

## КОМПАКТНЫЕ ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФИЛЬТРЫ НА СВЕРНУТЫХ ШПИЛЕЧНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

**Аристархов Григорий Маркович**

*МТУСИ, д.т.н., проф., зав. кафедры «Электроника», Москва, Россия*

**Кириллов Игорь Николаевич**

*МТУСИ, аспирант кафедры «Электроника», Москва, Россия*

**Марковский Андрей Владимирович**

*МТУСИ, студент, Москва, Россия*

**Пустовалова Виктория Андреевна**

*МТУСИ, студентка, Москва, Россия*

[g.aristarkhov2010@yandex.ru](mailto:g.aristarkhov2010@yandex.ru)

### **Аннотация**

*Исследуются возможности существенного уменьшения габаритов структур микрополосковых фильтров на сонаправленных шпилечных резонаторах и одновременного повышения их частотной избирательности. Показано, что в данных структурах возможно формирование значительного количества ( $P=N+3$ ) полюсов затухания на конечных частотах, что дает возможность разрядки спектра паразитных полос пропускания до третьей гармоники. Также исследованы механизмы формирования, расщепления, смыкания и управления расположением полюсов затухания на частотной оси с целью обеспечения требуемого уровня затухания в заданных полосах заграждения.*

### **Ключевые слова**

*Микрополосковый фильтр, сонаправленные шпилечные резонаторы, решетчатая секция, электромагнитное взаимодействие, расщепление и вырождение полюсов рабочего затухания, разрядка спектра паразитных полос пропускания.*

### **Введение**

Основной тенденцией развития микрополосковых фильтров (МПФ) является повышение их частотной избирательности, уменьшение потерь в полосе пропускания и габаритов. Сочетание этих качеств может быть достигнуто в структурах с существенно ограниченным числом резонаторов только при условии формирования в них значительного числа полюсов рабочего затухания. К таким структурам следует отнести фильтры на полуволновых шпилечных резонаторах с дополнительными связями между несмежными резонаторами [1-4], а также МПФ на сонаправленных шпилечных резонаторах [5]. Последние из названных структур обладают более высокой частотной избирательностью, так как в них формируется при определенных условиях большее число полюсов рабочего затухания на конечных частотах при том же количестве резонаторов в структуре [6].

В данной работе исследуются возможности уменьшения габаритов МПФ на сонаправленных шпилечных резонаторах при одновременном повышении для ряда структур их частотной избирательности.

### **МПФ на сонаправленных шпилечных резонаторах с дополнительной связью между их плечами**

Традиционно повышение компактности микрополосковых устройств СВЧ различного функционального назначения достигается выполнением их отдельных отрезков линий передачи в виде различных конструктивных форм типа: меандр, спираль, "шпилька", "скрепка", и т. п. Исследуем возможность применения данного подхода при реализации более компактных структур МПФ за счет свертывания его резонаторов. Решающее значение при этом будут иметь взаимная ориентация резонаторов относительно друг друга и их электромагнитное взаимодействие.

На рисунке 1 представлена одна из симметричных структур МПФ, в которой полуволновые сонаправленные шпилечные резонаторы выполнены в виде "скрепки", в результате чего между плечами этих резонаторов образуется дополнительная электрическая связь. Каждая пара смежных резонаторов образует четвертьволновую решетчатую секцию. В крайних полосно-пропускающих решетчатых секциях преобладающей связью между микрополосковыми линиями (МПЛ) является магнитная связь. Это обуславливает формирование в каждой из этих секций полюса рабочего затухания в области нижних частот [6]. Расщепление этих полюсов затухания обусловлено магнитной связью между этими секциями. В центральной решетчатой секции преобладающей является электрическая связь между ее МПЛ, что обеспечивает формирование полюса рабочего затухания вблизи полюсы пропускания в области верхних частот. Седловидная форма рабочего затухания МПФ (рис. 1, б) в области верхних частот свидетельствует о том, что в этой полосе частот возможно формирование входным и выходным шлейфами структуры еще двух полюсов затухания, которые являются вырожденными. Их вырождение обусловлено магнитной связью между плечами каждого из крайних резонаторов.

