

## Малогабаритный фильтр на спиральных резонаторах

Т.С. Тимошенко, А.И. Тюменцев

АО Омский научно-исследовательский институт приборостроения

**Аннотация:** Показаны возможности реализации интегральных спиральных резонаторов СВЧ диапазона в структуре ЛТСС и двухзвенного фильтра на их основе. Приведены расчетные соотношения, разработана 3D модель фильтра на спиральных резонаторах и получены расчетные S-параметры модели фильтра.

**Ключевые слова:** спиральный резонатор, фильтр на спиральных резонаторах, СВЧ фильтр, ЛТСС.

### Введение

Как известно, для обеспечения устойчивой и качественной работы малогабаритной аппаратуры связи в СВЧ диапазоне необходимы миниатюрные фильтры с низкими потерями в полосе пропускания. Одним из таких решений могут стать малогабаритные фильтры на спиральных резонаторах, выполненные на основе ЛТСС. Создание малогабаритных узкополосных фильтров с малыми потерями в СВЧ диапазоне является важной задачей, в силу того, что фильтры на основе полосковых линий в нижней части СВЧ диапазона имеют большие габаритные размеры, а изготовление ПАВ фильтров на высоких частотах (свыше 1000 МГц) имеет технологические трудности.

Диапазон частот классических фильтров на спиральных резонаторах от 30 до 300 МГц, предлагаемый вариант малогабаритных фильтров на спиральных резонаторах позволит расширить рабочий диапазон частот до 5000 МГц. Добротность спиральных резонаторов такого типа (около 150-170) позволяет создавать фильтры с узкими полосами пропускания (от 1 до 20%) и малыми вносимыми потерями при высоких уровнях входной мощности. Спиральный резонатор, представляет собой четвертьволновый отрезок спиральной линии и состоит из однослойной цилиндрической катушки внутри круглого или прямоугольного высокопроводящего экрана. Реализация спирального резонатора в виде интегрированной в керамическую подложку катушки индуктивности, замкнутой с одной стороны на экран, со свободным концом с другой стороны и отводом, позволит не только уменьшить размеры спирального резонатора в  $\sqrt{\epsilon}$  раз по сравнению с его классическим исполнением, реализовывать узкополосные малогабаритные фильтры в интегральном виде, но и расширить верхний предел диапазона частот до 5000 МГц.

### Расчет интегрального спирального резонатора

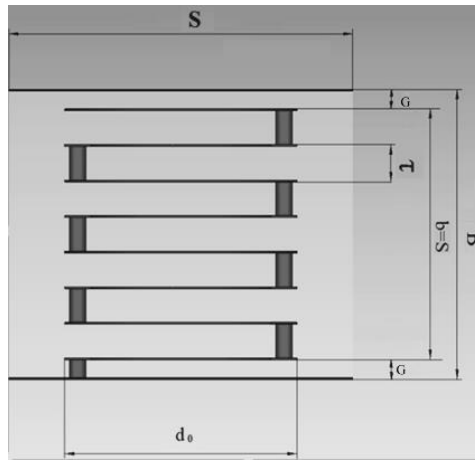
Двухрезонаторный фильтр представляет собой конструкцию, состоящую из двух резонаторов, рассчитанных на центральную частоту  $f_0$ , с емкостной или индуктивной связью. Для расчета фильтра на двух спиральных резонаторах с центральной частотой 1900 МГц и полосой пропускания 8% проведем расчет спирального резонатора.

При расчете интегрального спирального резонатора необходимо принять во внимание следующие уточнения:

- расстояние  $\tau$  между витками спирали определяется толщиной керамического листа или кратна ей;
- максимальная высота резонатора ограничивается максимально возможным

количеством керамических слоев в структуре (для LTCC не более 40 слоев [1]);  
 - за диаметр проводника  $d$  принимаем ширину печатного полоска интегральной спирали.

Конструкция интегрального спирального резонатора показана на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Конструкция интегрального спирального резонатора в LTCC

Методика расчета фильтра на спиральных резонаторах заключается в основном в расчете конструктивных параметров резонатора, определения типа связи между резонаторами и ее настройки. Чтобы произвести расчет параметров спирального резонатора примем во внимание следующие соотношения [2]: отношение диаметра спирали  $d_0$  к стороне стенки квадратного экрана  $S$  должно быть  $\frac{d_0}{S} = 0.66$ , расстояние от спирали до верхнего и нижнего экрана  $G = 0,3S$ , а ширина проводника не менее  $0,5\tau$ . Таким образом, задавая диаметр спирали  $d_0$ , а также зная толщину листа диэлектрика  $\tau$ , можно найти высоту стенки экрана  $B$  и ширину проводника  $d$ .

