Lee A. Synthesis of Slanted and Quasi-Slanted SAW Transducers // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2004, Vol. 51, iss. 8. P. 1002–1009. doi: 10.1109/TUFFC.2004.1324404

28. Ruppel C. C. W., Sachs A. A., Seifert F. J. A Review of Optimization Algorithms for the Design of SAW Transducers // IEEE Ultrasonic Symp., Orlando, USA, 08–11 Dec. 1991. P. 73–83. doi: 10.1109/ULTSYM.1991.234131

29. Optical and EUV projection lithography: A computational view / A. Erdmann, T. Fuhner, P. Evanschitzky, V. Agudelo, C. Freund, P. Michalak, D. Xu // Microelectronic Engineering. 2015. Vol. 132. P. 21–34. doi: 10.1016/j.mee.2014.09.011

30. Mack C. A. Inside PROLITH: A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation. URL: https://lithoguru.com/scientist/litho_papers/Inside_PROLITH.pdf (дата обращения 19.01.2024)

Информация об авторах

Койгеров Алексей Сергеевич – кандидат технических наук (2011), доцент (2021) кафедры микро- и наноэлектроники (МНЭ) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 45 научных публикаций. Сфера научных интересов – моделирование и проектирование приборов на поверхностных акустических волнах, анализ волновых процессов в COMSOL. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: a.koigerov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>

Корляков Андрей Владимирович – доктор технических наук (2011), профессор (2013) кафедры микро- и наноэлектроники (МНЭ) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 125 научных публикаций. Сфера научных интересов – микро-электромеханические системы. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: akorl@yandex.ru

References

1. Gulyaev Yu. V. Acoustoelectronics (historical review). *Physics-Uspekhi*. 2005, vol. 48, no. 8, pp. 847–855. doi: 10.1070/PU2005v048n08ABEH002840

2. Aristarkhov G. M., Gulyaev Yu. V., Dmitriev V. F., Zajchenko K. V., Komarov V. V. *Fil'tratsiya i spektral'nyi analiz radiosignalov. Algoritmy. Struktury*.

Ustroistva [Filtration and Spectral Analysis of Radio Signals]. Ed. by Yu. V. Gulyaev. Moscow, *Radiotekhnika*, 2020, 504 p. (In Russ.)

3. Balysheva O. L., Grigoryevskiy V. I., Gulyaev Yu. V. et al. *Akustoelektronnyye ustrojstva obrabotki i generacii simalov. Principy raboty, rascheta i proektirovaniya* [Acoustoelectronic Signal Processing and Generation Devices: Principles of Operation, Calculation and Design]. Ed. by Yu. V. Guljaev. Moscow, *Radiotekhnika*, 2012, 576 p. (In Russ.)

4. Antcev I. G., Bogoslovsky S. V. Development of Monitoring Systems on the Basis of Tags and Sensors Based on Surface Acoustic Waves. *Innovations*. 2015, vol. 12, pp. 115–122. (In Russ.)

5. Antcev I. G., Bogoslovsky S. V., Sapognikov G. A., Zhgoon S. A., Zhezherin A. R., Trofimov A. N., Shvetsov A. S. *Passivnyye besprovodnyye datchiki i radiometki na printsipakh funktsional'noy elektroniki* [Passive Wireless Sensors and Radio Tags Based on the Principles of Functional Electronics]. Moscow, *Nauka*, 2021, 518 p. (In Russ.)

6. Koigerov A. S. Achievement of Critical and Limiting Parameters in Surface Acoustic Wave Micro-devices. *Nano-I mikrosistemnaya tekhnika*. 2022, vol. 24, no. 4, pp. 199–207. doi: 10.17587/nmst.24.199-207 (In Russ.)

7. Morozov A. I., Proklov V. V., Stankovskii B. A. *P'yezoelektricheskiye preobrazovateli dlya radioelektronnykh ustroystv* [Piezoelectric Transducers for Radio-Electronic Devices]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1981, 184 p. (In Russ.)

8. Nakanishi H., Nakamura H., Tsurunari T., Fujiwara J., Hamaoka Y., Hashimoto K. Good Temperature Coefficient of Frequency SAW resonator on a SiO₂/Al/LiNbO₃ Structure. *Int. IEEE Ultrasonics Symp. San Diego, USA, 11–14 Oct. 2010. IEEE, 2011*, pp. 1298–1301. doi: 10.1109/ULTSYM.2010.5935465

9. Takai T., Iwamoto H., Takamine Y., Fuyautsume T., Nakao T., Hiramoto M., Toi T., Koshino M. I.H.P. SAW Technology and its Application to Microacoustic Components (Invited). *IEEE Intern. Ultrasonics Symp. (IUS)*, Washington, DC, 6–9 Sept. 2017. *IEEE, 2017*, 8 p. doi: 10.1109/ULTSYM.2017.8091876

10. Nikitov S. A., Bagdasaryan A. S., Kondrat'ev S. N., Sinitsyna T. V., Mashinin O. V., Gruzdev A. S. Surface-Acoustic-Wave Filters with a High Input Power for a Nominal Frequency of 2170 MHz for Communication Systems and Radar and Telecommunications Equipment. *J. of Communications Technology and Electronics*. 2016, vol. 61, no. 4, pp. 443–448. doi: 10.1134/S1064226916040100

11. Bagdasaryan A. S., Gulyaev Yu. V., Doberstein S. A., Sinitsina T. V. Low-loss SAW Filters – One of Major Competitive Advantages of SAW Technology. *Radio Communication Technology*. 2019, no. 3 (42), pp. 86–98. doi: 10.33286/2075-8693-2019-42-86-98 (In Russ.)