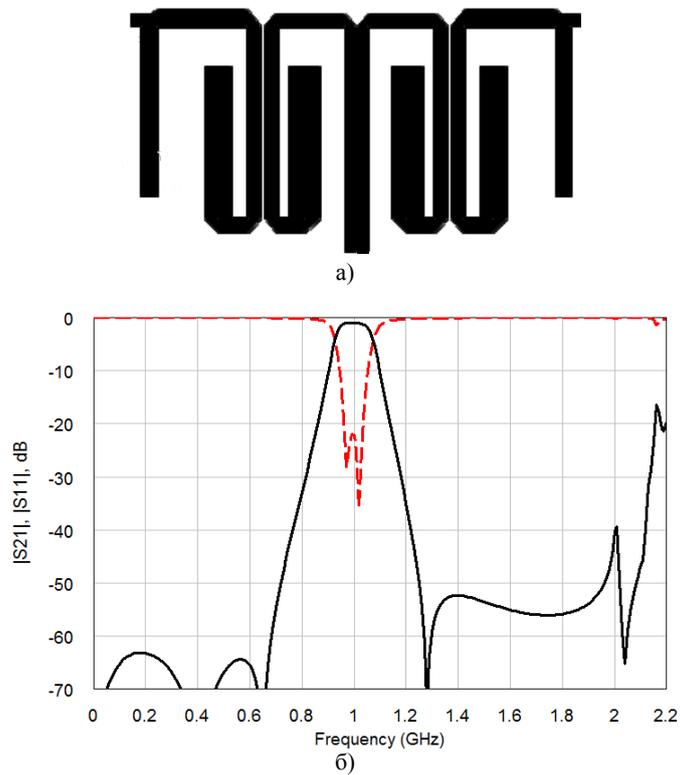


Рис. 1. Несимметричная структура четырехрезонаторного МПФ

Исследуем два способа расщепления этих полюсов рабочего затухания с целью повышения частотной избирательности МПФ. На рисунке 2 представлена несимметричная структура четырехрезонаторного МПФ, в которой входной и выходной шлейфы имеют разную электрическую длину. Здесь и далее все рассматриваемые структуры реализуются на подложке толщиной  $H=1$  мм с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=10$ . Согласование этой структуры МПФ достигается выбором разной ширины отрезков МПЛ, образующих эти шлейфы. В  $N$ -резонаторной структуре формируется  $P=N+1$  полюсов затухания. Минимальная ширина зазора между МПЛ в рассматриваемой структуре  $S_{\min}/H=0.2$ , а площадь подложки, занимаемая топологией структуры, составляет  $A \times B=35 \times 20$  мм<sup>2</sup>, то есть  $0.052\lambda^2$ , где  $\lambda$  – длина квази Т-волны  $n$  а центральной частоте полосы пропускания.

