

Автоматизация проектирования полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах

А. С. Койгеров

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

a.koigerov@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрен подход к проектированию полосовых фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Среди множества требований к полосовым фильтрам на ПАВ можно выделить не только требования к качеству характеристик – уменьшение вносимого затухания в полосу пропускания, увеличение гарантированного относительного затухания в полосе заграждения и т. д., но и требования по сокращению времени разработки фильтра. Уменьшение времени разработки с одновременным снижением затрат на нее достигается путем предварительного моделирования. Данную задачу можно решить за счет использования системы автоматизированного проектирования с возможностью решения задач оптимизации с большим числом степеней свободы. Рассчитан и изготовлен резонаторный фильтр на вытекающих ПАВ на подложке 36° Y-X среза танталата лития.

Ключевые слова: акустоэлектроника; поверхностная акустическая волна; фильтр на ПАВ; МКЭ; модель связанных мод; оптимизация

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день устройства, использующие поверхностные акустические волны (ПАВ) — включая полосовые фильтры, линии задержки и резонаторы — активно применяются в разнообразной электронной аппаратуре, предназначенной для систем связи, радиолокации и телекоммуникации. Наибольшая востребованность подобных устройств наблюдается в частотном диапазоне от нескольких десятков мегагерц до 2,5–3 ГГц [1–3].

Одной из приоритетных задач в области проектирования устройств на ПАВ является повышение точности вычислений при одновременном сокращении сроков разработки и снижении сопутствующих ресурсных затрат. Анализ публикаций [4–6] демонстрирует высокий уровень интереса к моделированию с использованием метода конечных элементов, отличающегося высокой вычислительной нагрузкой и значительными временными затратами. Повышение эффективности проектного процесса может быть обеспечено внедрением автоматизированных систем, основанных на аналитических расчетных методах с возможностью проведения параметрической оптимизации [7, 8].

Цель настоящей работы состоит в формировании и обосновании методологического подхода к проектированию, а также в разработке программного комплекса, реализующего моделирование устройств на ПАВ и обеспечивающего оптимизацию параметров топологии полосового фильтра на ПАВ.

II. КОНЦЕПЦИЯ ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Предложенный подход к синтезу устройств с заданными параметрами основан на интеграции ряда ключевых функциональных модулей, представленных на схеме (рис. 1). Методология включает следующие этапы: аналитический этап, включающий анализ технического задания; этап структурного синтеза; этап параметрического синтеза; а также технологический этап, охватывающий процессы изготовления устройства.

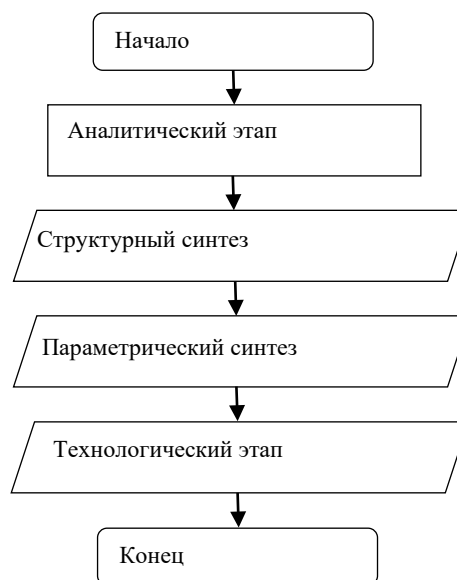


Рис. 1. Блок-схема подхода

A. Аналитический этап

Аналитический этап включает детальное исследование технических требований, анализ существующих прототипов, а также обзор литературы. На данном этапе формулируются специфические проектные ограничения и предпочтения, на основе которых осуществляется выбор наиболее рациональной конструктивной схемы фильтра. Проводится сравнительный анализ доступных решений и оценка альтернативных вариантов реализации с точки зрения технической осуществимости. В результате, опираясь на собранные данные и профессиональный опыт разработчика, формируется множество возможных подходов к решению задачи, что служит основанием для перехода к следующему этапу – структурному синтезу.