Количество витков резонатора [2]:

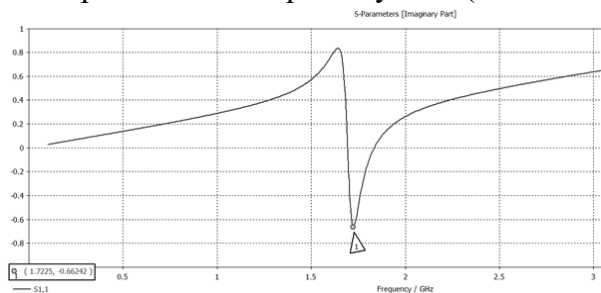
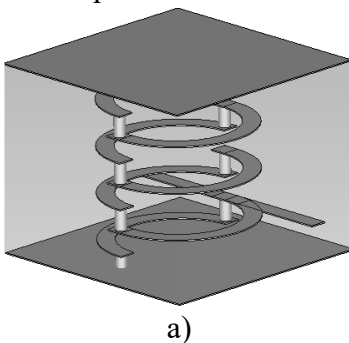
$$N = \frac{4064}{f_0 S \sqrt{1 + \frac{1.772 \Delta \epsilon}{S}}} \quad (1)$$

где  $\Delta$  - толщина стенки каркаса.

Ненагруженную добротность резонатора можно оценить исходя из выражения:

$$Q_u = 60S\sqrt{f_0} \quad (2)$$

На рисунке 2а и 2б представлены конструкция рассчитанного резонатора и его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Как видно из представленной АЧХ резонатор обладает достаточно широким резонансным промежутком (около 10%).



**Рисунок 2.** Конструкция спирального интегрального резонатора в LTCC (а), Амплитудно-частотная характеристика резонатора (б)

### Расчет параметров двухрезонаторного фильтра

После расчета параметров резонатора, оценки его добротности и резонансного промежутка рассчитаем параметры двухрезонаторного фильтра.

Добротность фильтра  $Q_d$  равна:

$$Q_d = 0,5q_i \frac{1}{\Delta\omega} \quad (3)$$

где  $q_i$  – коэффициенты НЧ фильтра-прототипа [4],  $\Delta\omega$  – ширина полосы пропускания.

Расстояние отвода резонатора для связи с входной и выходной нагрузкой [3]:

$$\text{tap} = \frac{N\theta^\circ}{90^\circ} \quad (4)$$

где  $\theta$  – электрический угол точки минимума стоячей волны напряжения, а  $\sin\theta = \sqrt{\frac{R_b R_{\text{tap}}}{2Z_0 Z_0}}$ ,  $\text{tap}$  – число витков от холодного конца до отвода,  $R_{\text{tap}}$  – входное/выходное сопротивление фильтра,  $Z_0$  – характеристическое сопротивление резонатора:  $Z_0 = \frac{136190}{f_0 d_0} \cdot \frac{R_b}{Z_0}$  - отношение сопротивления незаземленной части резонатора до отвода к входному сопротивлению можно найти из соотношения:

$$\frac{R_b}{Z_0} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{1}{Q_d} - \frac{1}{Q_u} \right) \quad (5)$$

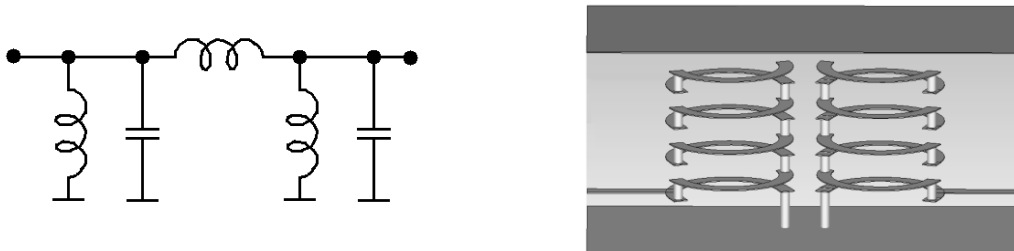
Для оценки индуктивной связи в фильтре, выполненной в виде окна в экране со стороны короткозамкнутых концов резонаторов необходимо оценить коэффициент связи:

$$\chi = \frac{\Delta\omega}{\omega_0 \sqrt{q_i q_{i+1}}} \quad (6)$$

После чего, исходя из полученного значения коэффициента связи и принимая во внимание выражение  $\chi = (h/d_0)^{1,91}$  по графику, приведенному в [2], можно оценить размер высоты окна между резонаторами в фильтре.

