

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА И ТОПОЛОГИИ ЗЕМЛИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСОВОГО LC-ФИЛЬТРА

Марченко Т.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭТТ

Аннотация. Рассмотрено влияние паразитных параметров печатного монтажа и топологии земли на характеристики полосового LC-фильтра. Показано, что паразитная емкость контактных площадок и межсоединений вызывает смещение резонансной частоты и изменение полосы пропускания, а паразитная индуктивность межсоединений и цепи возвратного тока ухудшает согласование, увеличивает вносимые потери и усиливает паразитные связи. Приведены оценочные соотношения для определения смещения резонансной частоты с учетом монтажных паразитных параметров и сформулированы практические рекомендации по построению топологии фильтра на печатной плате.

Ключевые слова: полосовой фильтр, LC-фильтр, паразитные параметры, печатный монтаж, топология земли, резонансная частота, АЧХ.

Введение. Полосовые LC-фильтры применяются во входных и межкаскадных цепях радиотехнических устройств, где требуется выделение полезной полосы частот и ослабление внеполосных составляющих сигнала. При синтезе таких фильтров обычно используются идеализированные модели индуктивностей и емкостей, тогда как в реальной конструкции существенную роль играют паразитные параметры контактных площадок, печатных проводников, переходных отверстий и опорных слоев платы [1]. На частотах диапазона сотен мегагерц этими эффектами уже нельзя пренебрегать, поскольку они вызывают смещение центральной частоты, изменение ширины полосы пропускания, рост вносимых потерь и ухудшение коэффициента отражения [2]. В данной статье рассмотрено, каким образом паразитные параметры печатного монтажа и топология земли изменяют характеристики полосового LC-фильтра, приведены простые оценочные соотношения и рекомендации, позволяющие уменьшить расхождение между расчетной и экспериментальной амплитудно-частотной характеристикой.

Основная часть. Реальная индуктивность, в отличие от идеальной, обладает не только активным сопротивлением, но и собственной паразитной емкостью. Конденсаторы также имеют эквивалентное последовательное сопротивление и паразитную индуктивность выводов и контактных площадок. Кроме того, печатные межсоединения между элементами фильтра обладают дополнительной индуктивностью, а контактные площадки и близко расположенные проводники – дополнительной емкостью [3]. В сумме это приводит к тому, что частотная характеристика фильтра, рассчитанная по номиналам дискретных элементов, в реальной печатной реализации оказывается смещенной и часто имеет более высокие потери. Для инженерной оценки удобно использовать эквивалентную модель звена полосового LC-фильтра, в которой расчетные элементы дополняются индуктивностью межсоединений L_m , паразитной емкостью монтажа C_p и индуктивностью пути возвратного тока L_g . Такая модель показана на рисунке 1.

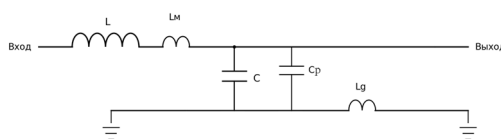


Рисунок 1 – Эквивалентная схема резонансного звена LC-фильтра с учетом монтажных паразитных параметров

При первом приближении влияние монтажных паразитных параметров на резонансное звено можно учесть путем введения эквивалентных значений Lm и Cp . Тогда резонансная частота звена определяется по формуле 1.

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + Lm)(C + Cp)}}, \quad (1)$$

где L – расчетная индуктивность катушки, Гн;

C – расчетная емкость конденсатора, Ф;

Lm – суммарная паразитная индуктивность печатных межсоединений и выводов, Гн;

Cp – суммарная паразитная емкость контактных площадок, соседних проводников и монтажных зазоров, Ф.

Если сравнивать реальную резонансную частоту f'_0 с идеальной частотой $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, то при малых относительных паразитных добавках можно получить линейную оценку смещения, представленную формулой 2.

$$\frac{\Delta f'_0}{f_0} \approx -\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{Lm}{L} + \frac{Cp}{C}\right), \quad (2)$$

где $\Delta f'_0 = f'_0 - f_0$ – смещение резонансной частоты, Гц.

Как следует из формулы 2, паразитная индуктивность и паразитная емкость действуют в одном направлении: обе уменьшают резонансную частоту. Это означает, что даже при корректном выборе номиналов элементов полоса пропускания реального фильтра смещается вниз по частоте, если топология платы не была учтена на этапе моделирования [4]. На рисунке 2 приведена расчетная зависимость относительного смещения резонансной частоты от отношения Cp/C при различных значениях относительной паразитной индуктивности Lm/L .