В. Структурный синтез

Формирование топологии фильтра представляет собой ключевую задачу этапа структурного синтеза. Несмотря на значительный прогресс в технологиях производства планарных и акустоэлектронных устройств, конструктивные и схемотехнические решения остаются во многом традиционными. Они продолжают основываться на использовании базовых элементов: встречно-штыревых преобразователей (ВШП), отражающих структур и ответвителей. Разнообразие топологий достигается за счёт различных способов их комбинирования. Выбор наиболее рациональной архитектуры требует не только инженерной интуиции, но и глубокого понимания физических принципов распространения акустических волн, а также сопутствующих вторичных эффектов, способных оказывать влияние на функциональные характеристики устройств. Именно на ранней стадии проектирования такое понимание позволяет принять обоснованные решения и обеспечить оптимальные параметры разрабатываемого изделия.

С. Параметрический синтез

Этап параметрического синтеза направлен на определение числовых параметров ранее выбранной топологии, а также на расчёт, анализ и последующую оптимизацию рабочих характеристик устройства. В рамках данного этапа задействуются два ключевых функциональных блока: модуль расчёта, обеспечивающий моделирование характеристик устройства на основе заданных параметров, и модуль оптимизации, реализующий процедуру подбора наилучших значений параметров топологии с учётом заданных критериев.

Д. Расчетный блок

Расчётный модуль (рис. 2) отвечает за определение рабочих характеристик устройства на основе входных данных, включающих параметры топологии, свойства используемого материала, а также параметры выбранной физико-математической модели.

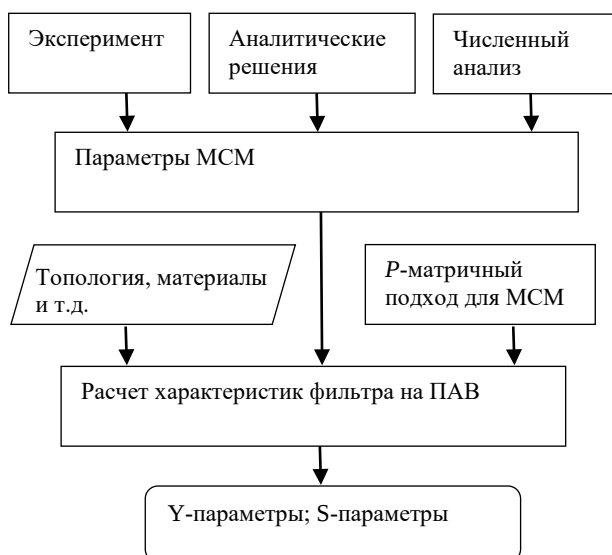


Рис. 2. Принцип расчета частотных характеристик устройств на ПАВ

В рамках настоящей работы в качестве аналитического метода расчета используется модифицированная модель связанных мод (МСМ), реализованная с применением P -матричного формализма [9].

Исходя из того, что топология устройства состоит из некоторого числа ВШП, отражательных структур и зазоров, на данном шаге необходимо указанные блоки разбить на элементарные секции на уровне электродов, элементарных отражателей и непосредственно зазоров. Представление электродов ВШП в виде элементарных блоков P -матриц представлено на рис. 3, где λ – длина акустической волны, p – период следования соседних электродов, a – ширина электрода. R_i , S_i ($i=1...4$) – входные и выходные волны элементарных секций соответственно.

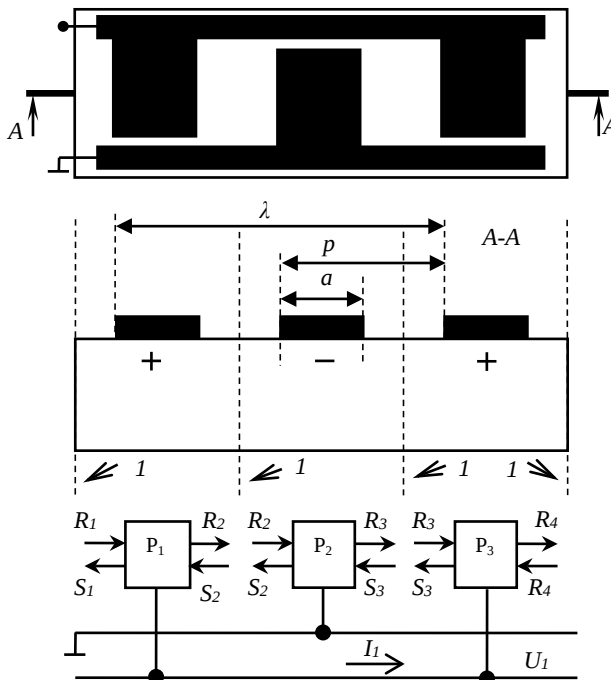


Рис. 3. Электроды ВШП в виде элементарных секций P -матриц; 1 – границы элементарных секций

