

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  $f_c = f_0 + \Delta f / 2$ .

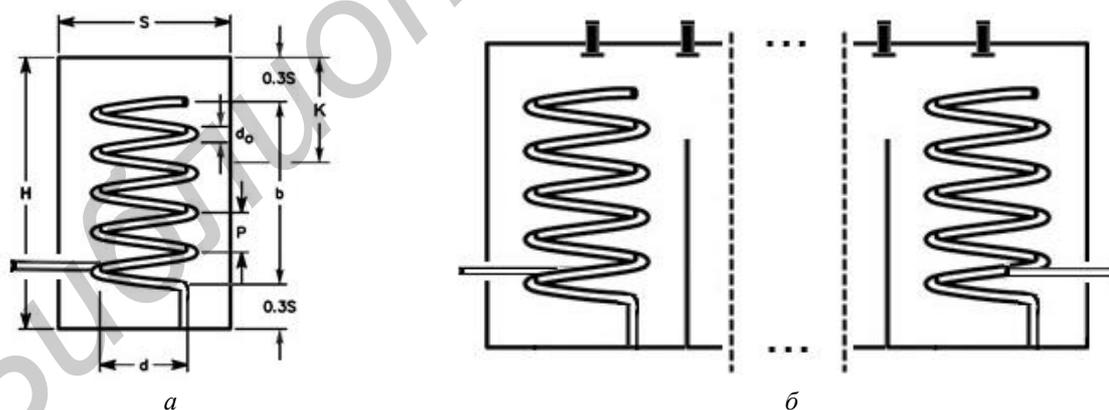


Рис. 1. Схемы спирального резонатора (а) и фильтра (б) с квадратным сечением экрана и прямоугольным окном связи высотой  $K$

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

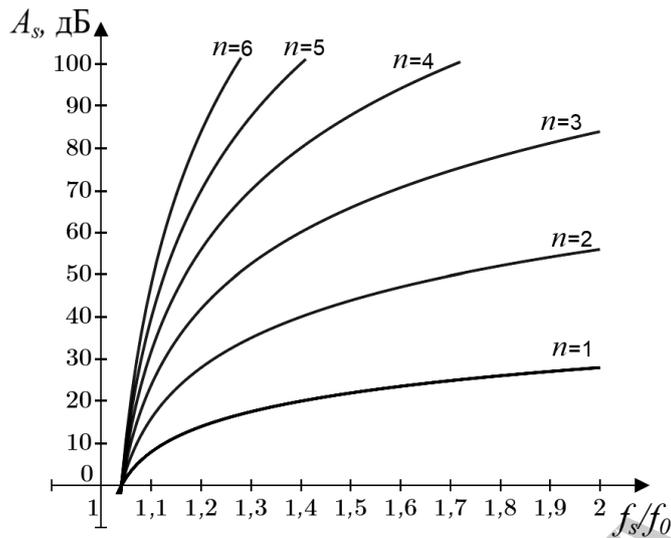


Рис. 2. Нормированные характеристики избирательности фильтров различных порядков

Связи между резонаторами формируются за счет выполнения отверстий в смежных стенках резонаторов [5–8]. Для узкополосных фильтров коэффициент связи ( $\chi$ ) 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].

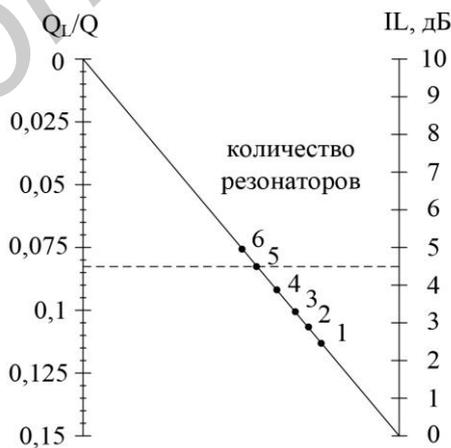


Рис. 3. Номограмма для оценки полосного затухания в фильтрах на спиральных резонаторах

### 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  $\pm 5$  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.

