

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Компьютерное моделирование характеристик  
микрорешетчатого СВЧ- фильтра**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 2 курса 2211 группы  
направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»  
Института Физики  
Мартынова Олега Юрьевича

Научный руководитель

д.т.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.

\_\_\_\_\_

личная подпись, дата

А.Л. Хвалин

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой нелинейной физики,

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. ст., уч. зв.

\_\_\_\_\_

личная подпись, дата

Е.Н. Бегинин

инициалы, фамилия

Саратов 2026 год

## Введение

**Актуальность работы .** Исследование и освоение гигагерцового диапазона привело к потребности в устройствах для работы в нём. При этом, в виду постоянно развивающейся миниатюризации радиоэлектронных приборов, устройства для работы в гигагерцовом диапазоне должны иметь высокую селективность и малые размеры, а так же подавлять паразитные полосы пропускания. Одной из разработок, удовлетворяющих этим требованиям стали микрополосковые фильтры. Они имеют как малые размеры так и высокую селективность, при этом просты в изготовлении.

Микрополосковые фильтры применяются в различных радиоэлектронных приборах для обработки входного сигнала [1]. Они позволяют подавить гармоники, находящиеся за пределами нужной полосы частот. А так же выделить нужную гармонику и подавить помехи в виду высокой селективности. Микрополосковые фильтры используется также как резонансные нагрузки в высокочастотной части радиодиапазона, особенно в диапазоне СВЧ.

Разработка микрополосковых фильтров состоит из следующих этапов : теоретические расчёты, проектирование в САПР, изготовление и испытания [1]. Так же немаловажным этапом разработки является оптимизация тех или иных характеристик прибора. САПР - средство автоматизированного проектирования, является программным пакетом, позволяющим разработать конструкцию прибора и оптимизировать его характеристики.

Оптимизация разбивается на несколько этапов : постановка задачи, выбор метода и инструмента для проведения оптимизации и реализация [2]. При этом в процессе оптимизации возможно переключение между методами оптимизации и, при необходимости, комбинация этих методов. Зачастую основными инструментами оптимизации являются САПР. Существует множество различных САПР, каждое из которых имеет свои особенности .

Моделирование. Для моделирования доступны различные методы: линейное моделирование, одночастотный и многочастотный гармонический баланс, ряды Вольтера, электромагнитное моделирование и другие [3].

Вывод результатов. В зависимости от цели анализа результаты могут выводиться в различных графических формах или в таблице.

Настройка и оптимизация. Можно настраивать или оптимизировать электрические схемы, созданные в проектах, при этом все изменения автоматически отражаются на графиках и в топологии [4].

Интеграция программ сторонних производителей. Интерфейс EM Socket позволяет использовать вычислительные модули различных производителей программного обеспечения для электромагнитного моделирования.

Поддержка поведенческих моделей. В программе есть поддержка для системы активного согласования нагрузок Mesuro.

Настройка дерева проекта. Можно настраивать узлы для лучшей организации крупных проектов, которые поддерживают сотни схемных решений и графиков [5].

**Целью** данной выпускной квалификационной работы является постановка и решение задачи параметрического синтеза основных рабочих характеристик фильтра нижних частот с помощью САПР.

В ходе работы были выполнены следующие **задачи** :

1. Изучение методов анализа микрополосковых структур.

Постановка задачи параметрического синтеза основных характеристик микрополоскового фильтра.

2. Изучение метода гармонического баланса . Теоретический расчёт характеристик микрополоскового фильтра.

3. Решение задачи оптимального синтеза характеристик микрополоскового фильтра нижних частот.

4. Сравнительный анализ результатов теоретического расчёта и компьютерного моделирования.

Объектом исследований, результаты которых представлены в выпускной квалификационной работе, стал прототип фильтра классической конструкции из семи ступенек микрополосковой линии, представленный в Бахарев С. И., Вольман В. И. «Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств», М.: Радио и связь, 1982 г, 328 с. В работе проведено применение современных технологий для повышения точности анализа и разработки выбранного устройства.