12. Antcev I. G., Bogoslovsky S. V., Sapognikov G. A., Zhezherin A. R. Single-Phase Unidirectional Transducers and Their Application to Surface Acoustic Wave Filter Design. *Iss. of Radio Electronics*. 2019, no. 2, pp. 58–70. (In Russ.)

13. Bagdasaryan A., Sinitzina T., Mashinin O., Ivanov P., Egorov R. SAW Frequency Selection Devices for Modern Communication, Radiolocation and Telecommunication Systems. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2013, no. 8, pp. 128–136. (In Russ.)

14. Praporshchikov V., Orlov V. SAW Filters. Brief Overview and Calculation Methods. *Microwave Electronics*. 2020, no. 3, pp. 40–47. (In Russ.)

15. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. Academic Press, 2010, 448 p.

16. Koigerov A. S., Balysheva O. L. Rapid Numerical Calculation of Rayleigh Surface Acoustic Wave Parameters for a Model of Coupling Modes. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 5, pp. 67–79. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79 (In Russ.)

17. Dmitriev V. F. Modified Equations of Coupled Surface Acoustic Waves. *J. of Communications Technology and Electronics*. 2009, vol. 54, no. 9, pp. 1077–1086. doi: 10.1134/S1064226909090137

18. Koigerov A. S. Analytical Approach to Designing a Combined-Mode Resonator Filter on Surface Acoustic Waves Using the Model of Coupling of Modes. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2022, vol. 25, no. 2, pp. 16–28. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28 (In Russ.)

19. Timoshenko P. E., Shirokov V. B., Kalinchuk V. V. Finite-Element Modeling of SAW-Filters Based on Thin Films of Barium Strontium Titanate. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 2020, vol. 17, no. 4, pp. 48–56. doi: 10.31429/vestnik-17-4-48-56 (In Russ.)

20. Zhgoon S., Tsimbal D., Shvetsov A., Bhattacharjee K. 3D Finite Element Modeling of Real Size SAW Devices and Experimental Validation. *IEEE Intern. Ultrasonics Symp. Beijing, China, 2008*, pp. 1932–1935. doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0476

21. Kuznetsova I. E., Smirnov A. V., Plekhanova Y. V., Reshetilov A. N., Wang G.-J. Effect of the Aperture Interdigital Transducer on the Characteristics of Its Output Signal in a Piezoelectric Plate. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020, vol. 84, no. 6, pp. 644–647. doi: 10.3103/S1062873820060143

22. Bugaev A. S., Gorskiy V. B. A System for Optimization of the Output Characteristics of Electron Components. *Radiotekhnika i Elektronika*. 2009, vol. 54, no. 10, pp. 1266–1276. (In Russ.)

23. Bausk E. B., Odarenko O. I. Optimization of Characteristics Filters on Surface Acoustic Waves with Help Minimax Criteria. *Autometrics*. 2001, no. 4, pp. 18–25. (In Russ.)

24. Franz J., Ruppel C. C. W., Seifert F., Weigel R. Hybrid optimization techniques for the design of SAW-filters. *IEEE Ultrasonic Symp. Proc., Toronto, Canada, 05–08 Oct. 1997*, pp. 33–36. doi: 10.1109/ULTSYM.1997.662974

25. Bi F. Z., Pyman A. C. A Fast Algorithm of Designing Minimum Phase Transducer and Its Application

to SPUDT Design. IEEE Symp. on Ultrasonics. Honolulu, USA, 05–08 Oct. 2003, vol. 1, pp. 522–525. doi: 10.1109/ULTSYM.2003.1293457

26. Meltaus J., Hämäläinen P., Salomaa M. M., Plessky V. P. Genetic Optimization Algorithms in Design of Coupled SAW. IEEE Ultrasonic Symp. Montreal, Canada, 23–27 Aug. 2004, vol. 3, pp. 1901–1904. doi: 10.1109/ULTSYM.2004.1418202

27. Bausk E., Taziev R., Lee A. Synthesis of Slanted and Quasi-Slanted SAW Transducers. IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2004, vol. 51, iss. 8, pp. 1002–1009. doi: 10.1109/TUFFC.2004.1324404

28. Ruppel C. C. W., Sachs A. A., Seifert F. J. A Review of Optimization Algorithms for the Design of SAW Transducers. IEEE Ultrasonic Symp. Orlando, USA, 08–11 Dec. 1991, pp. 73–83. doi: 10.1109/ULTSYM.1991.234131

29. Erdmann A., Fuhner T., Evanschitzky P., Agudelo V., Freund C., Michalak P., Xu D. Optical and EUV Projection Lithography: A Computational View. Microelectronic Engineering. 2015, vol. 132, pp. 21–34. doi: 10.1016/j.mee.2014.09.011

30. Mack C. A. Inside PROLITH: A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation. Available at: https://lithoguru.com/scientist/litho_papers/Inside_PROLITH.pdf (accessed 19.01.2024)

Information about the authors

Aleksey S. Koigerov – Cand. Sci. (Eng) (2011), Associate Professor (2021) of the Department of Micro- and Nano Electronics (MNE) of Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of 45 scientific publications. Area of expertise: modeling and design of devices based on surface acoustic waves.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia

E-mail: a.koigerov@gmail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>

Andrey V. Korlyakov – Dr. Sci. (Eng) (2011), Professor (2013) of the Department of Micro- and Nano Electronics (MNE) of Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of 125 scientific publications. Area of expertise: MEMS.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia

E-mail: akorl@yandex.ru
