

Правильный выбор ЭМП-фильтра для систем военного назначения

Михаил БОГДАНОВ,
инженер

В статье рассматриваются вопросы практического использования фильтров разных типов для подавления электромагнитных помех в соответствии со стандартами для военной промышленности.



Введение

Согласно стандарту MIL-STD-220, вносимая потеря, под которой понимается способность фильтра уменьшить или ослабить нежелательные сигналы, всегда измеряется при использовании 50-Ом источника сигналов и 50-Ом импеданса нагрузки. В этих условиях у конфигураций фильтрующих цепей разных типов (с одним конденсатором, L-, Pi- и T-типов) — одинаковые характеристики для заданной схемы независимо от взаимосвязи между входом, выходом и источником РЧ-сигнала. Испытания в соответствии с MIL-STD-220 хорошо определены, универсальны и позволяют эффективно контролировать качество выпускаемых фильтров.

Поскольку импеданс пассивных индуктивных и емкостных фильтров не является константой, а зависит от режима работы устройства (частоты, величины приложенного напряжения и тока), при выборе фильтрующей схемы следует учитывать параметры нагрузки и источника. Это важное обстоятельство, поскольку большинство линейных ЭМП-фильтров не является согласованными цепями. Иначе говоря, так происходит, если расчетное значение отдельных компонентов цепи меняется в соответствии с рабочими напряжениями и токами.

В большинстве случаев величина индуктивности дросселя фильтра уменьшается в угоду стоимости и для того, чтобы обеспечить заданный уровень вносимой потери, приходится увеличивать емкость конденсаторов. Такое намеренное рассогласование, широко практикующееся в отрасли, оказывает влияние только в области очень низких частот, в результате чего появляются пульсации в полосе пропускания, и едва ли заметно сказывается на полосе непрозрачности.

Схемные конфигурации

Линейные фильтры ЭМП являются пассивными устройствами. Они обеспечивают фильтрацию нижних частот, пропускают постоянный ток и частоты линий электропитания с очень малыми потерями, ослабляя нежелательные сигналы на верхних частотах. Фильтры в равной мере эффективно подавляют ЭМП, генерируемые устройством, и защищают его от нежелательных помех, проникающих по линиям питания.

Каждый дополнительный элемент схемы увеличивает крутизну спада частотной характеристики, или, другими словами, увеличивает вносимые потери в полосе непрозрачности. Увеличение или уменьшение значений отдельных элементов не влияет на крутизну характеристики, но влияет на частоту среза. На рис. 1 представлена зависимость вносимых потерь от частоты фильтров разного типа.

Более того, при изменении импедансов источника сигналов и нагрузки меняется и наклон кривой вносимой потери. В тех случаях, когда импедансы источника сигналов и нагрузки одинаковы и относительно велики, наилучшая кривая вносимой потери — у фильтра Pi-типа. По мере уменьшения импедансов вносимая потеря у этого

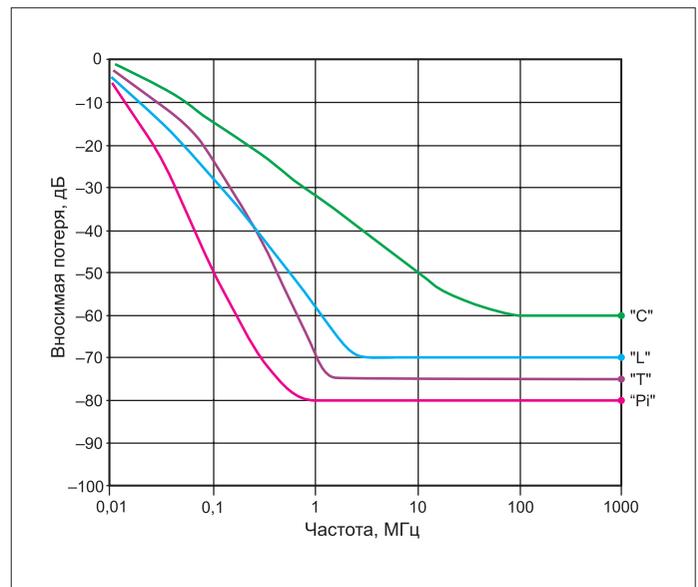


Рис. 1. Зависимость вносимой потери от частоты для разных конфигураций фильтрующих схем

фильтра уменьшается. В отношении фильтров T-типа справедливо обратное утверждение. Если импедансы цепи меняются с частотой, как это происходит в большинстве схем, рекомендуется использовать многоэлементные фильтры типов Pi и T. Однако на практике используется конфигурация L-типа — с двумя элементами.