#### **Основное содержание работы.**

В **первой главе** изложено математическое описание и методы анализа микрополосковых структур. А так же представлены определения, на которых основана дальнейшая работа.

Линия передачи - это устройство, ограничивающее область распространения электромагнитных колебаний и направляющее поток электромагнитной энергии к нагрузке.

*Симметричные линии* имеют в поперечном сечении две перпендикулярные плоскости симметрии, *несимметричные линии* — одну. На рисунке 1 показаны разновидности полосковых линий и соответствующие структуры электрического поля в поперечном сечении [1].

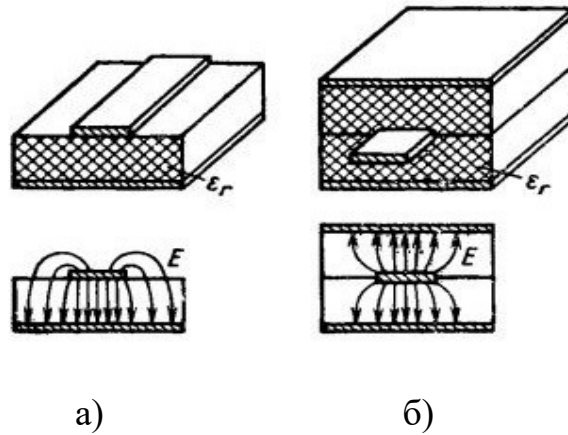


Рисунок 1. Полосковые линии передач: а) несимметричная, б) симметричная линия.

Далее приведём общие методы расчёта.

Для расчёта, конструирования и оптимизации устройств на симметричных полосковых линиях необходимо получить уравнения, позволяющие определить ширину полоски  $W$  для заданного значения волнового сопротивления линии с параметрами  $b$ ,  $\epsilon_r$  и  $t$  (ширина проводника) [7-8]. Для полоски нулевой толщины значение отношения  $W/b$  можно получить из следующей формулы.

$$\frac{W}{b} = \frac{2}{\pi} \operatorname{Art} h \sqrt{k} \quad (1)$$

Где

$$k = \begin{cases} \sqrt{1 - \left[ \frac{e^{\pi x} - 2}{e^{\pi x} + 2} \right]^4} & \text{для } x \geq 1, \\ \left[ \frac{e^{\pi/x} - 2}{e^{\pi/x} + 2} \right]^2 & \text{для } 0 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Основной волной СПЛ является Т-волна, для которой

$$\begin{aligned} E &= E(x, y) e^{j(\omega t - \beta z)}; \\ H &= H(x, y) e^{j(\omega t - \beta z)}; \end{aligned} \quad (2)$$

Где

$$E(x, y) = x_0 E_x(x, y) + y_0 E_y(x, y);$$

$$H_y(x, y) = \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} E_x(x, y);$$

$$H_x(x, y) = -\sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} E_y(x, y);$$

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} .$$

При расчёте микрополосковой линии возникает необходимость определять величину, получившую название эффективной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{эфф}}$ ) [7]. Эта величина чрезвычайно полезна, так как характеризует соотношение между энергиями, концентрирующимися в воздухе и диэлектрике [8].

$$\lambda_q = \frac{\lambda_0}{(\epsilon_{\text{эфф}})^{\frac{1}{2}}} = \frac{c}{f (\epsilon_{\text{эфф}})^{\frac{1}{2}}}$$

где  $\lambda_q$  - длина волны в микрополосковой линии.

Перейдём к описанию несимметричной полосковой линии. А так же опишем структуру электрического поля в ней.

Несимметричная полосковая линия передачи (НПЛ) — металлический проводник (полоска) шириной  $W$  и толщиной  $t$  лежит на подложке толщиной  $h$ , выполненной из однородного диэлектрика с относительной проницаемостью  $\epsilon_r$  и покрытой с внешней стороны слоем металла [1].