Для каждой секции составляется так называемая P -матрица. После чего осуществляется их каскадирование. Подробнее см. работу [9]. P_{33} – искомая проводимость:

$$\begin{bmatrix} S_i \\ R_{i+1} \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{i11} & P_{i12} & P_{i13} \\ P_{i21} & P_{i22} & P_{i23} \\ P_{i31} & P_{i32} & P_{i33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i \\ S_{i+1} \\ U_1 \end{bmatrix}.$$

Основной задачей расчетного этапа является получение частотных характеристик устройства. Использование модифицированной МСМ позволяет вычислить полный набор Y -параметров. На основании полученных данных, с применением стандартных соотношений теории линейных цепей, осуществляется последующее преобразование к S -параметрам.

Важным этапом расчётной процедуры является подключение параметров материала, поскольку параметры, используемые в МСМ, не поддаются прямому определению внутри самой модели. Их значения должны быть получены одним из трёх возможных путей: на основе экспериментальных данных, с использованием аналитических зависимостей либо посредством численного моделирования.

Пример численных расчетов с использованием простых тестовых ячеек для определения параметров МСМ представлен на рис. 4. Расчет собственных частот выполняется в COMSOL Multiphysics с помощью

решателя «Study–Eigenfrequency». Предложенный подход является удобным и эффективным инструментом для анализа характеристик ПАВ (или параметров МСМ) как в различных конфигурациях ВПП и периодических структур, так и для свободной или металлизированной поверхности пьезоэлектрика.

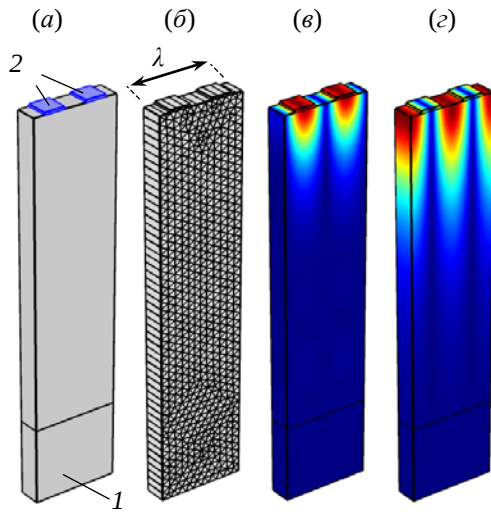


Рис. 4. Пример тестовых ячеек с электродами ВПП: а – поверхность с электродами; б – пример сетки; в, г – картины механических смещений для ВПАВ на подложке 36° Y-X LiTaO₃ для собственных частот. Особенности конструкции: λ – длина волны, 1 – подложка танталата лития, 2 – металлические электроды

В результате расчёта определяется набор собственных частот ячеек. Примеры распределений механических смещений, соответствующих вытекающей ПАВ (ВПАВ), приведены на рис. 4, в и г соответственно. В случае отсутствия электродов наблюдается единственная собственная частота, по которой рассчитывается фазовая скорость ПАВ. При наличии электродов система характеризуется двумя собственными частотами, что позволяет определить как фазовую скорость, так и коэффициент отражения.

Е. Блок оптимизации

Модуль оптимизации предназначен для решения задач нахождения экстремумов целевой функции (ЦФ) с применением различных методов [7, 8]. Наличие ограничений на варьируемые параметры, а также выраженная многоэкстремальность ЦФ, как правило, приводит к существенному увеличению вычислительных и временных затрат. В разработанном алгоритме в качестве основы использован метод случайного поиска, реализованный на базе модифицированного алгоритма «имитации отжига», обеспечивающего высокую вероятность нахождения глобального оптимального решения. Начальная конфигурация системы формируется случайным образом в пределах допустимых значений параметров, определённых пользователем. В рамках выбранной архитектуры устройства оптимизация осуществляется исключительно по геометрическим параметрам топологии. Количество оптимизируемых параметров зависит от конкретной архитектурной реализации фильтра и может варьироваться от нескольких десятков до сотен. Преимущество алгоритмов случайного поиска заключается в их способности эффективно обрабатывать многомерные задачи, позволяя находить рациональные

решения в условиях высокой размерности пространства переменных.