Кроме того, количество фильтрующих элементов ограничено величиной эквивалентной последовательной индуктивности (ESL) и эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) конденсатора и паразитной емкости катушек индуктивности. В результате кривая потери «выравнивается» в диапазоне $-80 \dots -90$ дБ. Мы рассмотрим несколько самых распространенных типов ЭМП-фильтров и их области применения. Мы ограничимся достаточно общими описаниями, поскольку в большинстве случаев значения импедансов и профили электромагнитных помех носят динамичный характер и меняются в зависимости от частоты.

— **Проходной конденсатор.** Коэффициент затухания этого однозвенного фильтра с шунтирующим проходным конденсатором растет со скоростью 20 дБ/декаду (10 дБ при 10 кГц, 30 дБ при 100 кГц). Фильтр на проходном конденсаторе, как правило, является наилучшим выбором для схем с очень большими импедансами источника и нагрузки.

— **L-фильтр** — схема из последовательной индуктивности, подключенной к шунтирующему проходному конденсатору. У фильтра этого типа коэффициент затухания растет со скоростью 40 дБ/декаду (20 дБ при 100 кГц, 60 дБ при 1 МГц). L-фильтр лучше всего подходит для схем, у которых импедансы источника сигнала и нагрузки существенно разные. Фильтр этого типа обеспечивает наи-

лучшие характеристики большинства приложений в тех случаях, когда его индуктивность соединена со схемой, имеющей меньший из двух импедансов.

– **Pi-фильтр.** Это фильтр из двух шунтирующих проходных конденсаторов с включенным между ними индуктивным элементом. Коэффициент затухания фильтра растет со скоростью 60 дБ/декаду (20 дБ при 15 кГц, 80 дБ при 150 кГц). Фильтр этого типа, как правило, является наилучшим выбором при необходимости обеспечить высокие уровни затухания, а значения импедансов источника и нагрузки схожи и относительно велики.

– **T-фильтр** состоит из двух индуктивных компонентов с одним шунтирующим проходным конденсатором между ними. Как и у Pi-фильтра, у этого устройства коэффициент затухания растет со скоростью 60 дБ/декаду (20 дБ при 15 кГц, 80 дБ при 150 кГц). T-фильтр применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить высокие уровни затухания, а импедансы источника и нагрузки схожи и относительно малы.

– **Двойные фильтры.** В этом случае последовательно включаются два фильтра. Двойные L-, Pi- и T-фильтры из четырех и пяти элементов предназначены для приложений с очень высокими уровнями затухания. Расчетный коэффициент затухания двойного L-фильтра — 80 дБ/декаду, а коэффициенты затухания у двойных Pi- и T-фильтров — 100 дБ/декаду. Требования к импедансам источника и нагрузки те же, что и в случае фильтров с одной схемой.

В таблице показано, как зависит выбор типа фильтра от значений импедансов источника и нагрузки.

Таблица. Зависимость между типом фильтра и импедансами источника и нагрузки

Импеданс источника	Тип фильтра	Импеданс нагрузки
большой	C	большой
малый*	L	большой
большой	L	малый*
большой	Pi	большой
малый	T	малый
большой/малый	двойной	большой/малый

* Индуктивность подключена к схеме с меньшим импедансом.

Расстройка

Как уже упоминалось, большинство ЭМП-фильтров намеренно расстраивают, чтобы облегчить их производство. В качестве примера можно привести широко принятую практику изготовления цилиндрических фильтров. К этому фильтру предъявляются следующие требования стандартов для военной промышленности:

- рабочее напряжение по постоянному току: 70 В;
- постоянный рабочий ток: 5 А;
- конфигурация схемы: Pi;
- сопротивление по постоянному току (макс.): 0,015 Ом;
- диаметр корпуса (макс.): 10,4 мм;
- вносимая потеря при полной нагрузке согласно MIL-STD-220 (50 Ом):
 - 150 кГц: 16 дБ;
 - 300 кГц: 38 дБ;
 - 1 МГц: 75 дБ;
 - 10 МГц: 80 дБ;
 - 100 МГц: 80 дБ.

При импедансе источника и нагрузки 50 Ом, а также в соответствии с требованиями стандарта MIL-STD-220 правильно рассчитанный фильтр Баттерворта (фильтрующая схема с плоской АЧХ в полосе пропускания) должен иметь следующие значения параметров, чтобы обеспечить минимальную вносимую потерю: $C_1 = 0,0769$ мкФ; $L_2 = 385$ мкГн; $C_3 = 0,0769$ мкФ.

Теоретические значения вносимой потери для фильтра Pi-типа согласно стандарту MIL-STD-220 следующие: 150 кГц: 33 дБ; 300 кГц: 51 дБ; 1 МГц: 83 дБ; 10 МГц: >100 дБ; 100 МГц: >100 дБ.