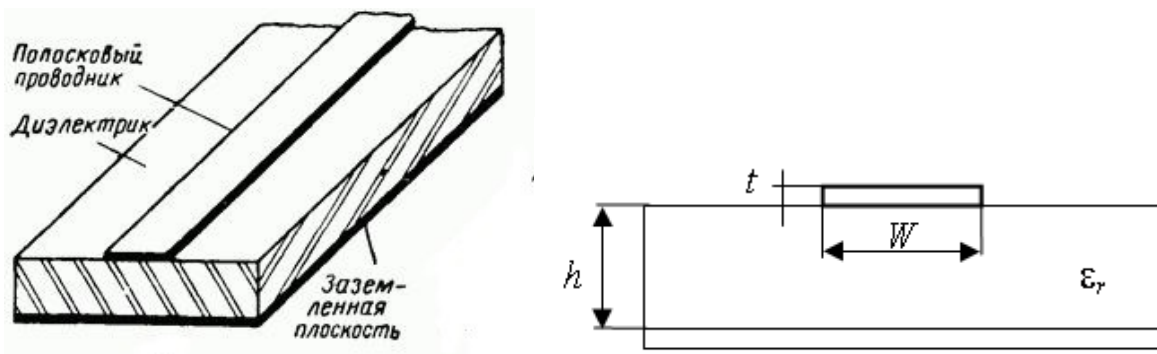


Рисунок 2. Поперечное сечение в микрополосковой линии.

Токонесущие поверхности выполнены из металла с проводимостью  $\sigma_m$  [6].

Наглядное представление о структуре электромагнитного поля в любой линии передачи даёт его графическое изображение. Распределение электромагнитного поля, тока, мощности в поперечном сечении воздушной микрополосковой линии показано на рисунке 4.

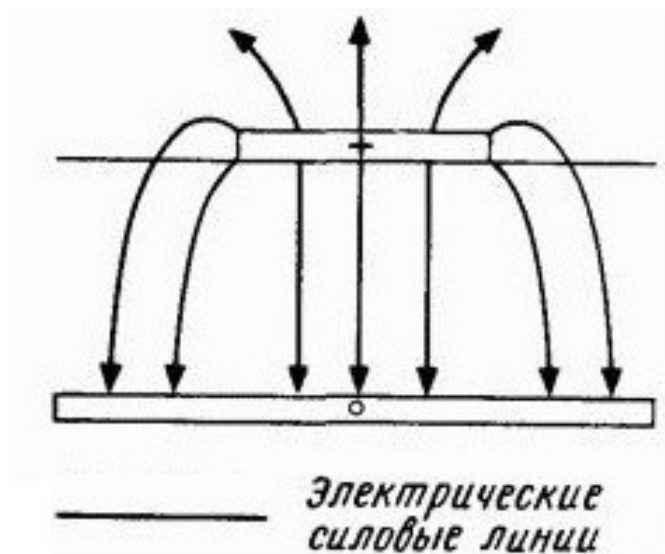


Рисунок 3. Распределение в несимметричной полосовой линии электрического поля.

Анализ устройства позволяет установить зависимость одной или т его реальных характеристик  $i = 1, 2, m$ , таких, как, например, модуль или фаза коэффициента передачи от параметров  $X_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  — число варьируемых параметров (волновые сопротивления, электрические длины

отрезков линий, ёмкости, индуктивности и т. д.). Область  $X$  изменения параметров, как правило, ограничена неравенствами вида.

$X_{\text{кн}} \leq X_{\text{к}} \leq X_{\text{кв}}$ , вытекающими из условий реализуемости [7]. Кроме того, на выбор параметров могут быть наложены функциональные ограничения вида

$$u_p(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad p = 1, 2, \dots, s; \quad t_u(x_1, \dots, x_n) \geq 0, \quad u = 1, 2, \dots, q;$$

При параметрическом синтезе устройств, для которых допуски на характеристики заранее известны, можно воспользоваться следующей целевой функцией:

$$F = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\left| |f_{ik} - g_{ik}| - \Delta g_{ik} (|f_{ik} - g_{ik}| - \Delta g_{ik}) \right|}{2|f_{ik} - g_{ik}|} \right\}^2$$

В контексте данной работы нельзя не упомянуть метод анализа компьютерной модели.

