

## **Исследование и изготовление опытных образцов перестраиваемых фильтров на ферритовых резонаторах с микрополосковыми выводами диапазона частот 400 – 4000 МГц**

*Представлены малогабаритные трехзвенные фильтры на ферритовых резонаторах с микрополосковыми выводами. Приведены параметры экспериментальных и опытных образцов фильтров. Рассмотрены параметры фильтров с постоянными магнитами.*

**Ключевые слова:** ферритовые резонаторы, перестройка центральной частоты, полосно-пропускающий фильтр, микрополосковые выводы

Проведено исследование экспериментальных и опытных образцов микрополосковых фильтров на ЖИГ резонаторах низкочастотного СВЧ диапазона частот 400 – 4000 МГц на основе базовой конструкции и технологии трехзвенных фильтров ФПИНЗ-4, ФПИНЗ-4(А) [1]. Для выполнения работы использовались ориентированные сферические ферритовые резонаторы (ФР) с различной низкой намагниченностью насыщения  $4\pi M_s = 140 - 650$  Гс. Намагниченность насыщения  $4\pi M_s$  ФР и условные обозначения монокристаллических ферритов приведены в скобках (12КГ -  $140 \pm 15$  Гс, 15КГ -  $200 \pm 20$  Гс, 25КГ -  $300 \pm 30$  Гс, 30 КГ -  $360 \pm 20$  Гс, 35 КГ -  $430 \pm 30$  Гс, 50 КГ -  $620 \pm 30$  Гс).

Конструктивное отличие микрополосковых фильтров на ЖИГ-резонаторах от аналогичных фильтров на коаксиальных линиях заключается, во-первых, в замене коаксиальных разъемов на микрополосковые. Последние выполнены в виде коротких отрезков ( $\approx 5$ мм) несимметричных микрополосковых линий, содержащих, поликоровую подложку толщиной 1 мм и микрополосок. Второе отличие заключается в том, что электромагнит выполнен несимметричным, нижняя часть магнитопровода является плоским основанием из магнитомягкого материала, на котором размещены СВЧ структура фильтра, заключенная в прессованном пластмассовом металлизированном корпусе, микрополосковые разъемы и экранированный магнитопровод с катушкой управления. СВЧ структура фильтра содержит сферические ориентированные на керамических держателях ЖИГ-резонаторы, размещенные в резонаторных камерах, ФР окружены под прямым углом витковыми элементами связи (ВЭС), короткозамкнутыми на корпус свободными концами и последовательно соединенными между собой отрезками проводников  $l \leq \lambda/4$ . На входе и выходе ВЭС соединены с отрезками коаксиальных линий 50 Ом, вмонтированными в пластмассовый металлизированный корпус. Микрополосковые выводы соединены снаружи с отрезками этих коаксиальных линий. Коэффициент связи ФР с ВЭС, определяющий минимальные потери фильтра и ширину полосы пропускания  $\Delta f$  однозвенного фильтра, оценивается как

$$K \approx A \frac{\gamma * 4\pi M_s * R^3}{\omega * \Delta H * r^2} \varphi, \quad (1)$$

где  $A$ - коэффициент размерности,  $\gamma = 2.8$  МГц/Э,  $\omega = 2\pi f$  - частота сигнала,  $R$ - радиус ФР,  $r$ - радиус ВЭС,  $\varphi$  - угол охвата ФР ВЭС,  $\Delta H$ -ширина ФМР ФР.

$$\Delta f = \gamma \Delta H (1 + \hat{E}) \quad (2)$$

В низкочастотной части СВЧ диапазона (метровом и дециметровом диапазоне длин волн) для получения приемлемых потерь пропускания и ширины полосы  $\Delta f = 10 - 30 \text{ МГц}$  необходимо использовать ВЭС с большим углом охвата ФР от  $3\pi$  до  $5\pi$ . При этом ФР должны иметь большой диаметр ( $\varnothing \approx 0.6 - 0.8 \text{ мм}$ ), а намагниченность насыщения определяется из условия получения необходимой низкой рабочей частоты при уровне входной мощности, как правило, не менее 1 мВт ( $f_H \approx 2/3 * \gamma 4\pi M_s$ ) [2]. При этом ширина линии ФМР ( $\Delta H$ ) ФР, определяющая их собственную добротность  $Q_0$ , должна быть как можно меньше, что на практике составляет 0.3-0.7 Эрстед.

