

УДК 621.372.512

ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА СПИРАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

И.Ю. МАЛЕВИЧ, Д.А. СОЛОНОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 29 октября 2015

Представлены результаты разработки, моделирования и экспериментальной проверки полосового фильтра метрового диапазона на спиральных резонаторах, реализованного в оригинальном конструктивном исполнении с улучшенной технологичностью.

Ключевые слова: полосовой фильтр, спиральный резонатор.

Введение

Как известно, один из ключевых факторов, определяющих прогресс в области высокочастотной обработки сигналов, – уровень развития элементной базы. Электрические фильтры, являясь неотъемлемой частью радиотехнических систем, в существенной степени влияют на их помехозащищенность, пропускную и разрешающую способность. Производителями радиоэлектронных компонентов предлагается широкая номенклатура высокочастотных фильтров [1–4]. Несмотря на это, в процессе проектирования радиоэлектронных устройств метрового (МВ) диапазона достаточно часто возникают ситуации, когда имеющиеся серийные образцы и типовые схемные решения не удовлетворяют поставленным требованиям или не являются оптимальными для данной системы. В работе рассмотрено решение задачи оперативного проектирования полосового фильтра МВ диапазона на спиральных резонаторах с улучшенной технологичностью.

Методика проектирования полосового фильтра на спиральных резонаторах

Спиральный резонатор представляет прямоугольный (или круглый) экран, внутри которого размещен однослойный соленоид, один конец которого замкнут на экран, а второй разомкнут (рис. 1, а). Для расчёта конструктивных параметров спирального резонатора в миллиметрах удобно использовать следующие соотношения [5–7]:

$$S = 0,508Q / \sqrt{f_0}, \quad (1)$$

где S – ширина резонатора, Q – собственная (конструктивная) добротность резонатора, значение которой составляет 300–2000 единиц, f_0 – центральная частота в МГц;

$$\text{высота резонатора: } H = 1,6 \cdot S; \quad (2)$$

$$\text{диаметр спирали: } d = 0,66 \cdot S; \quad (3)$$

$$\text{высота спирали: } b = 0,99 \cdot S; \quad (4)$$

$$\text{количество витков спирали: } N = 40386 / f_0 S; \quad (5)$$

$$\text{шаг спирали: } P = f_0 \cdot S^2 / 38340; \quad (6)$$

$$\text{диаметр провода: } d_0 = 0,45 \cdot P. \quad (7)$$

Потери в резонаторе рассчитываются по формуле [5]:

$$I_L = 20 \cdot \log(1 / (1 - Q_L / Q)), \quad (8)$$

где Q_L – добротность нагруженного резонатора, определяемая требуемой полосой пропускания резонатора:

$$Q_L = f_0 / \Delta f. \quad (9)$$

Волновое (Z_0) и резонансное (R) сопротивления резонатора определяются выражениями:

$$Z_0 = 200000 / (f_0 \cdot S), \quad (10)$$

$$R = Z_0 \cdot f_0 / \Delta f. \quad (11)$$

Согласование с сопротивлением фидера R_L выполняется автотрансформаторно. Число витков от замкнутого на экран (холодного) конца соленоида до отвода вычисляется по формуле:

$$O = N / \mathcal{G}, \quad (12)$$

где $\mathcal{G}$ – коэффициент включения фидера, вычисляемый как

$$\mathcal{G} = R / R_L. \quad (13)$$

Фильтр на спиральных резонаторах представляет цепочечное соединение нескольких емкостно- (либо индуктивно-) связанных спиральных резонаторов (рис.1, б). Число резонаторов фильтра соответствует порядку фильтра (n). Порядок фильтра выбирается исходя из требуемой избирательности фильтра A_s на контролируемой частоте отстройки f_s [9]:

$$A_s = n \cdot 20 \log((f_s - f_0) / (f_c - f_0)), \quad (14)$$

где f_c – частота среза фильтра по уровню 0,707, определяемая соотношением $f_c = f_0 + \Delta f / 2$.