В **второй главе** представлен метод гармонического баланса. *Метод гармонического баланса* — метод анализа периодических процессов в системах с нелинейными элементами, в частности, в нелинейных радиотехнических схемах. Основан на использовании преобразований Фурье применительно к линейной аппроксимации нелинейной модели в процессе решения систем нелинейных уравнений [8].

Пусть математическая модель схемы представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений порядка  $m$

$$f = \left( \frac{dV}{dt}, V, u(t) \right) = 0 \quad (3)$$

где  $U(t)$  — входной периодический сигнал с частотой  $\omega$ ,  $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ ,  $m$  — число узлов схемы. Решение  $V(t)$  может быть представлено в виде ряда Фурье:

$$v_i = \frac{p_{0i}}{2} + \sum_{k=1}^K (g_{ki} \cos K\omega t + h_{ki} \sin K\omega t) \quad (4)$$

где  $p_{0i}$ ,  $g_{ki}$ ,  $h_{ki}$  — неизвестные коэффициенты Фурье в  $i$ -м узле схемы,  
 $K$  — число учитываемых гармоник.

В третьей главе представлены результаты моделирования и оптимизации прототипа фильтра нижних частот. Приведём чертёж и основные характеристики выбранного для оптимизации прототипа.

Форма и геометрические размеры фильтра приведены на рисунке 8. Устройство разбивается на 11 элементов двух типов: 1- стык проводников различной ширины, 2- отрезок регулярной линии .

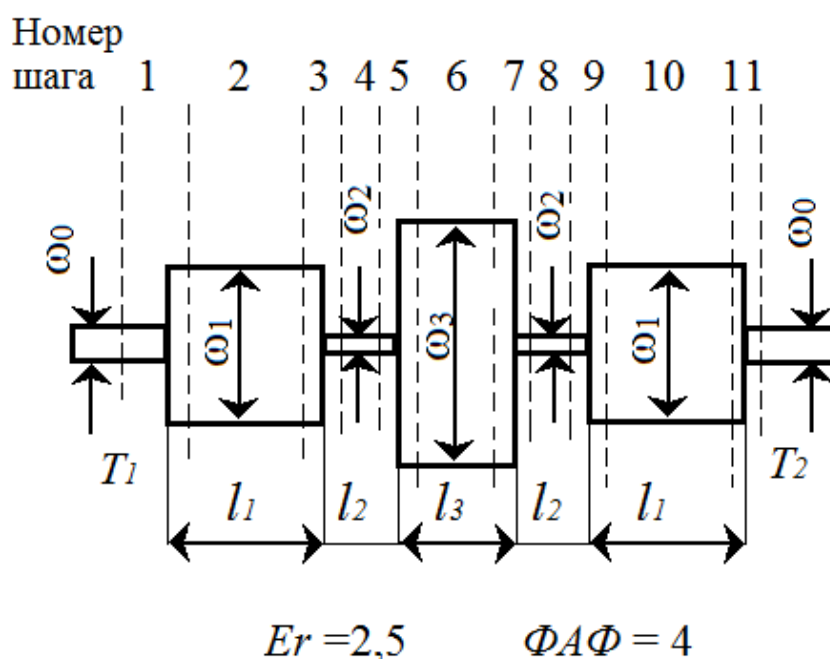


Рисунок 4. Геометрические данные фильтра.

Таблица 1 - Данные прототипа фильтра

$i$	0	1	2	3
$\omega_i/h$	2.8	6.0	0.9	9.3
$v_i/h$	6.75	6.35	6.75	6.25

Вычисление S - матрицы строится как последовательность одиннадцати шагов. Результирующая S - матрицы фильтра определятся по отношению к плоскостям отчёта T1 и T2 [1].