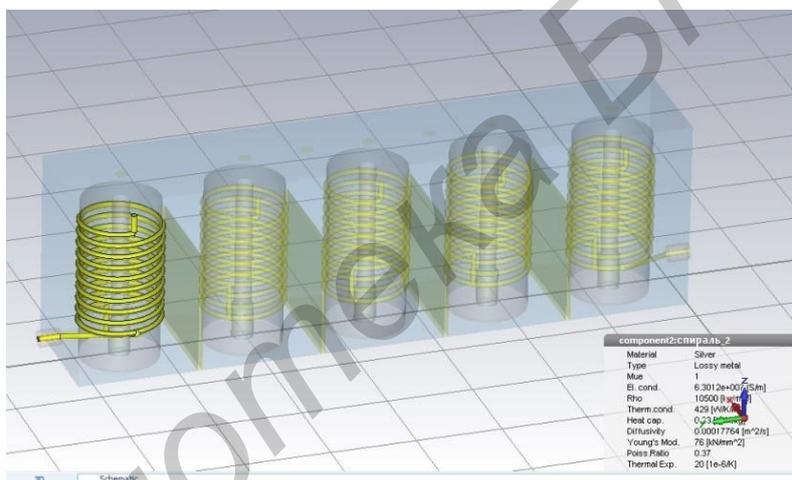


Рис. 4. 3-D Модель фильтра на спиральных резонаторах

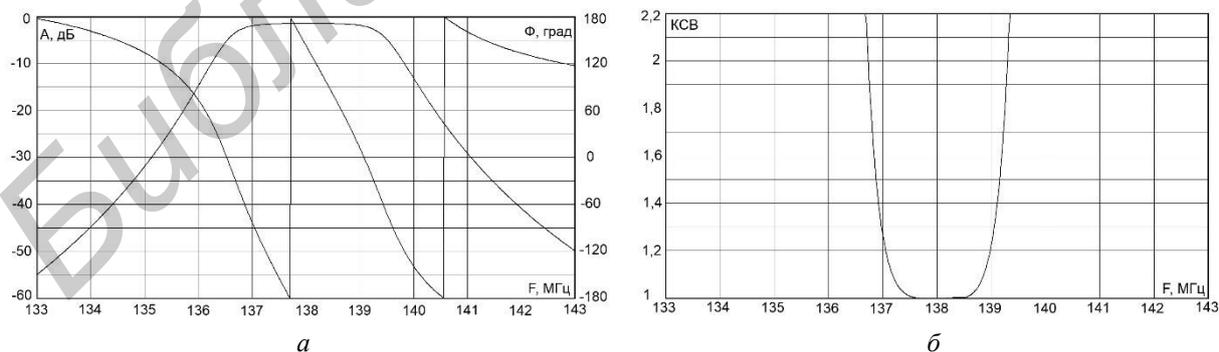


Рис. 5. Результаты моделирования АЧХ, ФЧХ (а) и КСВ (б) фильтров на спиральных резонаторах

### Практическая реализация полосового фильтра на спиральных резонаторах

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

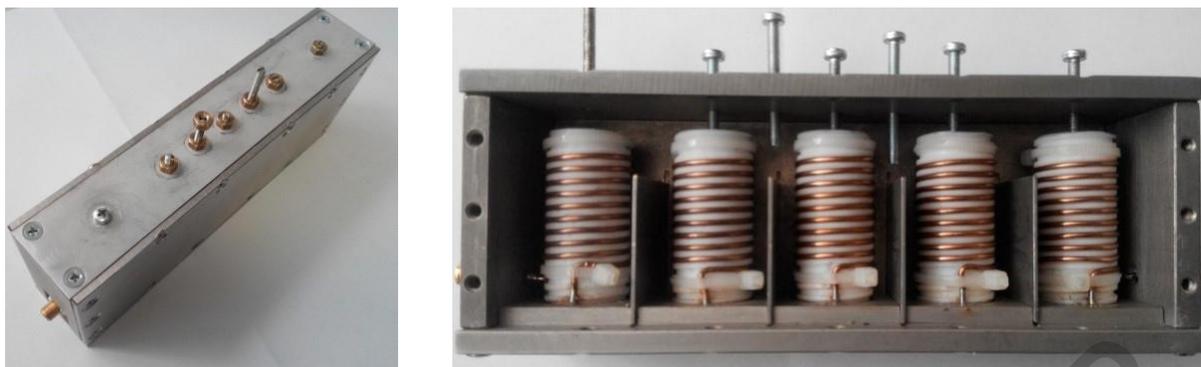


Рис. 6. Общий вид (а) и внутреннее конструктивное исполнение (б) полосового фильтра

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.