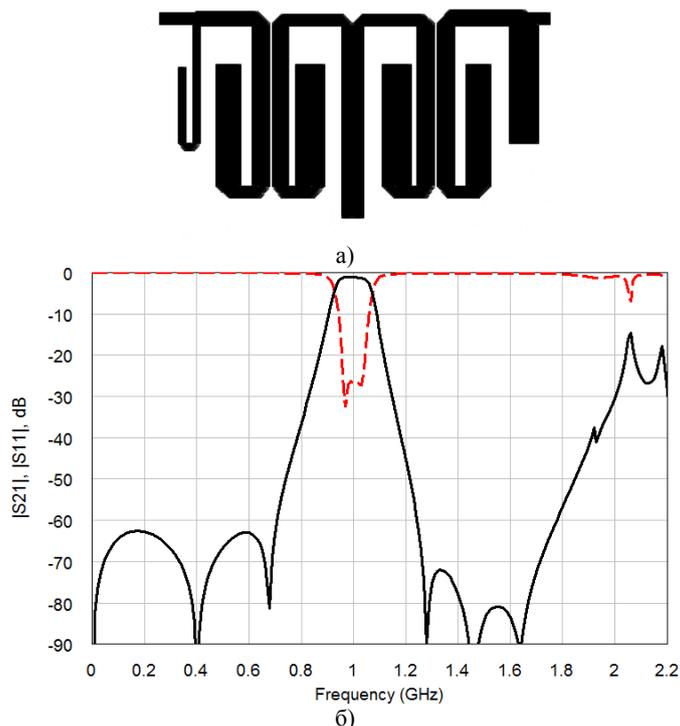


Рис. 2 Несимметричная структура четырехрезонаторного МПФ

Второй способ расщепления полюсов затухания, которые формируются входным и выходным шлейфами, заключается в реализации дополнительной электрической связи между ними. Таким образом, в симметричной структуре вводится дополнительная кросс-связь между несмежными резонаторами (рис. 3). В этом случае формируется  $N+2$  полюса затухания, что обеспечивает более высокий уровень затухания в полосе заграждения в области верхних частот ( $\sim 70$  дБ). Минимальная ширина зазора между МПЛ центральной решетчатой секции составляет  $S_{\min}/H=0.2$ , а площадь подложки, которую занимает структура МПФ, равна  $A \times B=30 \times 25 \text{ мм}^2$ , то есть  $0.056\lambda^2$ .

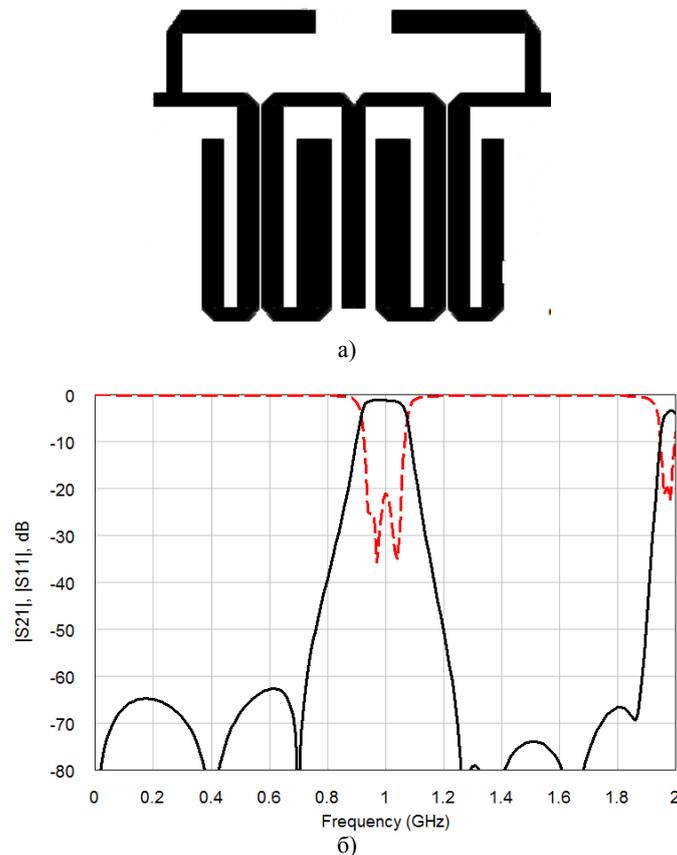


Рис. 3 Структура МПФ с дополнительной кросс-связью между несмежными резонаторами

Повысим крутизну рабочего затухания в области нижних частот. Это достигается при условии реализации каждой из решетчатых секций полюса рабочего затухания в этой области частот (рис. 4). При этом центральная решетчатая секция формирует близлежащий к полосе пропускания полюс затухания. Чрезмерное расщепление полюсов затухания, формируемых крайними решетчатыми секциями, компенсируется дополнительной электрической связью между ними (рис. 4, нижний участок топологии). Минимальная ширина зазора между связанными МПЛ в данной структуре равна  $S_{\min}/H=0.3$ , а площадь подложки, которую занимает топология структуры МПФ, составляет  $A \times B=27 \times 25 \text{ мм}^2$ , то есть  $0.05\lambda^2$ . При этом в данной структуре достигается разрядка спектра паразитных полос пропускания.