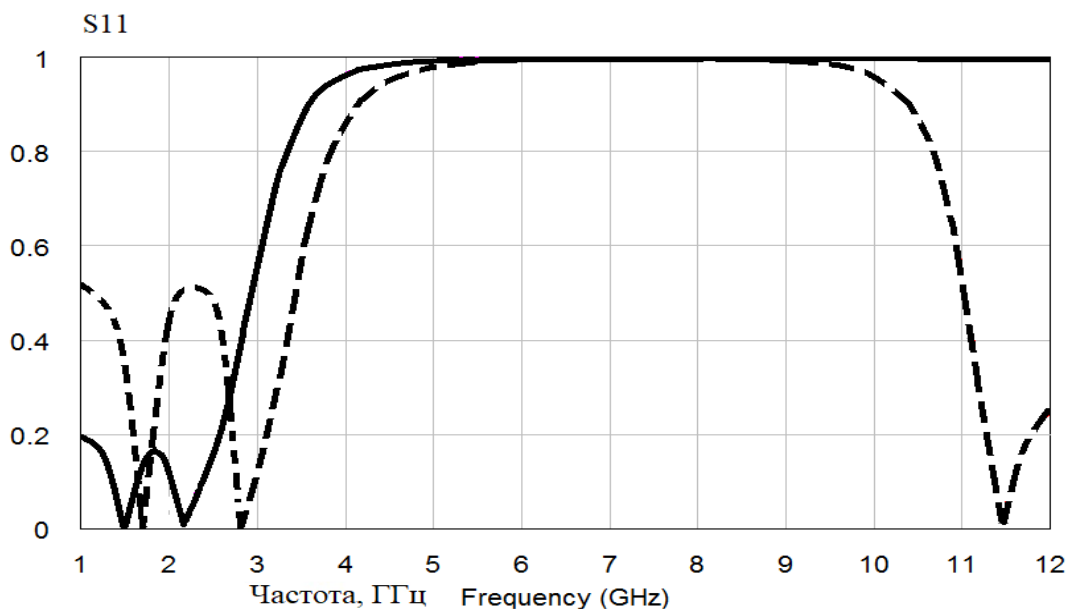


Рисунок 5. Коэффициент отражения .

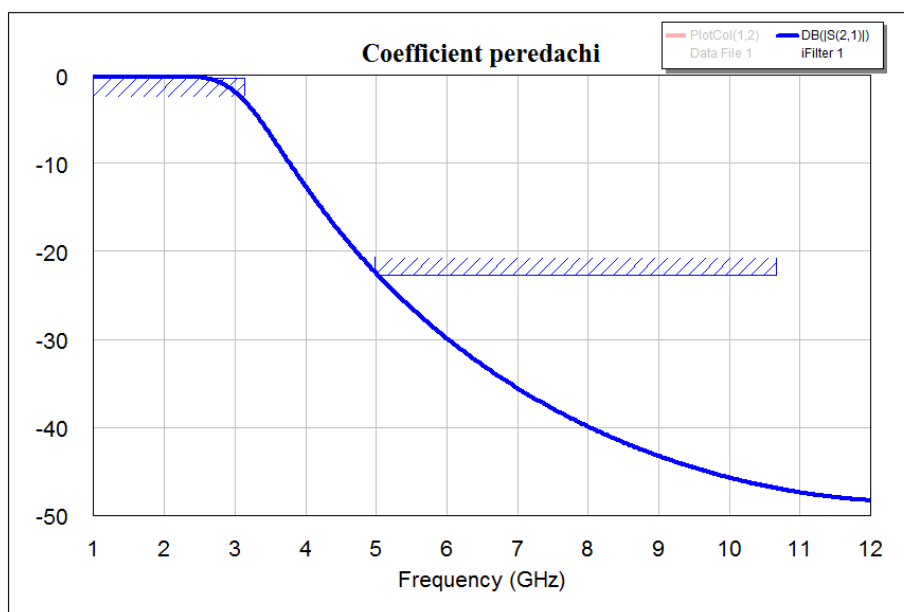


Рисунок 6. Коэффициент передачи.