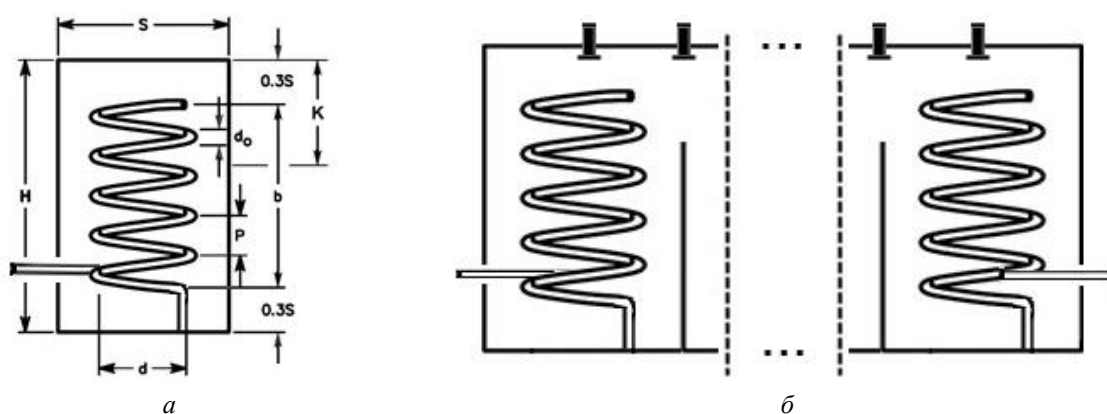


Рис. 1. Схемы спирального резонатора (а) и фильтра (б) с квадратным сечением экрана и прямоугольным окном связи высотой K

На рис. 2 представлены зависимости избирательности фильтров от нормированной частоты (f_s/f_0) для различного числа резонаторов (n).

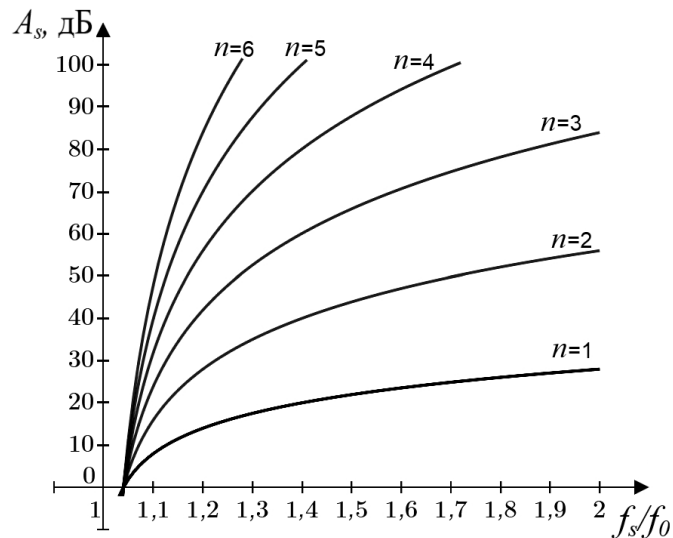


Рис. 2. Нормированные характеристики избирательности фильтров различных порядков

Связи между резонаторами формируются за счет выполнения отверстий в смежных стенках резонаторов [5–8]. Для узкополосных фильтров коэффициент связи (χ) между резонаторами выбирают от 0,01 до 0,05 [6]. Высота прямоугольного окна связи (K), обеспечивающая критическую емкостную связь между резонаторами, определяется зависимостью:

$$K = H + d \cdot \sqrt{\chi / 0,071} - 1,3 \cdot S. \quad (15)$$

Для подстройки частоты резонатора и коэффициента связи используются латунные винты, вкручиваемые в экран со стороны разомкнутого конца спирали.

Полосное затухание фильтра (IL) определяется собственными потерями резонаторов и коэффициентами связи между ними. Определить суммарные потери можно с помощью номограммы рис. 3 [5].