Постановка задачи оптимизации соответствует технической спецификации фильтра, представленной на рис. 5.

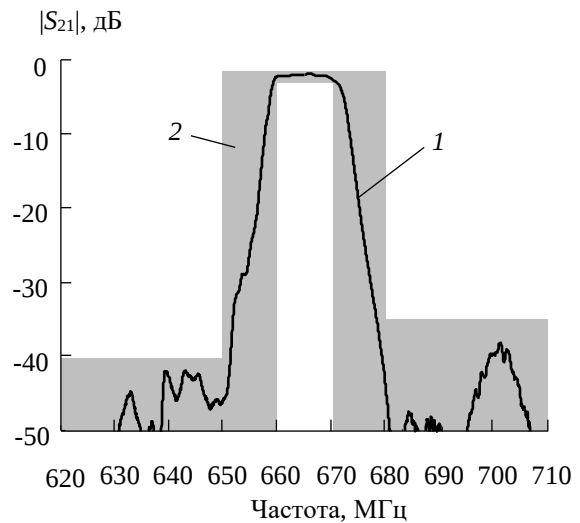


Рис. 5. Типовой коэффициент передачи фильтра (1), вписанный в рамки спецификации (2)

Общая постановка задачи оптимизации:

$$\max(f(x)), x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \text{ и } x_i \in [b, d], i = \{1, 2, \dots, N\},$$

где $f(x)$ – максимизируемая ЦФ, имеющая ограниченное число экстремумов.

В данном случае задача оптимизации является многокритериальной, поскольку необходимо учитывать одновременно несколько параметров фильтра. Для приведения задачи к удобному для численного решения виду применяется метод сведения к единому комплексному критерию – ЦФ, которая учитывает совокупное отклонение выходных параметров от заданных требований. Такой подход позволяет упростить процесс оптимизации и использовать эффективные методы поиска экстремумов:

$$CF = w_1 f_1(x) \times w_2 f_2(x) \times w_3 f_3(x) \times \dots \times w_N f_N(x),$$

где $f_i(x)$ – целевая функция частного критерия; w_i – весовой коэффициент, определяющий приоритет частного критерия в общей задаче оптимизации; N – число критериев.

Для прикладных задач ЦФ часто имеет множество локальных экстремумов. В переборных методах крупный шаг снижает точность, мелкий – увеличивает вычислительные затраты. В случайных методах результат зависит от числа итераций и корректности начальных ограничений параметров.

Г. Технологический этап

Характеристики ПАВ-устройств в значительной степени зависят от технологических возможностей их изготовления. Технологические факторы влияют как на структурный синтез, так и на параметры МСМ и точность моделирования. В частности:

- Метод литографии (прямая или обратная) определяет профиль электродов и, соответственно, параметры МСМ, учитываемые в аналитических моделях.

- Минимальная ширина электрода ограничивает выбор типа ВШП и архитектуры фильтра, что напрямую влияет на рабочую частоту.
- Выбор технологического окна критичен для минимизации производственных погрешностей.

На завершающем этапе необходимо обеспечить воспроизводимость изделий и соответствие расчетных и экспериментальных характеристик, что требует высокой точности на всех этапах производства.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ

На рис. 6 представлены результаты процесса оптимизации параметров фильтра. На рис. 7 представлены результаты расчета и эксперимента.

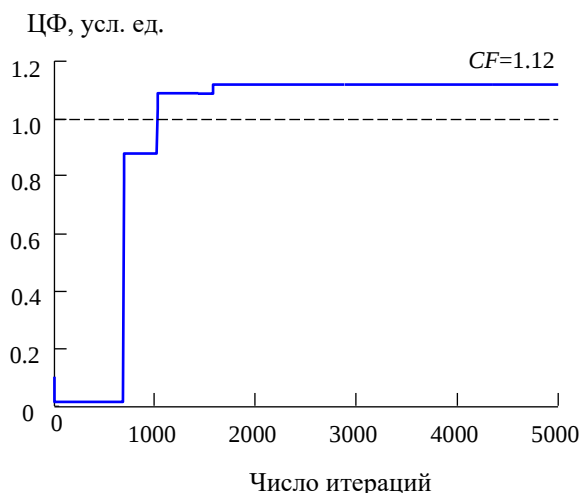


Рис. 6. Работа оптимизационного алгоритма на примере построения ЦФ в зависимости от числа итераций