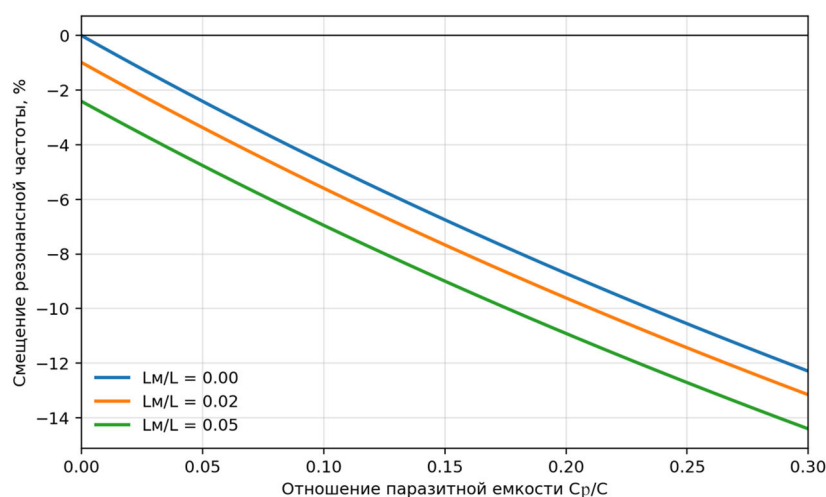


Рисунок 2 – Расчетное смещение резонансной частоты при увеличении паразитной емкости монтажа

Из рисунка 2 видно, что уже при отношении $Cp/C = 0,10$ расчетная частота может снижаться примерно на 5 % даже в случае пренебрежимо малой паразитной индуктивности монтажа. Если же дополнительно учитывать $Lm/L = 0,02...0,05$, то суммарное смещение возрастает примерно до 6...7,5 %. Для фильтров диапазона 200–300 МГц это означает отклонение центральной частоты на 12–20 МГц, что уже является практически значимым [4]. При росте Cp/C до 0,20 смещение становится еще более заметным, а фильтр может выйти за пределы допустимой полосы настройки. Следовательно, уменьшение размеров площадок, сокращение длины межсоединений и использование более компактной посадки элементов

оказывают непосредственное влияние на сохранение требуемой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Вторым важным фактором является топология земли. На частотах сотен мегагерц и выше опорный полигон уже нельзя рассматривать как идеальный нулевой потенциал, поскольку ток возврата протекает по конечному пути, обладающему собственной паразитной индуктивностью. Если земляной полигон разорван, переходные отверстия заземления удалены от фильтра или путь возвратного тока избыточно длинный, возрастает реактивное сопротивление цепи возврата, которое высчитывается по формуле 3.

$$Xg = 2\pi fLg, \quad (3)$$

где Xg – реактивное сопротивление пути возвратного тока, Ом;

f – частота сигнала, Гц;

Lg – паразитная индуктивность пути заземления, Гн [2].

Это приводит к ухудшению согласования, росту вносимых потерь и усилению паразитной связи между соседними участками схемы.

При разорванной земле ток возврата вынужден огибать разрывы полигона и замыкаться по удлинённому пути. Это повышает эквивалентную индуктивность Lg , увеличивает напряжение на общем импедансе и создает условия для паразитных наводок. Напротив, сплошной полигон земли и близко расположенные переходные отверстия обеспечивают короткий путь возвратного тока и делают характеристики фильтра более устойчивыми [2]. В практических рекомендациях по ВЧ-разводке подчеркивается, что сигнальные дорожки и соответствующие им пути возврата должны быть максимально локализованы, а количество переходов между слоями следует минимизировать [5].

Для полосового LC-фильтра диапазона сотен мегагерц наибольшее влияние обычно оказывают четыре конструктивных фактора: длина межсоединений между элементами, размеры контактных площадок, удаленность элементов от сплошного полигона земли и число ближайших переходных отверстий заземления. Увеличение длины межсоединений повышает паразитную индуктивность, тогда как рост размеров площадок и близость широких проводящих поверхностей увеличивают паразитную емкость. Недостаточная непрерывность земли ухудшает путь возвратного тока, а дефицит переходных отверстий снижает эффективность связи верхнего сигнального слоя с опорным слоем [5].

