

# Опыт проектирования высокочастотных фильтров с использованием элементной базы фирмы American Technical Ceramics (ATC)

При разработке высокочастотных фильтров встает извечная проблема выбора между обеспечением хороших электрических характеристик и малых габаритов. Появление малогабаритных SMD-индуктивностей, обладающих высокой добротностью и имеющих высокие паразитные резонансные частоты, позволяет создавать малогабаритные фильтры, успешно конкурирующие по электрическим характеристикам и габаритам с фильтрами на объемных спиральных резонаторах и на печатных элементах.

Игорь ПИВОВАРОВ

Pivovarov\_IYu@mwd-group.ru

Андрей ПОХВАЛИН

Pohvalin\_AA@mwd-group.ru

Практическая реализация полосовых фильтров в диапазоне частот 100–400 МГц представляет весьма сложную задачу. Обычно полосовые фильтры этого диапазона с высокой крутизной скачков АЧХ выполняются с использованием объемных спиральных резонаторов со связями на основе конструктивных конденсаторов [1], либо с использованием печатных спиральных катушек и SMD-конденсаторов [2]. В первом случае при хороших характеристиках фильтры имеют большие габариты, во втором случае, из-за потерь в спиральных катушках, обладают большими потерями, которые в полосе пропускания могут составлять 5 дБ и более при числе резонаторов больше восьми. Еще одной проблемой в таких фильтрах является наличие паразитных полос пропускания на высоких частотах, связанных с наличием паразитных резонансов у индуктивностей и конденсаторов. Поэтому появление на рынке малогабаритных высокодобротных индуктивностей и конденсаторов для поверхностного монтажа фирмы ATC представляет интерес при разработке фильтров этого диапазона на дискретных элементах.

Фирма ATC выпускает индуктивности номиналом от 1 до 1200 нГн, что позволяет создавать фильтры в широком диапазоне частот. Они имеют высокую добротность и высокие резонансные частоты. Например, индуктивность типоразмера 0603 номиналом 100 нГн имеет в диапазоне 200–500 МГц добротность выше 60, а частота ее первого резонанса составляет 1400 МГц. Конденсаторы фирмы ATC также имеют высокую добротность и высокие резонансные частоты. Высокие собственные резонансные частоты индуктивных и емкостных элементов позво-

ляют надеяться, что в фильтрах на таких дискретных элементах паразитные полосы пропускания будут заметно ослаблены.

В настоящей статье описываются два варианта полосового фильтра с полосой пропускания 100–200 МГц, неравномерностью АЧХ в полосе пропускания не более 3 дБ, подавлением сигнала на частотах  $f \geq 250$  МГц и  $f \leq 75$  МГц не менее 50 дБ. Эти требования позволяют оценить необходимую сложность фильтра. Количество резонансных контуров  $n$  для обеспечения требуемой прямоугольности характеристики должно быть не менее [3]:

$$n > \frac{H_3 + 6,02}{20 \times \lg \frac{W_3}{W_n}}$$

Здесь  $H_3 = 50$  дБ — требуемое подавление фильтра в полосе зашумления,

$$W_3 = \frac{f_{\delta 3} - f_{н3}}{\sqrt{f_{\delta 3} \times f_{н3}}},$$

где  $f_{\delta 3} = 240$  МГц — верхняя частота полосы зашумления,  $f_{н3} = 80$  МГц — нижняя частота полосы зашумления фильтра;

$$W_n = \frac{f_{\delta n} - f_{нn}}{\sqrt{f_{\delta n} \times f_{нn}}},$$

где  $f_{\delta n} = 200$  МГц — верхняя граничная частота полосы пропускания фильтра,  $f_{нn} = 100$  МГц — нижняя граничная частота полосы пропускания фильтра.

Из этого выражения следует, что полосовой фильтр должен в своей структуре иметь не менее 10 резонансных контуров.

При этом затухание фильтра в полосе пропускания составит:

