

УДК

## Реализация СВЧ-фильтров с интегральными подстроечными конденсаторами

А.А. Тюменцева<sup>1,2</sup>, Ю.И. Егошин<sup>1</sup>, Т.С. Тимошенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет

**Аннотация:** в работе показана возможность реализации СВЧ-фильтров в диапазоне частот до 5 ГГц с интегральными подстроечными конденсаторами. Выполнен предварительный расчет номиналов интегральных подстроечных конденсаторов для фильтра. Проведено электромагнитное моделирование рассчитанной конструкции. Приведена конструкция макета фильтра нижних частот с частотой среза 4 ГГц, включающая в себя интегральные подстроечные конденсаторы и бескаркасные катушки индуктивности, а также показана возможность подстройки частоты среза фильтра, путем изменения емкости интегральных подстроечных конденсаторов(ИПК).

**Ключевые слова:** СВЧ-фильтр, ИПК, подстроечный конденсатор, LTCC

### Введение

На сегодняшний день из всех типов электрических фильтров LC-фильтры являются наиболее изученными и широкоприменяемыми, а для их расчета существует целый ряд отработанных методик [1-3]. Однако, с ростом рабочей частоты, такие фильтры применяются все реже, в связи с тем, что в СВЧ-диапазоне номинальные значения элементов уменьшаются, а на частотах выше 1 ГГц уже равны нескольким единицам пФ и нГн. И, если в номенклатуре импортной компонентной базы можно найти катушки индуктивности и подстроечные или подборные конденсаторы малых номиналов (до 0,2 пФ и 1 нГн), то емкость отечественных подборных конденсаторов начинается от 0,5 пФ с допуском  $\pm 0,25$  пФ, а подстроечных от 1/5 пФ. В отличие от конденсаторов, отечественные катушки индуктивности небольших номиналов (от 1 нГн), существуют и применяются в аппаратуре связи, однако значения их добротности (которая не превышает нескольких десятков), не позволяет создавать устройства частотной селекции с высокими электрическими параметрами. Также, очевидно, что для реализации фильтров свыше 1 ГГц необходимо выбирать материалы плат с минимальным тангенсом угла диэлектрических потерь, а материалы проводников с наибольшей проводимостью для минимизации возможных паразитных связей. Решение всей совокупности этих вопросов позволит создавать LC-фильтры в СВЧ-диапазоне.

В данной работе авторами предложен вариант конструкции LC-фильтров, который позволит реализовать их в диапазоне частот до 5 ГГц.

### Подход к конструированию LC-фильтров СВЧ диапазона

Таким образом, для реализации LC-фильтров на диапазон частот от 1 до 5 ГГц было предложено применять в качестве основания многослойные платы на основе LTCC керамики. Такое решение позволило не только создать топологию печатных плат с минимальными потерями, но и реализовать в структуре платы конденсаторы номиналом от нескольких десятых до нескольких единиц пФ. Интегральный конденсатор, выполненный в керамической LTCC-подложке, представляет собой конструкцию из нескольких металлизированных обкладок, расположенных друг над другом. Если количество обкладок превышает две, то между собой обкладки

соединяются по принципу четных и нечетных обкладок. В работах [4, 5] предложен вариант реализации интегральных подстроечных конденсаторов, представляющих собой две области: основную и подстроечную. Область основного номинала состоит из двух разделенных между собой диэлектриком обкладок, нижняя из которых имеет увеличенную длину. Вторая область содержит металлизированные полигоны, расположенные рядом с обкладкой на внешнем слое, представляющие собой топологические элементы подстройки (рис. 1). При гальваническом присоединении этих дополнительных элементов к основной обкладке (с помощью припоя) происходит увеличение ее площади и, как следствие, изменение номинала конденсатора. Начальная емкость рассчитывается заранее, исходя из наименьшего значения диапазона подстройки, при этом максимальный номинал обеспечивается заполнением припоем всех зазоров в области подстройки. Шаг подстройки определяется размерами топологических элементов и зазорами между ними и может изменяться до 0,1 пФ.