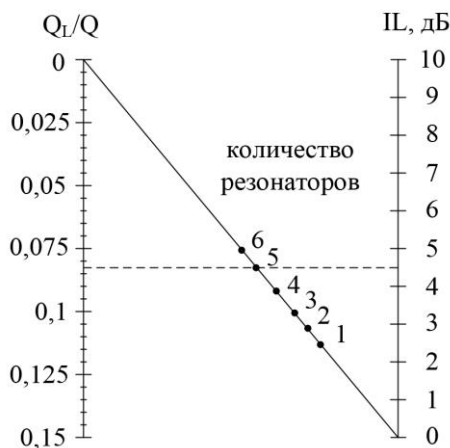


Рис. 3. Номограмма для оценки полосного затухания в фильтрах на спиральных резонаторах

Расчет полосового фильтра МВ диапазона

С целью апробации разработанной методики рассчитаем фильтр на спиральных резонаторах с параметрами: центральная частота фильтра: $f_0 = 138$ МГц; полоса пропускания по уровню 0,707: $\Delta f = 3$ МГц; сопротивление фидера: $R_L = 50$ Ом; селективность фильтра на отстройках ± 5 МГц от центральной частоты: не менее 50 дБ; допустимые потери в фильтре: 4...5 дБ.

На первом этапе проектирования фильтра на спиральных резонаторах по графику рис. 2 определяется минимально возможное количество резонаторов фильтра, удовлетворяющее заданной селективности на отстройке 5 МГц: $n = 5$.

На втором этапе определяется собственная (конструктивная) добротность резонатора Q . Для этого по номограмме рис. 3. с учетом допустимых полосных потерь ($IL = 4,5$ дБ) и количества резонаторов в фильтре ($n = 5$) определяется отношение нагруженной добротности к собственной: $Q_L/Q = 0,082$. Затем с учетом вычисленной по формуле (9) нагруженной добротности резонатора ($Q_L = 53$), рассчитывается собственная добротность резонатора: $Q = 650$.

На третьем этапе проектирования по формулам (1)–(7), (10)–(13) и (15) определяют геометрические размеры конструкций фильтра: ширина резонатора $S = 28$ мм; высота резонатора $H = 45$ мм; диаметр спирали $d = 18,4$ мм; высота спирали $b = 28,6$ мм; количество витков $N = 10$; шаг намотки спирали $P = 2,8$ мм; диаметр провода $d_0 = 1$ мм; число витков отвода $O = 0,25$; высота окна связи $K = 16,5$ мм.

Моделирование полосового фильтра на спиральных резонаторах

В соответствии с полученными размерами элементов в CST Microwave Studio составлена 3-D модель фильтра (рис. 4). При составлении модели была учтена диэлектрическая проницаемость материалов каркасов, обеспечивающих фиксацию соленоидов. Результаты моделирования передаточных характеристик и КСВ разработанного фильтра представлены на рис. 5.