$$H_n \geq \frac{4,343 \times n}{W_n \times Q_p},$$

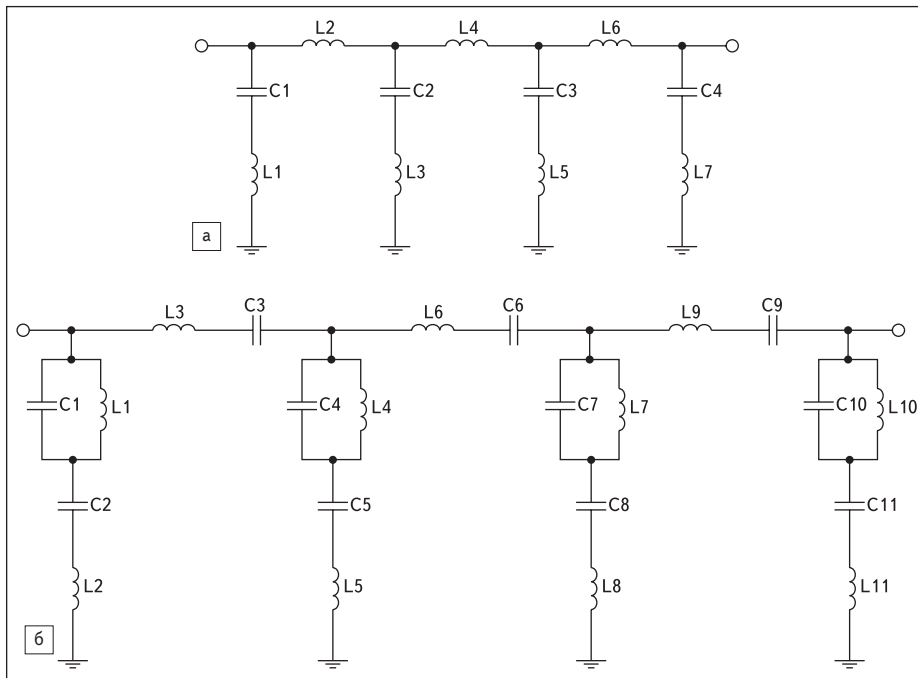
где  $Q_p$  — добротность резонансного контура полосового фильтра.

При оценке добротности резонансных контуров в качестве упрощающих допущений было принято, что добротность контура  $Q_p$  равна добротности индуктивности  $Q_p = 60$ , входящей в контур, поскольку добротности конденсаторов заметно превышают добротности индуктивностей. При этом затухание фильтра в полосе пропускания будет не менее 1,1 дБ.

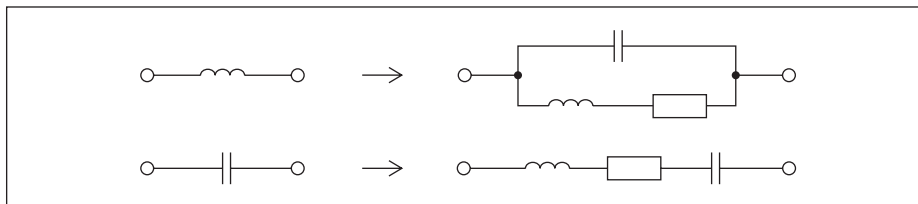
Схема первого варианта полосового фильтра, содержащего 22 элемента, показана на рис. 1б.

Синтез схемы фильтра производился комбинированным путем (частично аналитически, частично путем оптимизации на ЭВМ). Сначала путем оптимизации схемы (рис. 1а) был получен нижнечастотный фильтр-прототип, составленный из идеальных элементов  $L$  и  $C$  и удовлетворяющий требованиям в части затухания. Реактансным преобразованием частоты нижнечастотный фильтр-прототип был преобразован в полосовой фильтр, схема которого показана на рис. 1б.

Для получения более точных характеристик фильтра все идеальные емкостные и индуктивные элементы схемы при дальнейшей оптимизации были заменены 3-элементными эквивалентными схемами, показанными на рис. 2. Исходными данными для построения эквивалентных схем явились импедансные характеристики индуктивностей, измеренные с помощью векторного анализатора цепей HP 4291, и S-параметры LC-элементов, приведенные на сайте фирмы ATC.



**Рис. 1.** Схема первого варианта фильтра: а) низкочастотный фильтр-прототип; б) полосовой фильтр после реактансного преобразования частоты



**Рис. 2.** Эквивалентные схемы замещения индуктивностей и конденсаторов

Кроме того, предварительно была проработана конструкция фильтра на печатной плате и в схему были введены отрезки микрополосковых линий, отражающие реальную топологию. Полученная таким образом уточненная схема полосового фильтра была оптимизирована в пакете программ схемотехнического проектирования до достижения

требуемых характеристик. После этого для уточнения расчетных АЧХ фильтра на верхних частотах полосы задерживания 0,3–2 ГГц реактивные элементы фильтра были заменены более точными моделями (в виде S-матриц).