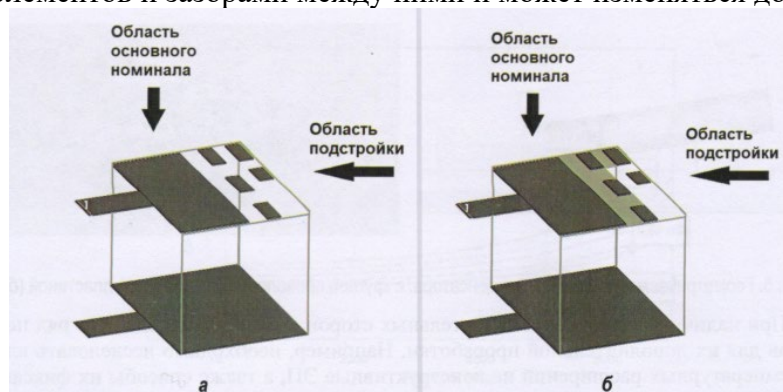


Рисунок 1. Интегральный подстроечный конденсатор

В качестве катушек индуктивности в фильтрах СВЧ диапазона применяются бескаркасные малогабаритные индуктивности, состоящие из нескольких витков проволоки. На сегодняшний день отечественные малогабаритные катушки индуктивности с высокой добротностью (аналоги фирмы CoilCraft серий micro) отсутствуют. Изготовленные бескаркасные катушки индуктивности выполняются с воздушным зазором проводом ПЭТВ-2 и имеют добротность не менее 150 при номинальных значениях от 1 до 5 нГн.

### Проектирование ФНЧ с частотой среза 4 ГГц

Для проработки предложенного варианта подстройки и апробации новой конструкции фильтров СВЧ диапазона была выбрана схема фильтра нижних частот 7-ого порядка (рис. 2). Как видно, номинальные значения конденсаторов не превышают 1 пФ и были рассчитаны с топологическими элементами подстройки. Перестройка таких конденсаторов составила 0,3 пФ для номинала 0,9 пФ и 0,4 пФ для номинала 1 пФ, в то время как шаг перестройки приблизительно равен 0,1 пФ.

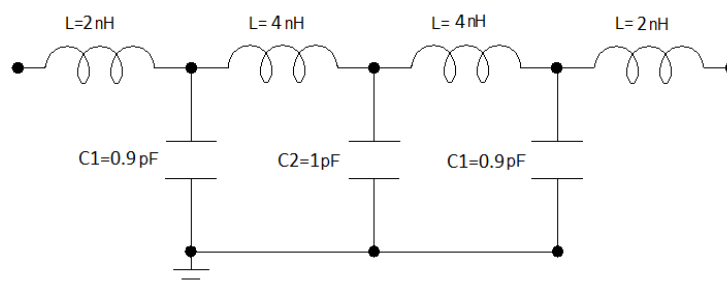


Рисунок 2. Схема фильтра нижних частот 7-ого порядка

На рис. 3а приведена 3D-модель LC-фильтра нижних частот с частотой среза 4 ГГц. Конструктивно фильтр выполнен на многослойной керамической плате, которая также является основанием. После настройки фильтра плата соединяется с металлической крышкой токопроводящим клеем ТОК-2. Многослойная плата выполнена из отечественной низкотемпературной керамики СКМ-025, на внешние слои которой нанесены ИПК с зазорами в зоне подстройки равными 0.1 мм. Бескаркасные катушки индуктивности выполнены с воздушным зазором проводом ПЭТВ-2-0,45.

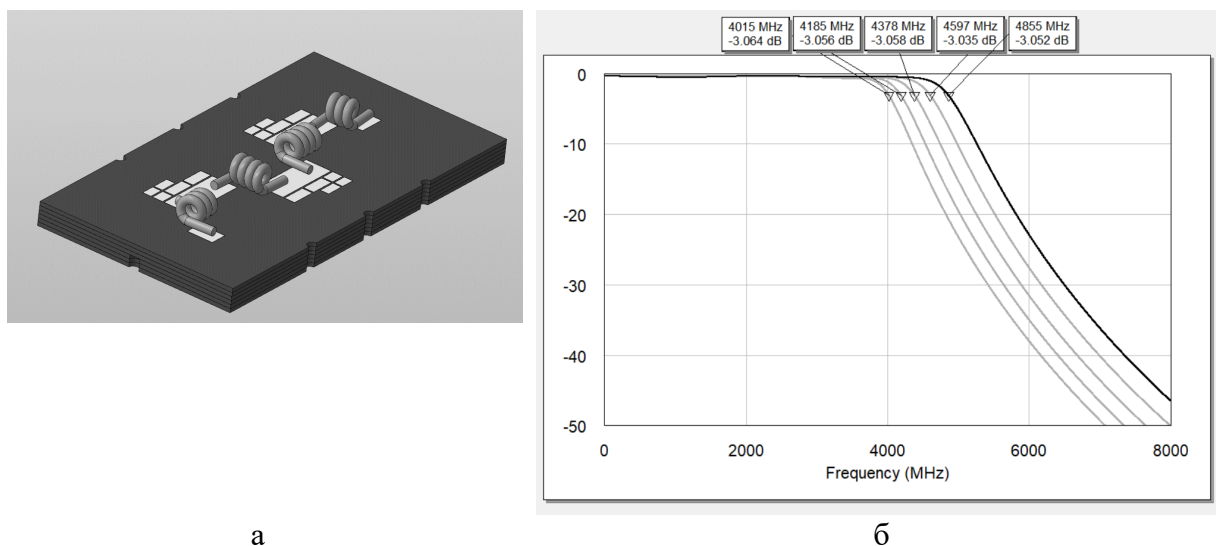


Рисунок 3. 3D-модель LC-фильтра (а), АЧХ LC-фильтра с подстройкой частоты среза (б)