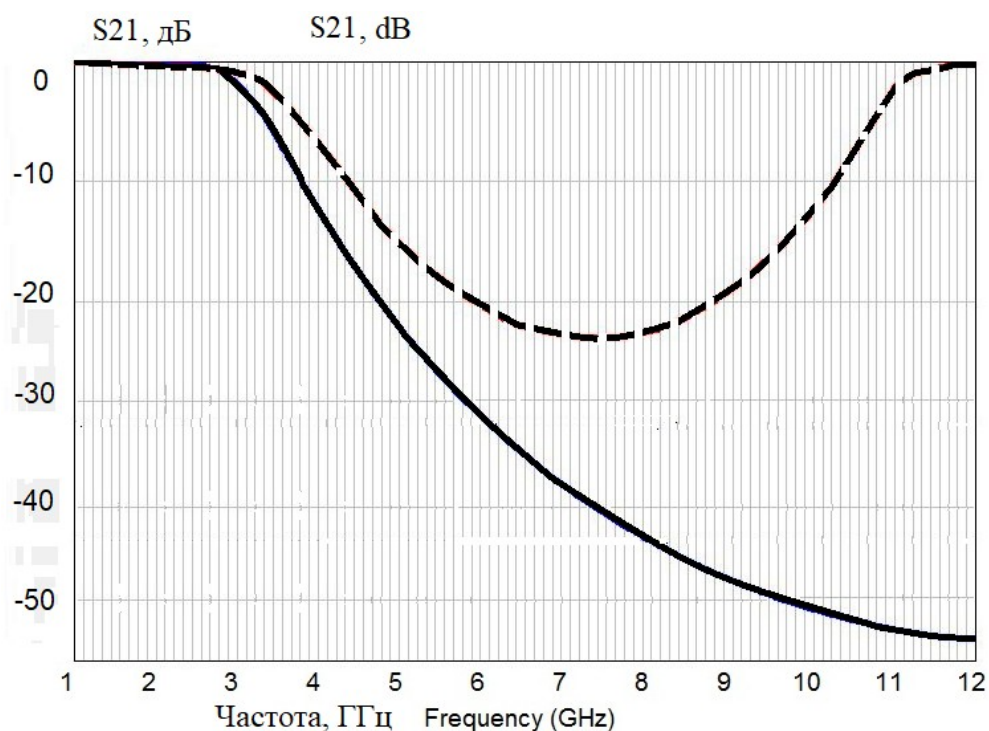


Рисунок 7. Коэффициент отражения в сравнении перерасчёта зависимости переходного ослабления фильтра от частоты.

На характеристике коэффициента передачи присутствует «окно прозрачности» в интервале частот от 11 до 12 ГГц. Решение задачи оптимизации в САПР

позволяет его исключить при существенном увеличении уровня заграждения ФНЧ, максимально свыше -50 дБ .