Значения емкостей 0,0769 мкФ конденсаторов C_1 и C_3 являются приемлемыми при номинальном напряжении 70 В по постоянному току. Эти конденсаторы имеются в широком доступе. Однако величина L_2 должна составлять 385 мкГн в соответствии с требованиями к вносимой потере. Чтобы индуктивность была равна 385 мкГн при 5 А по постоянному току, следует учесть эффект насыщения сердечника и соблести требование обеспечить величину сопротивления по постоянному току равной 0,015 Ом. При этом диаметр индуктивности превышает 50,8 мм. Очевидно, что если внешний диаметр составляет 10,41 мм, эта индуктивность непригодна для использования.

Уменьшив индуктивность L_2 до реалистичного значения и увеличив емкости C_1 и C_3 , можно получить требуемое значение вносимой потери в полосе непрозрачности и схему, которую легко реализовать на производстве. Приведем в этом случае типовые значения компонентов: $C_1 = 0,7$ мкФ; $L_2 = 5$ мкГн; $C_3 = 0,7$ мкФ. Расчетные значения вносимой потери согласно MIL-STD-220 следующие: 150 кГц: 25 дБ; 300 кГц: 50 дБ; 1 МГц: 83 дБ; 10 МГц: >100 дБ; 100 МГц: >100 дБ.

Как упоминалось, намеренное рассогласование значений элементов приводит к появлению в полосе пропускания значительных пульсаций величиной 10–20 дБ. Однако на частотах ниже 1 кГц характеристика становится гладкой с пульсациями в пределах ± 1 дБ. На рис. 2 представлены характеристики вносимой потери для идеальной и модифицированной схемы фильтра в сравнении с требованиями спецификации.

Большая часть ЭМП-фильтров применяется с целью обеспечить соответствие проектируемых систем одной из спецификаций ЭМП/ЭМС для военного или коммерческого применения. Самой распространенной спецификацией в этом отношении является Military Specification MIL-STD-461 (462, 463). Этот документ определяет допустимые уровни кондуктивных и излучаемых помех, генерируемых системами или их узлами.

Кондуктивные помехи распространяются по линиям питания, сигнальным линиям и детектируются с помощью токового шунта или другими средствами. Излучаемые помехи создаются электромагнитными полями системы и обнаруживаются с помощью приемной антенны.

Кроме того, спецификация MIL-STD-461 в общих чертах устанавливает последовательность испытаний устройств разными видами кондуктивных и излучаемых помех. Цель этих испытаний состоит

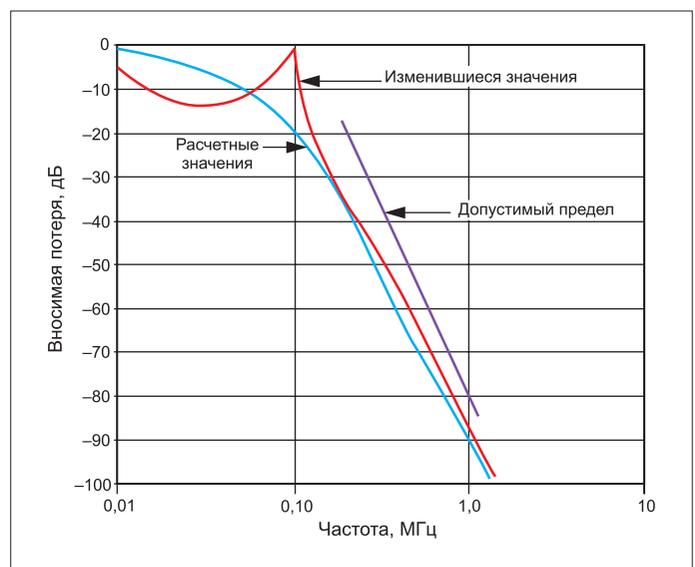


Рис. 2. Сравнение кривой вносимой потери согласно MIL-STD-220 с результатами испытаний на ЭМС в соответствии с MIL-STD-461

в определении устойчивости устройств при эксплуатации в жестких условиях ЭМП.

Требования к уровню кондуктивных помех и методы испытаний обозначаются как CE (conducted emission). Следующие за этим обозначением цифры указывают установленный частотный диапазон и его соответствие входным силовым и сигнальным линиям. Например, CE03 определяет методы испытаний и максимально допустимый уровень помех в линиях постоянного и переменного токов в диапазоне 15 кГц...50 МГц. В свою очередь, буквы CS (сокр. от Conducted Susceptibility) обозначают «восприимчивость к кондуктивным помехам», RE (сокр. от Radiated Emission) – «излучаемые помехи», а RS (сокр. от Radiated Susceptibility) – «восприимчивость к электромагнитным излучениям».

ЭМП-фильтры являются двунаправленными устройствами, которые не только позволяют уменьшить кондуктивные помехи внутри самой системы, но и защитить ее от нежелательных шумов, распространяющихся по силовым и сигнальным линиям.