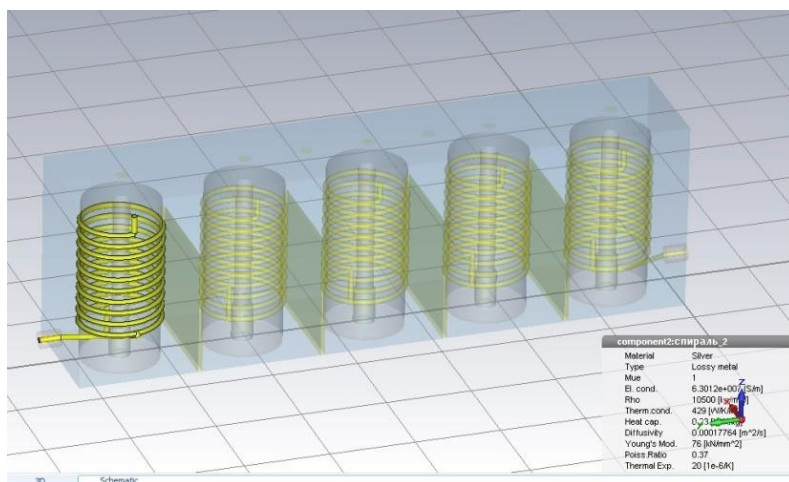


Рис. 4. 3-D Модель фильтра на спиральных резонаторах

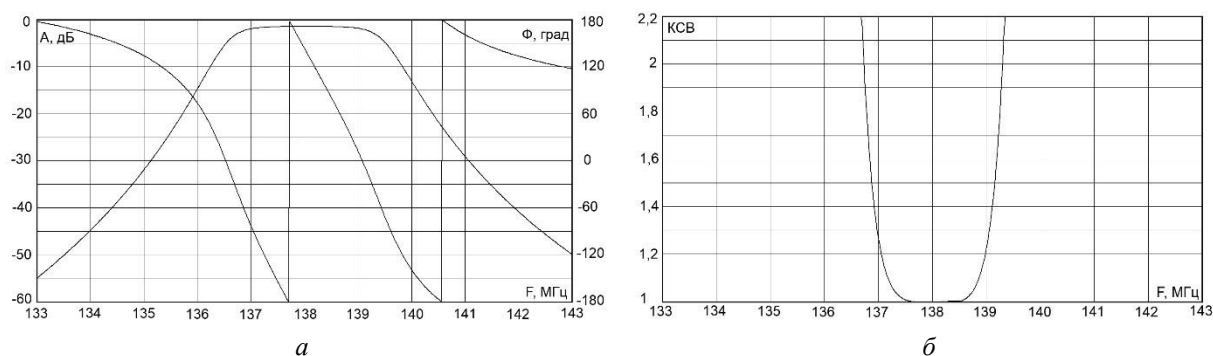


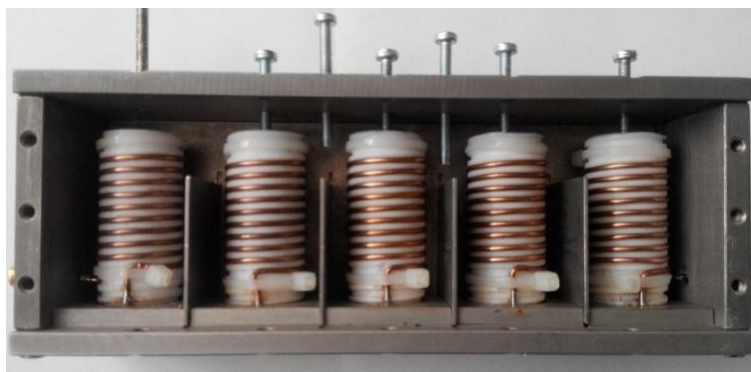
Рис. 5. Результаты моделирования АЧХ, ФЧХ (а) и КСВ (б) фильтров на спиральных резонаторах

Практическая реализация полосового фильтра на спиральных резонаторах

Полученные результаты положены в основу разработки конструкции фильтра на спиральных резонаторах с улучшенной технологичностью (рис. 6).