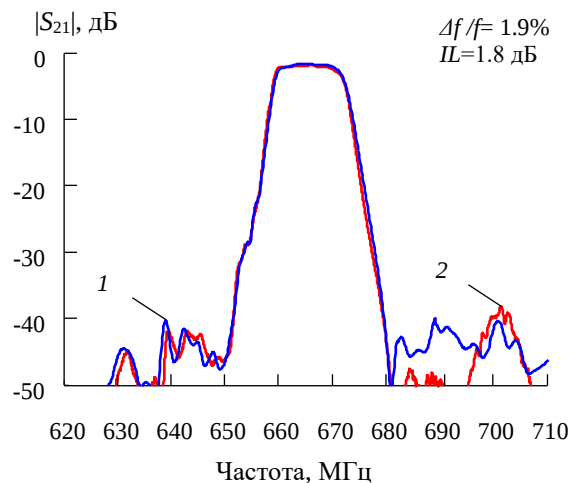


Рис. 7. Коэффициент передачи фильтра – сравнение результата расчета (1) и эксперимента (2)

Максимальное число итераций было установлено равным 5000. Достижение значения целевой функции $ЦФ > 1$, удовлетворяющего требованиям спецификации, произошло на 1025-й итерации. Уточняющий поиск в окрестности найденного оптимума позволил дополнительно улучшить значение ЦФ. Время одной итерации – 2 сек.

Из сравнения характеристик видно, что достигнуто хорошее совпадение расчета и эксперимента для фильтра на подложке танталата лития (36° Y-X LiTaO₃). Минимальное вносимое затухание фильтра составило не более 1.8 дБ, относительная полоса пропускания порядка 1.9%.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен подход к автоматизированному проектированию полосовых фильтров на ПАВ, включающий оригинальный метод оптимизации топологии на основе модифицированного алгоритма «имитации отжига», реализованный в составе программного комплекса. Аprobация методики выполнена на примере расчёта и оптимизации резонаторного фильтра на вытекающих ПАВ с использованием 36° Y-X LiTaO₃.

Предложенный подход обеспечивает высокоточное прогнозирование характеристик на этапе моделирования, снижая потребность в экспериментальных итерациях и повышая эффективность разработки. Результаты моделирования на основе модифицированной МСМ демонстрируют хорошее совпадение с экспериментом, что подтверждает адекватность предложенного подхода. Разработанная система может рассматриваться как эффективный инструмент для анализа и проектирования полосовых резонаторных фильтров на ПАВ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает признательность Генеральному директору – главному конструктору ООО «АЭК Дизайн» Реуту В.Р. за предоставление экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гуляев Ю.В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // Успехи физ. наук. 2005. Т. 175. № 8. С. 887–895.
- [2] Фильтры на ПАВ с малыми потерями – одно из главных конкурентных преимуществ техники ПАВ / А.С. Багдасарян, Ю.В. Гуляев, С.А. Доберштейн, Т.В. Силицына // Техника радиосвязи. 2019. № 3 (42). С. 86–98.
- [3] Прапорщиков В., Орлов В. Фильтры на ПАВ. Краткий обзор и методы расчета // СВЧ-электроника. 2020. № 3. С. 40–47.
- [4] Койгеров А.С. Применение метода конечных элементов для расчета параметров поверхностных акустических волн и устройств на их основе // Микроэлектроника. 2024. Т. 53. № 2. С. 142–155.
- [5] Darinskii A.N., Weihnacht M., Schmidt H. Symmetry Properties of Acoustic Fields in Piezoelectrics and their Implementation in FEM Simulations of the SAW Propagation // 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. 2010. pp. 1894–1897.
- [6] Маринушкин П.С., Левицкий А.А., Фадеев В.О. Оценивание влияния параметров металлизации на рабочие характеристики компонентов на поверхностных акустических волнах // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2024. Т. 17. № 1. С. 82–91.
- [7] 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.
- [8] Бугаев А.С., Горский В.Б. Система оптимизации выходных характеристик электронных компонент // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 10. С. 1266–1276.
- [9] Дмитриев В.Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 9. С. 1134–1143.