Для наглядного сравнения основные проявления паразитных параметров и способы их уменьшения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Влияние конструктивных факторов на характеристики полосового LC-фильтра

Конструктивный фактор	Физическое проявление	Влияние на характеристики фильтра	Рекомендуемое решение
Длинные межсоединения между L и C	Рост L_m и взаимной индукции	Смещение полосы вниз, ухудшение добротности, усиление паразитной связи	Минимизировать длину дорожек, располагать элементы компактно
Крупные контактные площадки	Рост C_p относительно расчетной емкости	Изменение центральной частоты и ширины полосы	Использовать минимально достаточные площадки
Разорванный полигон земли	Удлинение пути возвратного тока, рост L_g	Увеличение потерь, ухудшение согласования, нестабильная АЧХ	Сохранять сплошную землю под ВЧ-частью схемы
Редкие или удаленные via земли	Увеличение общего импеданса опорного слоя	Рост паразитных наводок и чувствительности к помехам	Располагать переходные отверстия земли как можно ближе к фильтру и чаще

Сопоставление, представленное в таблице 1, показывает, что на практике паразитные параметры печатного монтажа и топология земли действуют совместно. Например, при компактном размещении элементов можно уменьшить индуктивность межсоединений, но если под фильтром отсутствует сплошной полигон земли, выигрыш будет частично потерян из-за роста Lg . Поэтому наиболее рациональным является последовательный подход: сначала

выбираются реальные модели компонентов с учетом их собственных паразитных параметров, затем в схему вводятся эквивалентные паразитные параметры печатного монтажа, после чего уточняется топология земли и расположение переходных отверстий [6].

С инженерной точки зрения проектирование фильтра целесообразно вести в два этапа. На первом этапе используются схемотехнические модели дискретных компонентов, учитывающие добротность и собственную резонансную частоту. На втором этапе выполняется уточнение модели с учетом паразитных RLC-параметров печатной реализации. Подобный подход позволяет заранее оценить ожидаемое смещение полосы пропускания, заложить коррекцию номиналов и уменьшить число итераций после изготовления макета [6]. В условиях учебного и опытного проектирования это особенно важно, поскольку даже небольшая корректировка топологии нередко дает больший эффект, чем замена элементов на более дорогие аналоги.

Заключение. Таким образом, характеристики полосового LC-фильтра в реальной печатной реализации определяются не только расчетными номиналами элементов, но и паразитными параметрами монтажа и топологией земли. Паразитная емкость контактных площадок и межсоединений смещает резонансную частоту и изменяет форму полосы пропускания, а паразитная индуктивность межсоединений и цепи возвратного тока ухудшает согласование и повышает потери. Наиболее рациональным подходом при проектировании является совместный учет реальных моделей компонентов, монтажных паразитных параметров и организации опорного полигона земли. Применение коротких и симметричных межсоединений, минимально достаточных контактных площадок, сплошной земли под ВЧ-частью схемы и близко расположенных переходных отверстий позволяет существенно уменьшить расхождение между расчетной и экспериментальной АЧХ фильтра.

Список литературы

1. Gurov, E. V. *Analysis of the Parasitic Parameters Influence on the Analog Filters Frequency Response* / E. V. Gurov [et al.] // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). – Prague, 2019. – P. 1–7.
2. Кечиев, Л. Н. Проблемы конструирования электронной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / Л. Н. Кечиев [и др.] // Технологии электромагнитной совместимости. – 2020. – № 1(72). – С. 18–30.
3. Ланин, В. Л. *Электромонтажные соединения в электронике: технология, оборудование, контроль качества* / В. Л. Ланин, В. А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2013. – 406 с.
4. Журавлев, В. Я. Паразитные параметры печатного монтажа / В. Я. Журавлев, О. И. Подгайко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Вып. 3/7. – С. 49–52.
5. *Конструирование и технология электронных систем : пособие к курсовому проектированию для студ. спец. «Электронно-оптические системы и технологии» всех форм обуч.* / А. А. Костюкевич [и др.]. – Минск : БГУИР, 2011. – 119 с.
6. Бабунько, С. А. Учет паразитных параметров SMD-элементов при проектировании полосовых фильтров / С. А. Бабунько, Ю. Г. Белов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchet-parazitnyh-parametrov-smd-elementov-pri-proektirovanii-polosovyh-filtrov>. – Дата доступа: 01.03.2026.

UDC 621.372.543.2

INFLUENCE OF PCB MOUNTING PARASITICS AND GROUND TOPOLOGY ON THE CHARACTERISTICS OF A BANDPASS LC FILTER

Marchenko T. V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveiko S.I. – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of EET

Annotation. The paper considers the influence of PCB mounting parasitics and ground topology on the characteristics of a bandpass LC filter in the VHF range. It is shown that parasitic capacitance of pads and interconnects causes a shift of the resonant frequency and changes the passband, while parasitic inductance of interconnects and the return-current path worsens matching and increases loss. Simple analytical relations and practical layout recommendations are presented.

Keywords: bandpass filter, LC filter, parasitic parameters, PCB layout, ground topology, resonant frequency, frequency response.