### Результаты электромагнитного моделирования

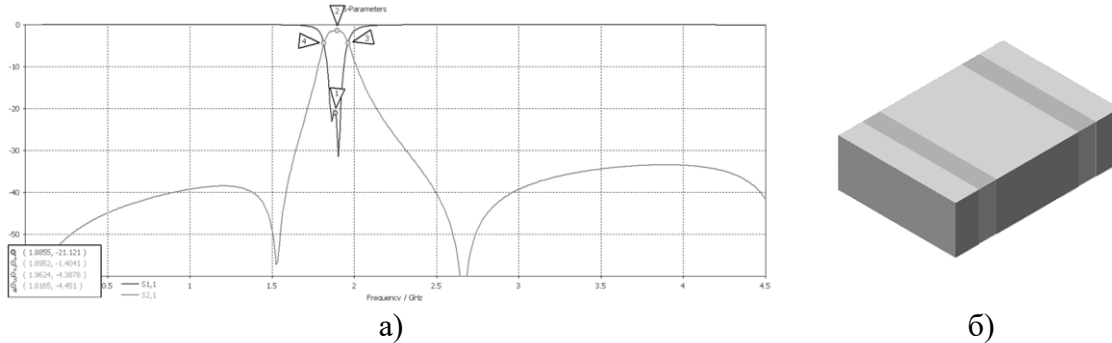
Для примера, приведена конструкция двухрезонаторного фильтра с центральной частотой 1900 МГц и полосой пропускания 8%, представляющего собой два резонатора связанных между собой индуктивной связью. Эквивалентная схема и электромагнитная модель такого фильтра приведена на рисунке 3а и 3б.



**Рисунок 3.** Эквивалентная схема фильтра (а), конструкция фильтра на интегральных спиральных резонаторах (б)

Конструктивно модель фильтра была выполнена в 11 слоях низкотемпературной керамики DuPont Green Tare 951 с диэлектрической проницаемостью 7,8. Для рассчитываемого фильтра размер окна связи равен высоте резонатора.

Подстройка разработанного фильтра проходила в несколько итераций электромагнитного моделирования. На рисунке 4 приведена окончательная характеристика электромагнитной модели разработанного фильтра и его внешний вид.



**Рисунок 4.** АЧХ фильтра на интегральных спиральных резонаторах (а), внешний вид готового фильтра (б)

Как видно из приведенной на рисунке 4 амплитудно-частотной характеристики, получившийся фильтр имеет узкую полосу пропускания 8% при центральной частоте 1900 МГц, вносимые потери в полосе пропускания не более 1,5 дБ, затухание за полосой не хуже 30 дБ до третьей гармоники и возвратные потери не хуже 20 дБ, при этом габаритные размеры всего фильтра составили 4,6x2,0x2,2 мм.

### Заключение

Таким образом в работе показана возможность реализации спиральных резонаторов СВЧ диапазона в структуре LTCC подложки, а также приведен алгоритм расчета двухрезонаторного фильтра на их основе. Показана конструкция малогабаритного двухрезонаторного узкополосного фильтра с центральной частотой 1900 МГц, полосой пропускания 8%, вносимыми потерями менее 1,5 дБ и затуханием в дальней зоне не хуже 30 дБ. Предложенные фильтры могут найти применение как в новых разработках, так и для замены уже применяемых фильтров в диапазоне частот от 150 МГц до 5 ГГц.

### Список литературы

1. Вендик И.Б. и др. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига //Компоненты и технологии. – 2005. – Вып. 5. – С. 190-196.
2. Знаменский А.Е. Алексеев Л.В., Лоткова Е.Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. – М. : Связь, 1976.
3. Zverev A.I. Handbook of Filter Synthesis. – John Wiley and Sons, Inc, 1967.
4. Зааль Р. Справочник по расчету фильтров: Пер. с нем. – М. : Радио и связь, 1983.