На рис. 3 б показан вариант подстройки АЧХ фильтра путем изменения емкости ИПК на электромагнитной модели фильтра.

### Экспериментальные результаты

Внешний вид макетного образца приведен на рис. 4 а, итерации подстройки АЧХ макетного фильтра приведены на рис. 4 б.

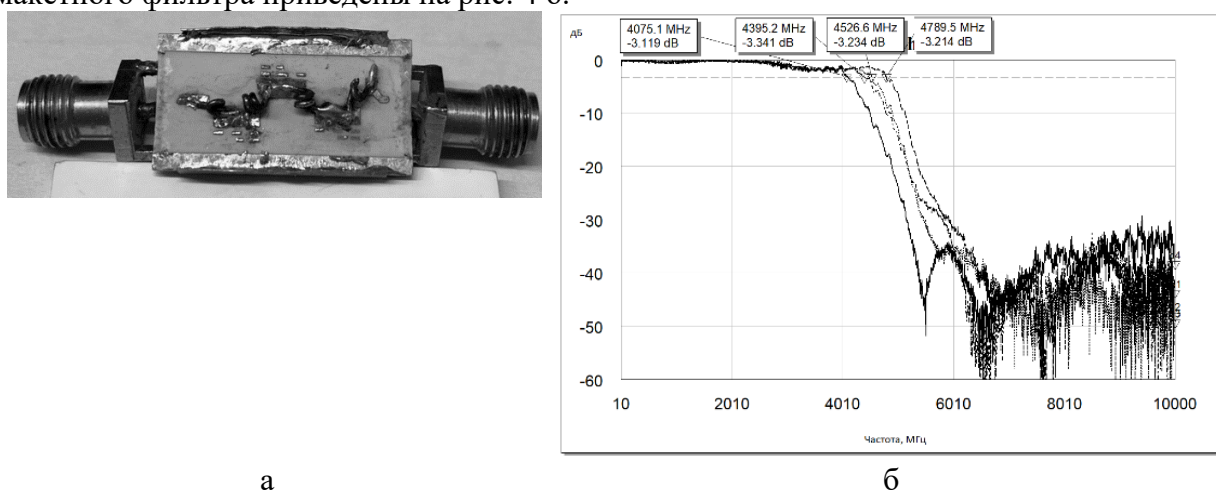


Рисунок 4. 3D-модель макетного образца LC-фильтра (а), АЧХ макетного LC-фильтра с подстройкой частоты среза (б)

Как видно из приведенных экспериментальных результатов (рис. 4 б), частота реализованного LC-фильтра близка к исходной частоте среза первой итерации модели и равна 4790 МГц, для ее понижения до 4075 МГц, емкости ИПК были изменены путем

гальванического присоединения зоны подстройки, что подтверждает эффективность предложенного метода подстройки в СВЧ диапазоне.

### **Заключение**

В работе показана возможность реализации СВЧ-фильтров в диапазоне частот до 5 ГГц за счет применения бескаркасных катушек индуктивности с высокой добротностью (более 150) и интегральных подстроечных конденсаторов малой емкости. Приведены результаты моделирования и сравнение их с полученными экспериментальными данными. Путем гальванического присоединения зоны подстройки ИПК была достигнута частота среза ФНЧ 4075 МГц при исходной частоте 4790 МГц.

### **Список литературы**

1. Босый Н.Д. Электрические фильтры. – К: Киев, 1959.
2. Черне Х.И. Индуктивные связи и трансформации в электрических фильтрах. – М: Москва, 1962.
3. Ханзел Г. Справочник по расчету фильтров. –М: Советское радио, 1974.
4. Борейко Д. А., Егошин Ю. И. Варианты реализации интегральных подстроечных конденсаторов // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции (4–6 октября 2023 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2023. С. 192–194.
5. Борейко Д. А., Егошин Ю. И. Моделирование интегральных плоскопараллельных конденсаторов с различными элементами подстройки// Техника радиосвязи– 2023. - № 3. – С. 74–82.