### Образцы перестраиваемых фильтров с микрополосковыми выводами

Параметры исследованных образцов фильтров (минимальные потери в полосе пропускания  $\alpha_0$ , полоса пропускания по уровню минус 3 дБ ( $\Delta f_3$ ), неравномерность потерь (паразитные резонансы) в полосе пропускания  $\Delta\alpha$ ) приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ п.п.	Полоса перестройки, МГц	Марка ФР	$\alpha_0$ , дБ	$\Delta f_3$ , МГц	$\Delta\alpha$ , дБ	Габариты, мм	Примечание
1	400÷650	12КГ	$\leq 6$	$\leq 15$	$\leq 1.5$	30x30x12	1,6
2	450÷900	15 КГ	5.2 ÷ 6	11 ÷ 12	0 ÷ 0.2	30x30x12	2,7
3	750÷1500	25КГ	3.7 ÷ 5	17 ÷ 23	0 ÷ 0.3	30x30x12	7
4	900 ÷ 1300	30 КГ	2.5 ÷ 4.7	13 ÷ 17	0 ÷ 0.7	30x30x12	6
5	1200÷1800	35КГ	4.2 ÷ 4.5	16 ÷ 17	0	30x30x19	3,7
6	1700÷2500	35 КГ	4.3 ÷ 4.5	17 ÷ 18	0	30x30x19	4,7
7	2000÷3000	35 КГ	3.8 ÷ 4.5	17 ÷ 19	0	30x30x19	5,7
8	1500÷2000	50КГ	3.2 ÷ 3.3	37 ÷ 44	0 ÷ 0.4	30x30x19	7
9	2700÷3100	50 КГ	2.3 ÷ 3.2	32 ÷ 40	0 ÷ 0.3	30x30x19	6
10	2000÷4000	50КГ	3.1 ÷ 3.5	31 ÷ 38	0 ÷ 1.2	30x30x19	7

Примечания:

1. Заграждение при отстройке на 30 МГц – не менее 40 дБ; рабочая температура от минус 20°С до плюс 40°С. Параметры при воздействиях температур:  $\alpha_0 \leq 9$  дБ,  $\Delta f_3 \geq 8$  МГц.
2. Фильтр настраивался на частоте 550 МГц
3. Фильтр настраивался на частоте 1500 МГц
4. Фильтр настраивался на частоте 2000 МГц
5. Фильтр настраивался на частоте 2500 МГц
6. Опытный образец
7. Экспериментальный образец

Для фильтра №1 при уменьшении входной мощности до единиц микроватт нижняя граничная частота уменьшалась до 140÷160 МГц ( $\approx 1/3 \gamma 4\pi M_s$ ) [2].

Типичные амплитудно-частотные характеристики фильтров диапазонов частот 400÷650 МГц (№1 таблица 1) и 2000÷4000 МГц (№10 таблица 1) приведены на рис.1, рис.2.

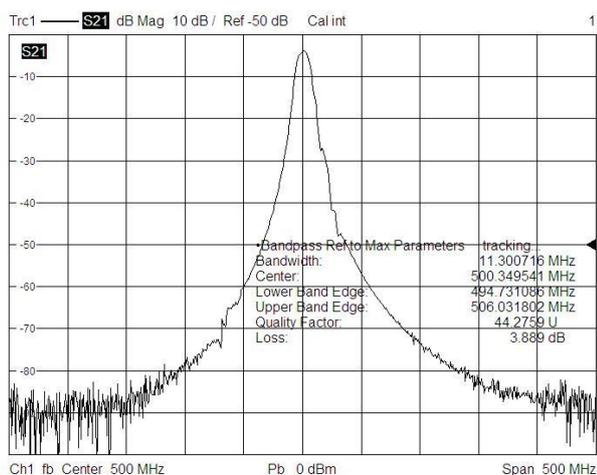


Рисунок 1.

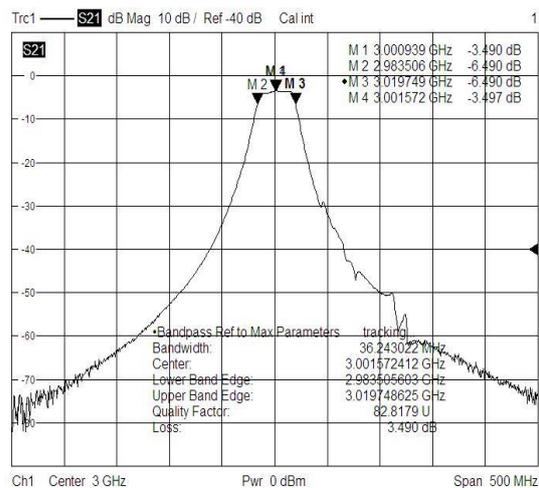


Рисунок 2.

Исследование показало, что включение позисторов понижает рабочую частоту на 60 МГц в этом диапазоне, при этом существенно уменьшается ширина полосы пропускания, а также возрастают потери и уровни паразитных резонансов.

Экспериментальный образец фильтра №3 был исследован на более высокой частоте, чем №2 в диапазоне от 750 до 1500 МГц. Рабочая входная мощность 1 мВт при  $T=20^{\circ}\text{C}$ .

Опытные образцы фильтра ФПИНЗ-4 были испытаны в диапазоне 0.9 – 1.3 ГГц с использованием ФР марки 30КГ. Внешний вид фильтров №1,2,3,4 приведен на рис.3.