a



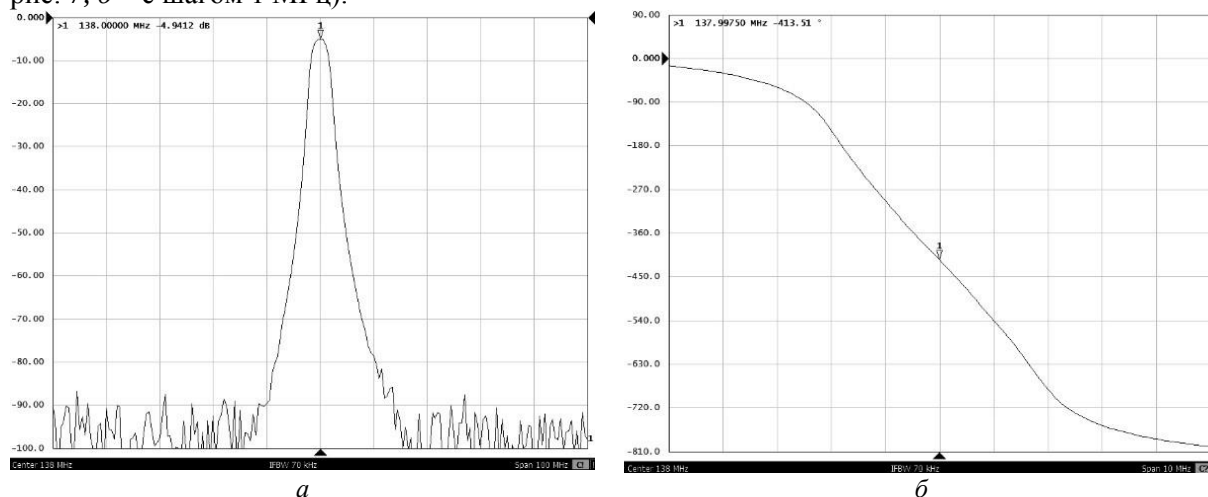
б

Рис. 6. Общий вид (*a*) и внутреннее конструктивное исполнение (*б*) полосового фильтра

Корпус фильтра представляет собой сборку из отдельных пластин, соединенных винтами. Все алюминиевые детали конструкции фильтра покрыты олово-висмутовым сплавом с никелевым подслоем. Внутренние перегородки, разделяющие резонаторы, размещаются в фиксирующих желобах, выполненных в основании и боковых стенках корпуса. Стыки деталей фильтра обрабатываются электропроводной смазкой, содержащей высокодисперсный медный порошок. Это позволяет снизить требования к шероховатости поверхностей деталей до 1,6...3,2 мкм и обеспечить минимизацию контактного сопротивления соединений элементов конструкции фильтра. В таком исполнении сборный корпус имеет электрические характеристики, которые по параметрам добротности и экранировки сравнимы с фрезерованными и цельнотянутыми конструкциями.

Каркасы спиралей с профрезерованными канавками изготовлены из фторопласта. Края спиралей забондажированы диэлектрическими стяжками. Крепление каркасов к корпусу фильтра выполнено фторопластовыми винтами. Винты крепления каркасов закрываются алюминиевой крышкой. Регулировка и настройка резонаторов фильтра и параметров связей реализуются посредством настроечных винтов, установленных в верхней крышке фильтра.

Передачные характеристики макета разработанного фильтра приведены на рис. 7 (где по оси абсцисс для рис. 7, *a* отображено значение текущей частоты с шагом 10 МГц, а для рис. 7, *б* – с шагом 1 МГц).



a

б

Рис. 7. АЧХ (*a*) и ФЧХ (*б*) разработанного полосового фильтра метрового диапазона на спиральных резонаторах

Неравномерность передаточной характеристики фильтра в полосе пропускания не превышает 1 дБ, потери в полосе пропускания не превышают 4,5 дБ, селективность фильтра на отстройках ± 5 МГц от центральной частоты 138 МГц составляет не менее 55 дБ.

На рис. 8 представлены экспериментальные зависимости передаточных характеристик разработанного фильтра от температуры (по оси абсцисс значение текущей частоты отображено с шагом 1 МГц).