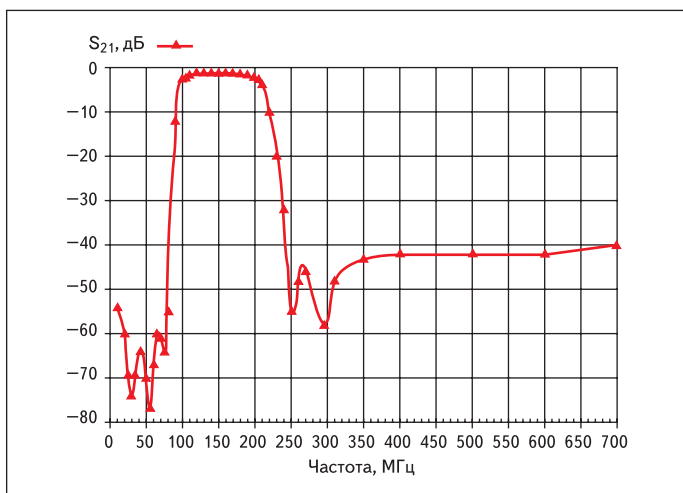
Экспериментальные характеристики полосового фильтра приведены на рис. 3. Расчет-

ное значение КСВ фильтра в полосе пропускания 100–200 МГц изменяется в пределах 1,15–1,5, затухание 1,1–2,5 дБ. В области верхних частот полосы задерживания (700–900 МГц) затухание уменьшается, что связано с влиянием паразитных резонансов индуктивностей и конденсаторов.

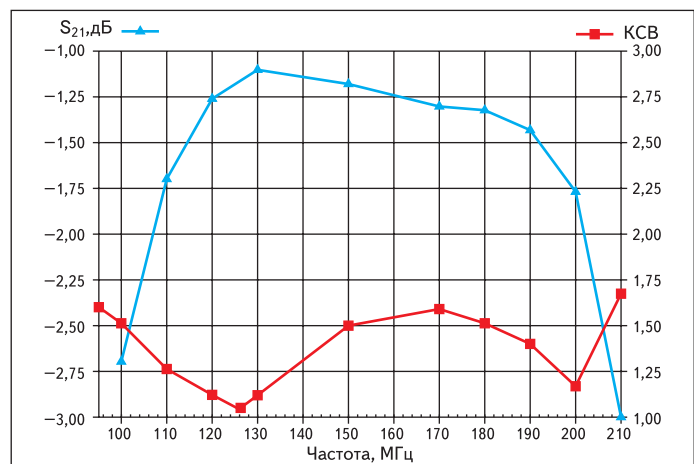
Для увеличения затухания на верхних частотах был использован дополнительный фильтр нижних частот, который включен каскадно с полосовым фильтром. ФНЧ выполнен по схеме, аналогичной представленной на рис. 1а. При использовании ФНЧ затухание в диапазоне 250–2000 МГц превышает 80 дБ. Экспериментальные характеристики полосового фильтра рис. 1б в полосе пропускания показаны на рис. 4. КСВ фильтра в полосе 100–200 МГц изменяется в пределах 1,25–1,6, а затухание лежит в пределах от –1,1 до 2,7 дБ.

Конструктивно фильтры выполнены на плате из материала FR-4 толщиной 1 мм. Габариты платы полосового фильтра составляют 20×30 мм. При столь малых габаритах весьма проблематично ввести в схему элементы настройки, поэтому была разработана методика проектирования и изготовления, позволяющая обходиться практически без настройки, но требующая дополнительной индивидуальной оптимизации каждого фильтра.

Схема второго варианта полосового фильтра показана на рис. 5. Основным соображением при выборе структуры фильтра являлась необходимость уменьшения влияния собственных резонансов индуктивных элементов, поэтому была выбрана структура фильтра из 10 параллельных резонансных контуров. Кроме того, при такой структуре фильтра каждый из параллельных резонансных контуров существенно воздействует только на свой участок АЧХ фильтра и мало влияет на остальной диапазон частот, что упрощает настройку фильтра при его серийном изготовлении и делает ее доступной даже персоналу со средней квалификацией.