Повышение крутизны рабочего затухания в области верхних частот может быть достигнуто в рассмотренных выше структурах только за счет существенного усиления электромагнитного взаимодействия между МПЛ в центральной решетчатой секции (рис. 2 и 3). При этом минимальная ширина зазора между МПЛ должна быть  $S_{\min}/H < 0.05$ , что ограничивает возможности физической реализации МПФ в рамках стандартных технологий изготовления. Осуществим в центральной решетчатой секции гальваническое примыкание связанных МПЛ, в результате чего вместо решетчатой секции образуется шлейф. Исследуем селективные возможности вновь образованной структуры при различных (согласно рис. 2 и 3) способах расщепления полюсов затухания, которые формируются входным и выходным шлейфами.

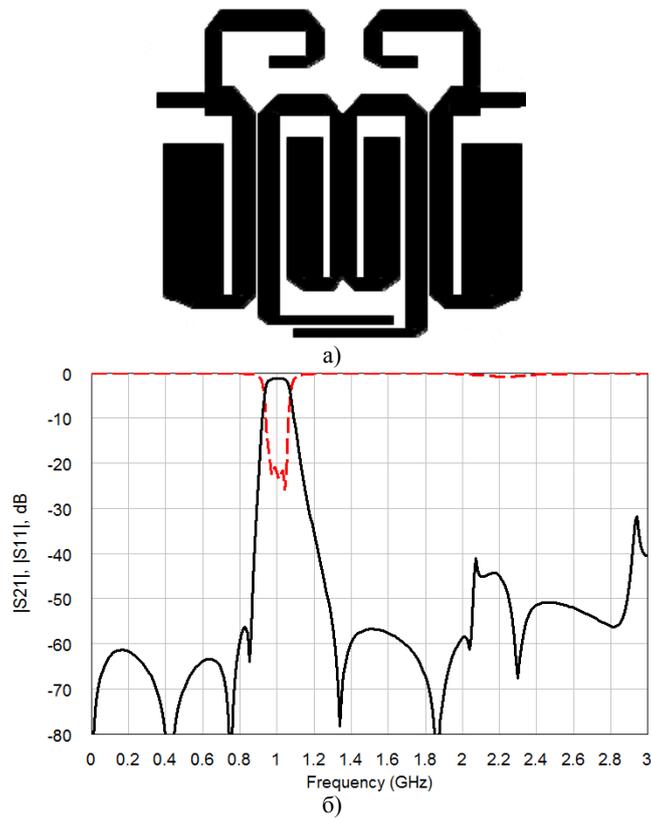


Рис. 4. Структура МПФ с повышенной частотной избирательностью в области нижних частот

**МПФ с повышенной крутизной рабочего затухания в области верхних частот**

На рисунке 5 представлена симметричная структура МПФ, в которой центральный шлейф формирует полюс рабочего затухания в области верхних частот вблизи полосы пропускания. Он обеспечивает более высокую крутизну рабочего затухания в его переходной области. Минимальная ширина зазора между связанными МПЛ в этой структуре равна  $S_{\min}/H=0.37$ . Площадь подложки, которую занимает топология МПФ, составляет  $A \times B = 25 \times 24 \text{ мм}^2$ , то есть  $0.045\lambda^2$ .