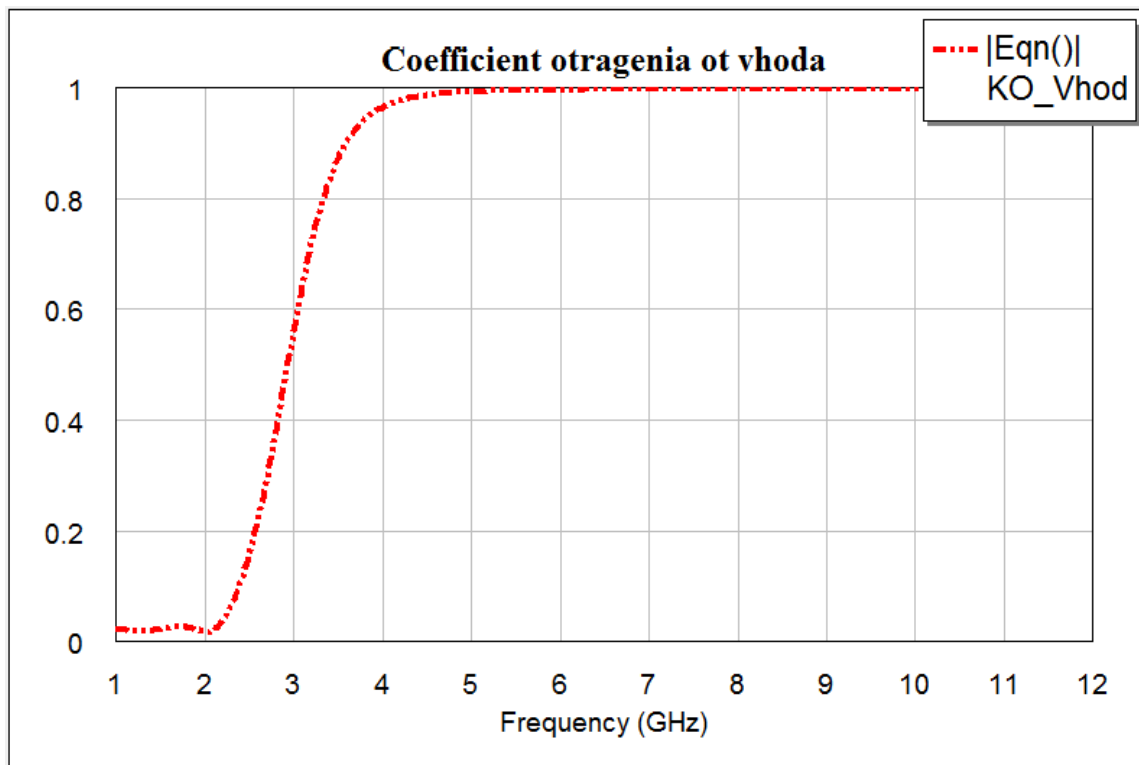


Рисунок 8. Коэффициент отражения от входа.