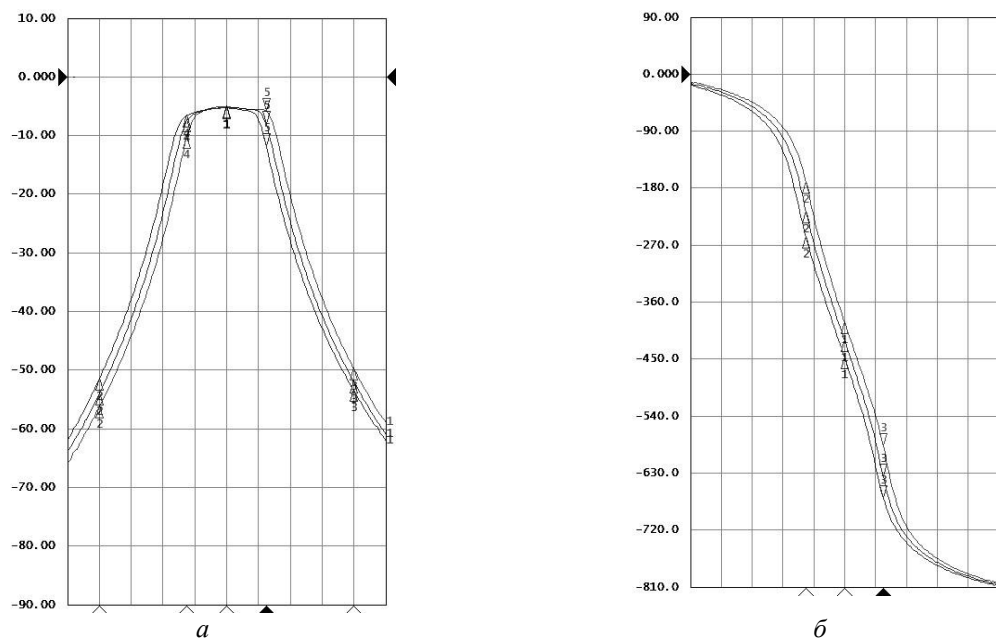


Рис. 8. АЧХ (а) и ФЧХ (б) разработанного полосового фильтра метрового диапазона на спиральных резонаторах для трех значений температур: 8 °С, 25 °С и 50 °С

Видно, что при изменениях температуры форма фазочастотной характеристики не изменяется, амплитудно-частотная характеристика сдвигается вниз по частотной оси при повышении температуры и сдвигается вверх при ее понижении, полоса фильтра сохраняется практически неизменной.

Ослабить влияние температурного ухода центральной частоты фильтра на точность удержания заданной частоты настройки возможно путем корректировки рабочей полосы фильтра (Δf [Гц]) с учетом диапазона рабочих температур (Δt [°C]) в соответствии с эмпирической формулой:

$$\Delta f^I = \Delta f + 10000 \cdot \Delta t. \quad (16)$$

Реализованный фильтр выполнен в габаритных размерах 173×33×77 мм. Вход и выход фильтра оснащен разъемами типа SMA.

Заключение

Таким образом, рассмотрены вопросы построения фильтра метрового диапазона на спиральных резонаторах, включающие разработку и апробацию методики проектирования, моделирование структуры и разработку конструктивного решения, исследование типовых характеристик. Увеличенная селективность, улучшенная равномерность фазовой характеристики и повышенная технологичность разработанного высокочастотного фильтра позволяют позиционировать его как перспективное конкурентоспособное импортозамещающее изделие для приемных и передающих трактов радиотехнических систем различного назначения.

BANDPASS VHF RANGE HELICAL RESONATOR FILTER

I.Yu. MALEVICH, D.A. SOLONOVICH

Abstract

The results of the development and experimental verification of the bandpass helical resonator filter in the VHF range, made in the original design concept with improved manufacturability are presented.

Keywords: bandpass filter, helical resonator.

Список литературы

1. Zaomtk: Фильтры на спиральных резонаторах. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.zaomtk.com/mtk/fle/45_helicalRus.pdf. – Дата доступа 11.08.2015.
2. Termwell: 50Ω helical band pass filters. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.termwell.com.tw/product_helical_filter50.htm. – Дата доступа 11.08.2015.
3. Rfcafe: Helical resonator design for filters. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rfcafe.com/references/electrical/helical-resonator.htm>. – Дата доступа 11.08.2015.
4. Amwav: Helical resonator filters. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amwav.com/filters-duplexers/14.html>. – Дата доступа 11.08.2015.
5. Zverev A.I. Handbook of Filter Synthesis. New York, 1967.
6. Алексеев Л.В., Знаменский А.Е., Лоткова Е.Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. М., 1976.
7. Arrl: RF and AF Filters. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arrl.org/rf-and-af-filters>. – Дата доступа 11.08.2015.
8. Ханзел Г.Е. Справочник по расчету фильтров. М., 1974.
9. Херреро Д., Уиллонер Г. Синтез фильтров. М., 1971.