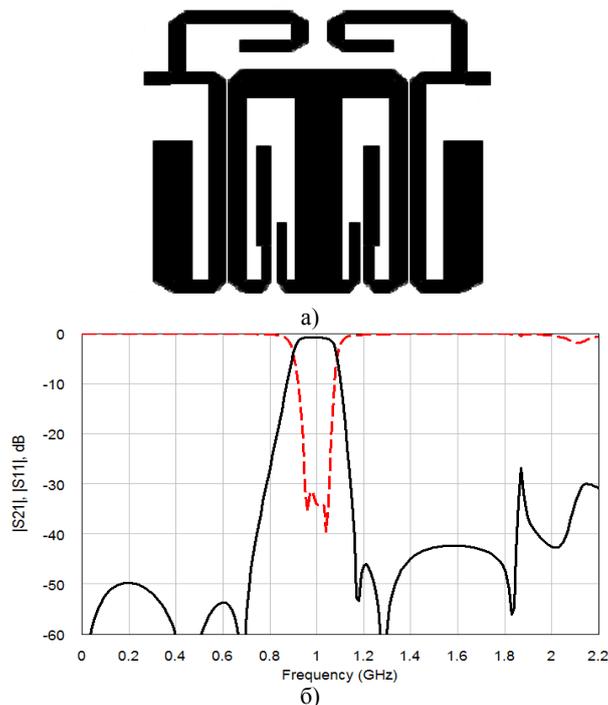


Рис. 5 Симметричная структура МПФ с повышенной частотной избирательностью в области верхних частот

Аналогичная структура МПФ, в которой применен другой способ расщепления полюсов рабочего затухания, представлена на рис. 6. При прочих равных условиях топология этой структуры занимает минимальную площадь подложки, равную  $0.041\lambda^2$ . Следует отметить, что повышенная крутизна рабочего затухания в области верхних частот достигается за счет снижения уровня затухания в полосе заграждения как в области нижних, так и верхних частот.

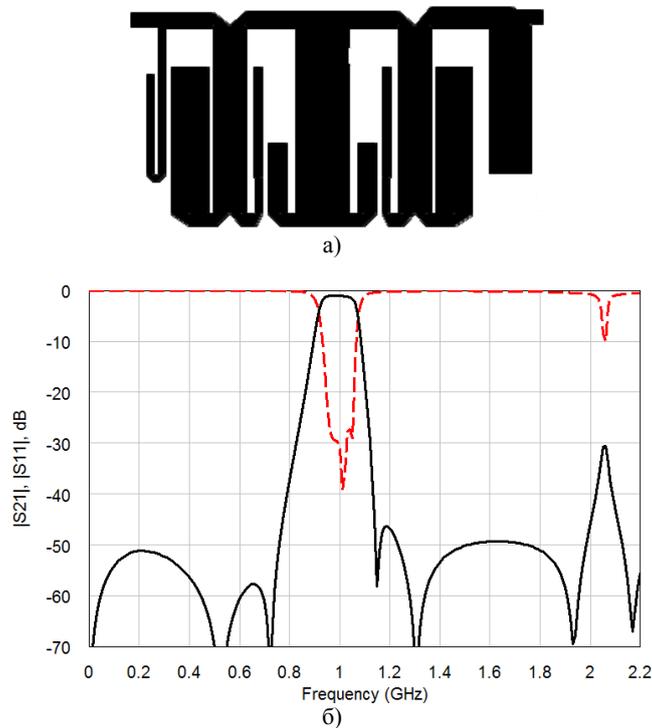


Рис. 6 Несимметричная структура МПФ с повышенной частотной избирательностью в области верхних частот

Приведем еще один пример реализации МПФ с гальваническим примыканием двухрезонаторных секций, в котором формируется семь ( $P=N+3$ ) полюсов рабочего затухания (рис. 7). Два дополнительных полюса затухания формируются крайними решетчатыми секциями за счет реализации скачка волновых сопротивлений на отрезках линий передачи этих секций. Площадь подложки, которую занимает топология этой структуры МПФ, составляет  $A \times B = 23.2 \times 20 \text{ мм}^2$ , то есть  $0.034\lambda^2$ .