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

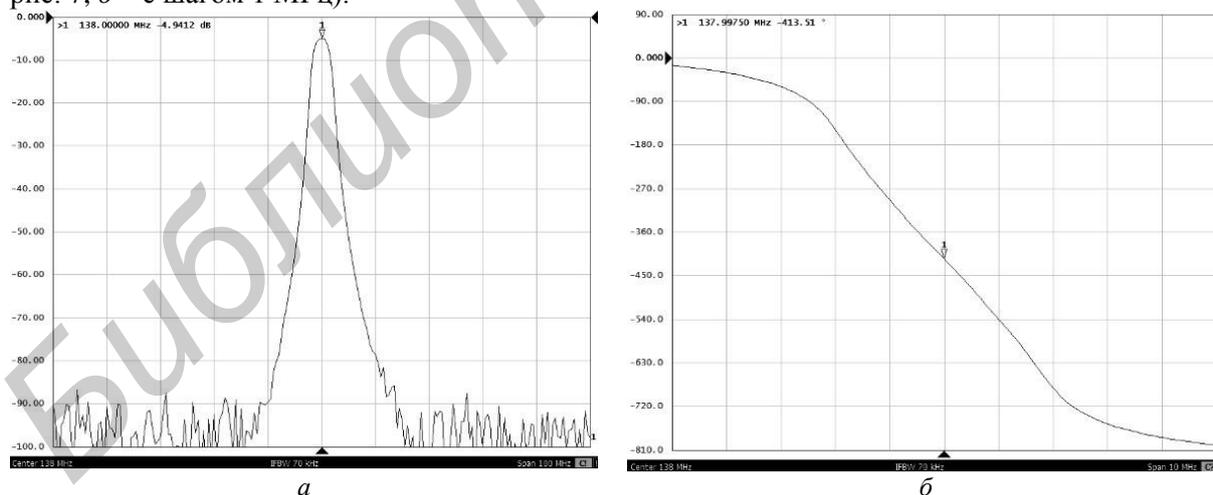


Рис. 7. АЧХ (а) и ФЧХ (б) разработанного полосового фильтра метрового диапазона на спиральных резонаторах

Неравномерность передаточной характеристики фильтра в полосе пропускания не превышает 1 дБ, потери в полосе пропускания не превышают 4,5 дБ, селективность фильтра на отстройках  $\pm 5$  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 отобразено с шагом 1 МГц).

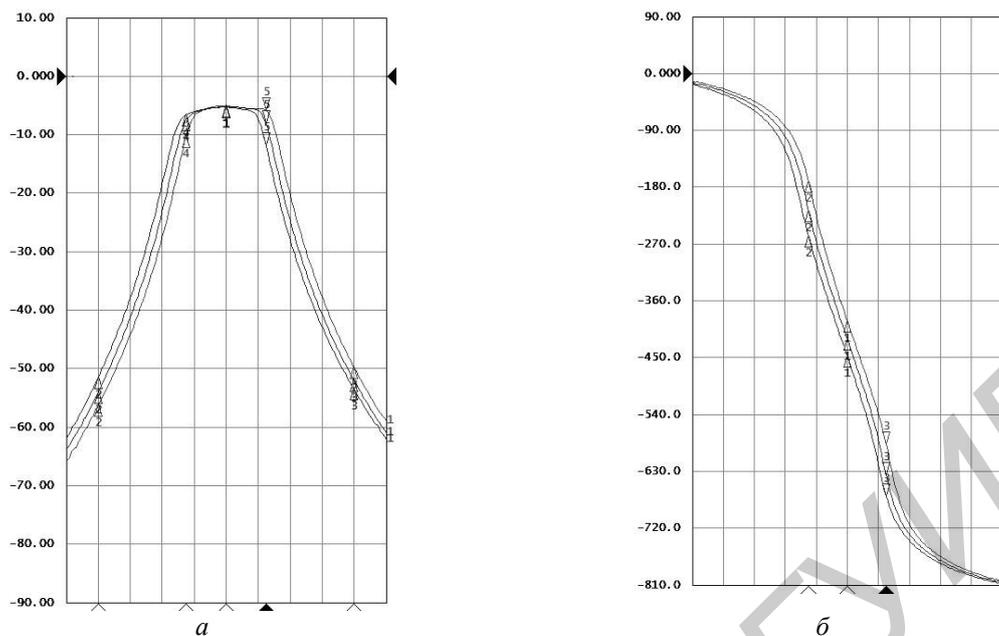


Рис. 8. АЧХ (а) и ФЧХ (б) разработанного полосового фильтра метрового диапазона на спиральных резонаторах для трех значений температур: 8 °С, 25 °С и 50 °С

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 ( $\Delta f$  [Гц]) с учетом диапазона рабочих температур ( $\Delta t$  [°С]) в соответствии с эмпирической формулой:

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

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](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](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.