**Рис. 3.** Экспериментальные характеристики первого варианта фильтра



**Рис. 4.** Экспериментальные характеристики  $|S_{21}|$  и КСВ полосового фильтра рис. 1б в полосе пропускания

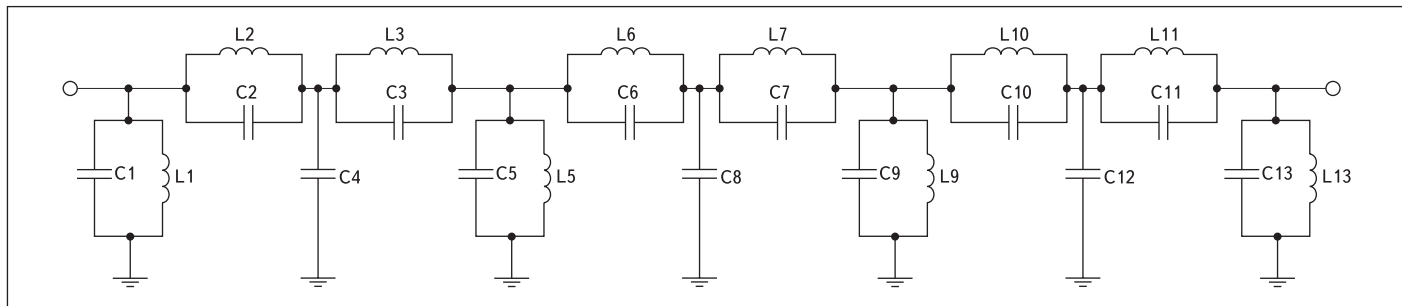


Рис. 5. Схема второго варианта полосового фильтра

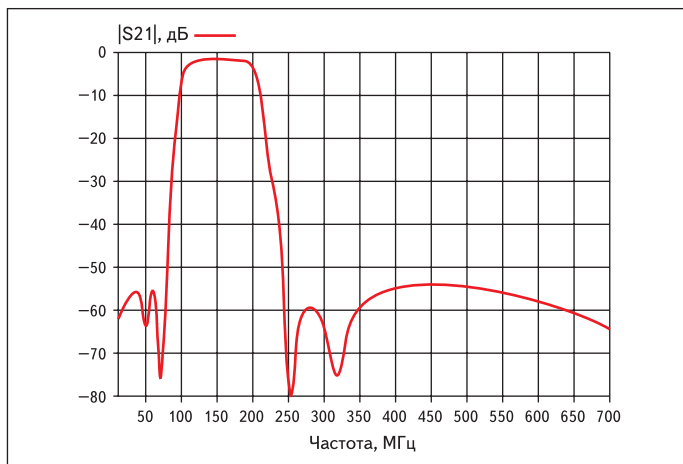


Рис. 6. Расчетные характеристики второго варианта полосового фильтра после оптимизации

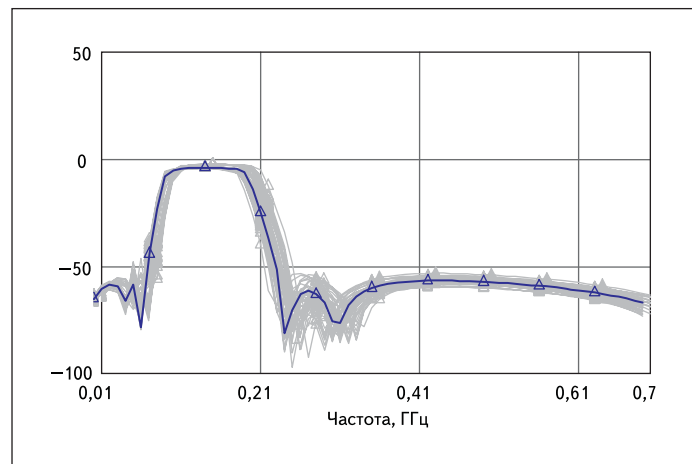


Рис. 7. Разброс характеристик передачи фильтра при 5%-ном разбросе номиналов всех его элементов

Расчет фильтра был выполнен путем оптимизации в пакете Microwave Office. Оптимизация схемы фильтра проводилась в два этапа. На первом этапе была выполнена оптимизация фильтра с идеальными индуктивными и емкостными элементами. На втором этапе значения индуктивностей были округлены до ближайших номиналов, имеющих в ряду номиналов типоразмера 0603, и в дальнейшем значения индуктивностей при оптимизации не изменялись. На втором этапе оптимизации все индуктивные и емкостные элементы были заменены их эквивалентными электрическими схемами, показанными на рис. 2.

Вторичная оптимизация выполнялась в режиме Yield Optimization, что позволило уменьшить чувствительность АЧХ к разбросу номиналов элементов фильтра при серийном производстве. Расчетные характеристики полосового фильтра после оптимизации приведены на рис. 6. Расчетное значение КСВ фильтра в полосе пропускания 100–200 МГц изменяется в пределах от 1,2 до 1,72, а затухания — от –1,4 до –3,4 дБ.

О влиянии разброса номиналов элементов фильтра на характеристику передачи можно судить по рис. 7, где показано поле характеристик при 5%-ном разбросе номиналов всех индуктивностей и конденсаторов.