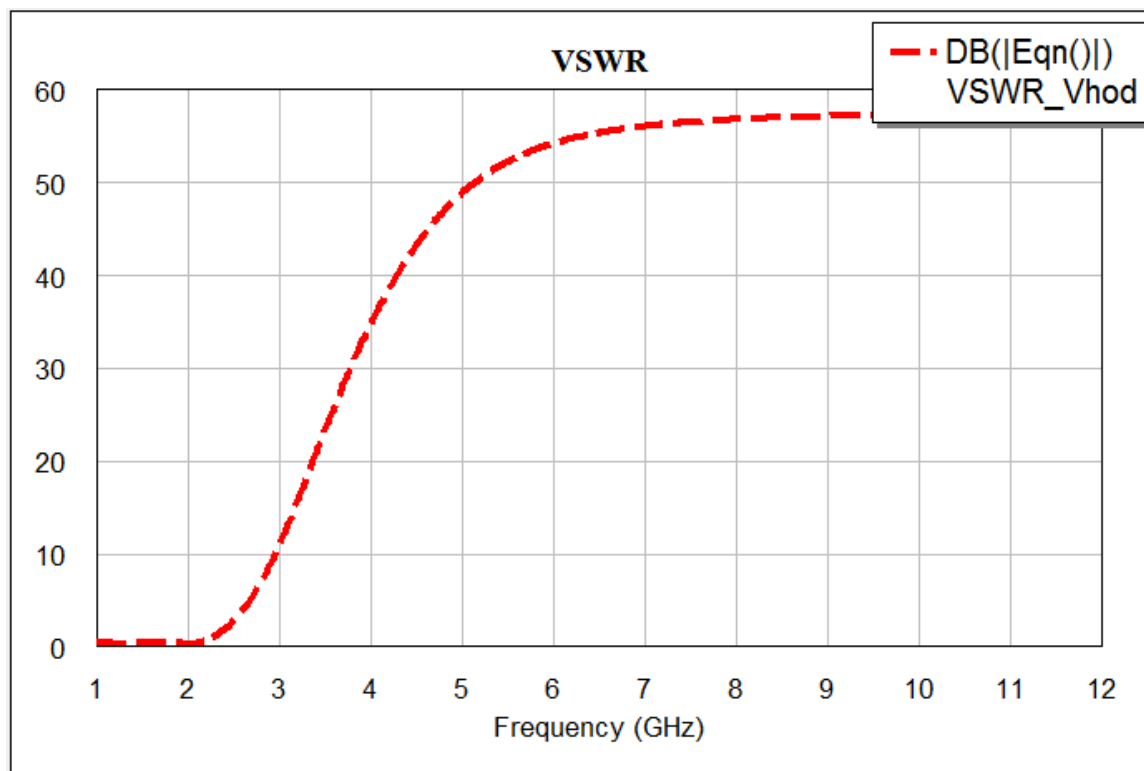


Рисунок 9. Зависимость КСВ от частоты.

На графике зависимости КСВ от частоты видно следующее. КСВ начинает нелинейно возрастать при повышении частоты входящих колебаний выше порога пропускания фильтра.

Таблица 2 – оптимизированная топология

Обозначение размера	Номер элемента					
	0	1	2	3	4	5
$\omega$	2.8	27.91	0.14	25.0	0.12	26.67
$l$	6.75	1.89	4.58	3.36	4.48	1.98

В таблице 2 приведены размеры участков топологии, скорректированные по результатам решения задачи оптимизации для ФНЧ. В основной работе данная таблица имеет номер 5.

### **Заключение.**

Для создания конструкции СВЧ фильтра низких частот сформулирована и решена задача параметрического синтеза основных рабочих характеристик фильтра. В качестве целей оптимизации использованы частотные характеристики: коэффициента передачи и КСВН входа. Конструкция фильтра выполнена на одиночной ступенчатой микрополосковой линии (МПЛ). В качестве прототипа фильтра использована классическая конструкция из семи ступенек МПЛ, представленная в книге из списка литературы [1]. Задача анализа фильтра решается методом гармонического баланса. В качестве варьируемых параметров использованы геометрические размеры ступенек МПЛ. Проведённое сравнение результатов расчёта фильтра - прототипа, полученных методом гармонического баланса и декомпозиционным методом, подтверждают адекватность созданной компьютерной модели. В результате решения задачи параметрического синтеза получена конструкция фильтра низких частот с улучшенными рабочими характеристиками.

## Список литературы

1. Бахарев С. И., Вольман В. И. «Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств», М.: Радио и связь, 1982 г, 328 с.
2. Кац Б.М., Мещанов В.П., Хвалин А.Л. Синтез сверхширокополосных согласующих переходов в круглых коаксиальных линиях. Cad and numerical methods in applied electrodynamics and electronics. Труды второго рабочего семинара Saratov - Penza Chapter. Саратов. 1998. с. 13- 20.
3. Кац Б.М., Хвалин А.Л. Численная реализация алгоритма моделирования ступенчатых нерегулярностей в коаксиальных волноводах // Исследование, разработка, технология и применение СВЧ- приборов: Тез. докл. науч. -техн. конф. –Саратов. 1989г.с. 12-14.
4. Давидович М.В., Кац Б.М., Креницкий А.П., Мещанов В.П., Хвалин А.Л. и др. Сверхширокополосные микроволновые устройства. М.: Радио и связь, 2001, 528 с.
5. Kats V.M., Meschanov V.P., Khvalin A.L. Synthesis of superwide- band matching adapters in round coaxial lines // IEEE Transactions on MTT. 2001. v. 49. № 3, March. p.575- 580.
6. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайне высоких частот. Учебное пособие для вузов. М.: Педагогика-Пресс. 1998. 328с.
7. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. М. М.: Радио и связь. 1992. 504 с.
8. Денисенко В.В. Точность и достоверность моделирования МОП - транзисторов СБИС. Микроэлектроника. 2009. т. 38. №4. С. 302-308.