Исследованы экспериментальные образцы фильтров (№ 5,6,7 таблица 1) на основе ФР марки 35 КГ. Экспериментальные образцы настраивались на различных частотах диапазона  $1.5 \div 2.5$  ГГц. Затем снимались характеристики при электрической перестройке частоты.

Для обеспечения необходимого резонансного ( $H=f/\gamma$ ) поля для намагничивания ФР высота электромагнита была увеличена до 19 мм (рис.4).



Рисунок 3.



Рисунок 4.

Изготовлены и проведены испытания опытных образцов фильтров на ФР марки 50КГ в диапазоне частот  $1.5 \div 1.85$  ГГц (№8 таблица 1). Испытания фильтра в интервале температур от минус 50 до  $+70^{\circ}\text{C}$  показали, что достигнуты параметры: минимальные потери в пределах

2.8÷4.4 дБ, полоса пропускания 27÷42 МГц, неравномерность потерь в полосе пропускания 0÷0.8 дБ.

Опытные образцы микрополосковых фильтров в диапазоне частот 2.7-3.1 ГГц (№9 таблица 1) также выполнены с использованием ФР марки 50 КГ. Параметры опытных образцов в нормальных климатических условиях и в интервале рабочих температур от минус 40 до +55°: минимальные потери в полосе пропускания не более 5 дБ, ширина полосы пропускания по уровню минус 3 дБ в пределах 35±5 МГц, неравномерность потерь в полосе пропускания не более

1.5 дБ, подавление вне полосы пропускания не менее 70 дБ, ток управления не более 400мА, температурный дрейф центральной частоты не более 5 МГц. Основными техническими трудностями было обеспечение низкого температурного дрейфа и обеспечение высоких параметров в интервале температур. При изготовлении фильтров были использованы технические решения, предложенные в работах [3,4].

Параметры одиночного образца фильтра, настроенного специально с подбором ФР по низкому уровню паразитных резонансов в более широком частотном диапазоне от 2 ГГц до 4 ГГц приведены в таблице 1 (№9).

#### **Опытные образцы микрополосковых фильтров с постоянными магнитами**

В фильтрах использованы ФР марки 50 КГ. На рис.5 приведен внешний вид фильтров. В верхней части магнитопровода фильтра расположен винт, с помощью которого можно изменять резонансную частоту при нулевом токе в катушках управления (фиксированную центральную частоту). Габариты 30х30х14 мм.



Рисунок 5.

Ниже рассмотрены несколько оптимальных вариантов настройки экспериментальных образцов (таблица 2)

Таблица 2

№ п.п.	Фиксированная центральная частота, МГц	Полоса перестройки, МГц	$\alpha_0$ , дБ	$\Delta f_3$ , МГц	$\Delta\alpha$ , дБ
1	2000	1500 ÷ 2000 2000 ÷ 2500	2.9 ÷ 3.3 2.9 ÷ 3.1	39 ÷ 42 42 ÷ 48	0 ÷ 0.2
2	2700	2200 ÷ 2700 2700 ÷ 3200	3.1 ÷ 3.4 3.1 ÷ 3.2	33 ÷ 36 36 ÷ 39	0 ÷ 0.6 0 ÷ 0.2
3	4000	3300 ÷ 4000 4000 ÷ 4700	2.7 ÷ 2.8 2.8 ÷ 3.1	43 ÷ 51 51 ÷ 62	0 ÷ 0.1 0.1 ÷ 0.9

Для электрической перестройки фильтра вниз и вверх по частоте направление тока в катушке управления изменялось на противоположное. Диапазон электрической перестройки  $\pm 500$  МГц для образцов №1, №2 и  $\pm 700$  МГц для образца №3.

Рассматриваемые фильтры имеют преимущества по сравнению с фильтрами без магнитов: обладают более низкой крутизной перестройки (2.5 МГц/мА, вместо 7.5 МГц/мА), потребляемая мощность в два раза меньше, габариты 30x30x14 мм (вместо 30x30x19 мм).

В результате проведенной работы был создан ряд фильтров с микрополосковыми выводами на основе технологии серийно выпускаемых фильтров ФПИНЗ-4 (А) в диапазоне от 400 МГц до 4 ГГц. Проработка вариантов фильтров покрывает весь частотный диапазон, что является основой для быстрого изготовления фильтров на любую частоту диапазона.

#### Библиографический список

1. Ферритовые фильтры ФПИНЗ-4, ФПИНЗ-4А, технические условия ЕСКФ 430441015ТУ, 2007г.
2. Рогозин В.В., Чуркин В.И. Ферритовые фильтры и ограничители мощности, «Радио и Связь», М, 1985г.
3. Патент на полезную модель № 128785, Сверхвысокочастотный ферритовый фильтр (варианты), 27.05.13. Авторы: Чуркин В.И., Дубовой В.А., Фирсенков А.А.
4. Патент на полезную модель №148202, Сверхвысокочастотный ферритовый фильтр, 27.10.14. Авторы: Чуркин В.И., Фирсенков А.И., Дубовой В.А.