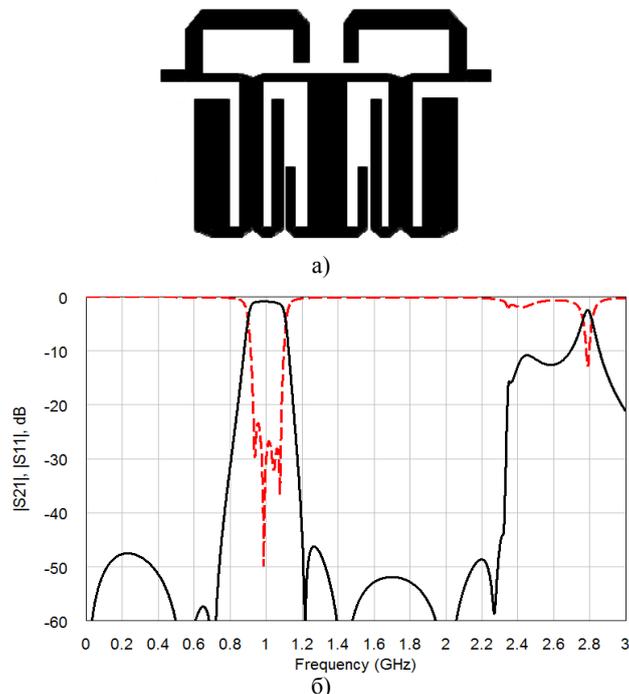


Рис. 7 Симметричная структура МПФ с разрядкой спектра паразитных полос пропускания

### Заключение

В компактных четырехрезонаторных МПФ со свернутыми шпилечными резонаторами возможно формирование до семи полюсов рабочего затухания на конечных частотах. При этом возможна реализация на основе этих структур различных типов частотных характеристик как симметричных, так и с повышенной односторонней частотной избирательностью или в области нижних или в области верхних частот. При этом в отдельных случаях возможна разрядка спектра паразитных полос пропускания за счет смещения вторичных полюсов затухания решетчатых секций в частотную область второй гармоники.

При выборе той или иной структуры МПФ важное значение имеет ее ширина, так как она определяет возможность возбуждения (при размещении МПФ в корпусе) волноводных типов колебаний. В рассмотренных в данной работе структурах их ширина меньше  $\lambda/4$ . Особенно эффективным с точки зрения подавления паразитных колебаний являются структуры, представленные на рис. 2, 6 и 7.

### Литература

1. *M.I. Lancaster and J.S. Hong*. Theory and experiment of novel microstrip slow-wave open-loop resonator filters // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. MTT-45, pp. 2358-2365, Dec. 1997.
2. *J.G. Hong and M.J. Lancaster*. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. New York: Wiley, 2001.
3. *S.Y. Lee and C.M. Tsai*. New cross-coupled filter design using improved hairpin resonators // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. MTT-48, pp. 2482-2490, Dec. 2000.
4. *S. Zhang and L. Zhu*. Synthesis method for even-order symmetrical Chebyshev bandpass filters with alternative J/K inverters and  $\lambda/4$  resonators // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. MTT-61, pp. 808-816, Feb. 2013.
5. *Аристархов Г.М., Чернышев В.П.* Косвенный синтез микрополосковых фильтров на сонаправленных шпилечных резонаторах с полюсами затухания на конечных частотах // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. №6. С. 1168-1175.
6. *G.M. Aristarkhov, A. Grebennikov and N.V. Zvezdinov*. High-Selectivity Microstrip Filters Based on Structures With a Limited Number of Hairpin Resonators [Application Notes] // IEEE Microwave Magazine, vol. 20, no. 11, pp. 22-31, Nov. 2019. doi: 10.1109/MMM.2019.2935362