Конструктивно фильтр выполнен на плате из материала FR-4 толщиной 1 мм с дву-

сторонним монтажом индуктивных и емкостных элементов — таким образом, чтобы соседние резонансные контуры располагались на различных сторонах печатной платы, а элементы контуров были ортогональны друг другу. Размеры контактных площадок выбраны с учетом возможности установки подстроечных конденсаторов.

После настройки фильтра подстроечные конденсаторы заменялись конденсаторами типа 600S соответствующих номиналов. Габариты платы полосового фильтра

составляют  $30 \times 60 \text{ мм}^2$  и могут быть существенно уменьшены. Опыт настройки установочной партии показал, что в настройке нуждаются только контуры  $L_2, C_2; L_3, C_3; L_6, C_6; L_7, C_7; L_{10}, C_{10}; L_{11}, C_{11}$ , определяющие нули передачи на частотах вблизи полосы пропускания.

Экспериментальные характеристики передачи второго варианта полосового фильтра приведены на рис. 8.

КСВ фильтра в полосе 100–200 МГц изменяется в пределах от 1,24 до 1,8, а затухание

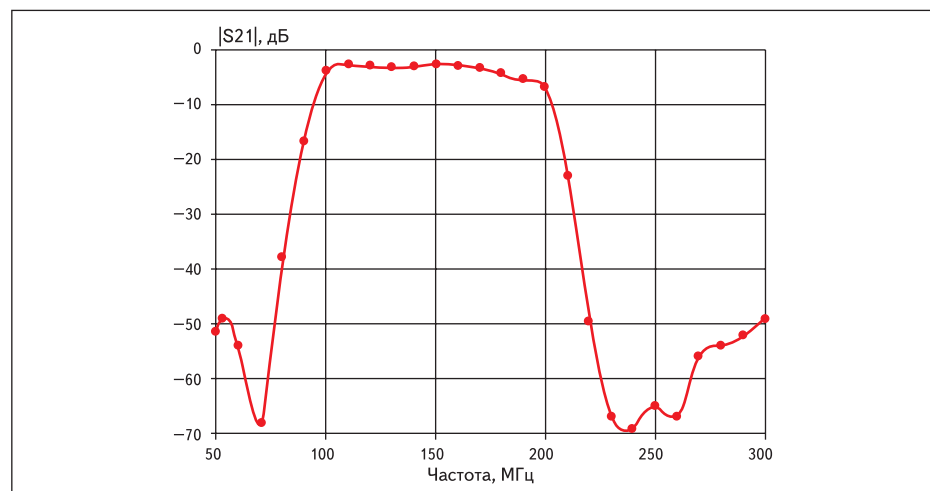


Рис. 8. Экспериментальные характеристики передачи второго варианта полосового фильтра

составляет от  $-2$  до  $-4,7$  дБ. За пределами полосы пропускания на частотах ниже 75 МГц и выше 500 МГц затухание фильтра не хуже 52 дБ.

Как видно из приведенных результатов, оценка параметров фильтра по формулам, приведенным выше, хорошо совпадает с экспериментальными характеристиками.

При разработке фильтров было отмечено еще одно положительное свойство индуктивностей — слабая взаимосвязь близко расположенных индуктивностей. В описанных конструкциях фильтров они находятся на расстояниях 2–7 мм друг от друга на одной стороне платы. При проектировании мы расположили две половины фильтра с разных сторон платы, опасаясь взаимосвязи индуктивностей. По нашим наблюдениям, этого можно не делать, уменьшив таким образом габариты фильтра. Крышка корпуса, расположенная на расстоянии 6 мм от платы, практически не влияет на его характеристики.

В заключение отметим, что опыт разработки фильтров с весьма трудными для реализации параметрами показал, что индуктив-

ности и конденсаторы, выпускаемые фирмой АТС, позволяют конструировать малогабаритные фильтры на дискретных элементах, которые мало уступают по характеристикам фильтрам на спиральных резонаторах.

В настоящее время проводится разработка более точных моделей индуктивностей и конденсаторов фирмы АТС с учетом влияния параметров различных типов подложек и ориентации элементов при монтаже. В ближайшее время можно ожидать появления этих моделей в сети Internet. ■

### Литература

1. Lapidus Alex D. A Helical Resonator-based Filter with Improved Skirt Selectivity // *Microwave Journal*. Vol. 49, N 11, November, 2006.
2. Lin S. C., Wang C. Y., Chen C. H. Novel Patch-Via-Spiral Resonators for Development of Miniaturized Bandpass Filters with Transmission Zeros // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 55, N 1, January 2007.
3. Матей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. John Willey & Son. 2004.