До некоторой степени ЭМП-фильтры также ослабляют излучаемые помехи, поскольку силовые и сигнальные линии могут работать как передающие антенны при электромагнитных помехах высокого уровня. Однако большая часть проблем от излучаемых помех обусловлена топологией системы, например неправильным заземлением, плохой экранировкой, отсутствием защитных уплотнителей, неверным выбором материалов и т. д. Профили ЭМП и импеданс любого устройства очень трудно учитывать, поскольку они значительно изменяются в заданном частотном диапазоне. Именно по этой причине осложняется выбор ЭМП-фильтра на основе только данных о вносимой потере при 50 Ом. На рис. 3 сравниваются расчетные значения вносимой потери Pi-фильтра ($C_1 = 0,70$ мкФ; $L_2 = 5$ мкГн; $C_3 = 0,70$ мкФ) при 50 Ом согласно стандарту MIL-STD-220 и L-фильтра ($C_1 = 0,70$ мкФ; $L_2 = 5$ мкГн).

Если бы размеры компонентов не были ограничивающим фактором, при сравнении вносимых потерь Pi- и L-фильтров предпочтение можно было бы отдать первому из них. При 1 МГц уровень вносимой потери Pi-схемы превышает 80 дБ, а у L-фильтра — только 40 дБ. Однако спецификация MIL-STD-461 не предусматривает испытаний на устойчивость к кондуктивным помехам при импедансе источника и нагрузки ниже 50 Ом. На рис. 4 иллюстрируется типовая тестовая конфигурация для определения устойчивости к кондуктивным помехам согласно MIL-STD-461.

Для определения импеданса источника (испытываемого устройства) воспользуемся законом Ома. В рассматриваемом случае импеданс

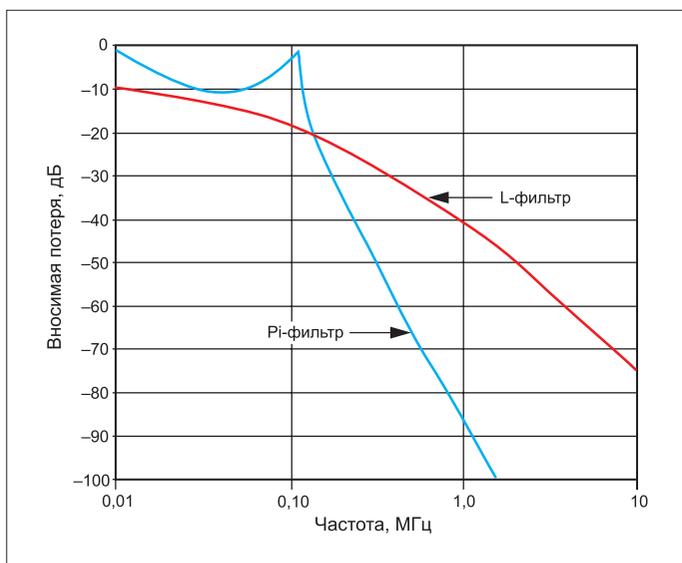


Рис. 3. Сравнение расчетных значений 50-Ом вносимой потери Pi- и L-фильтров

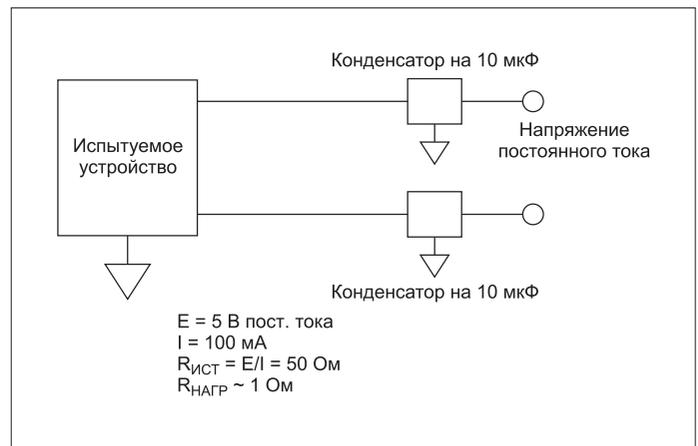


Рис. 4. Схема испытаний на устойчивость к кондуктивным помехам согласно MIL-STD-461

равен 50 Ом. Нам неизвестен импеданс нагрузки, но, исходя из того, что емкости конденсаторов равны 10 мкФ, предположим, что он мал по сравнению с импедансом источника. В данном примере будем исходить из того, что значение этого параметра составляет 1 Ом.

При более реалистичных значениях импедансов (у источника — 50 Ом, у нагрузки — 1 Ом), кривая вносимой потери L-фильтра почти не отличается от кривой Pi-фильтра (рис. 5). Немного увеличив значения C_1 и L_2 в L-схеме, можно получить характеристику, идентичную характеристике Pi-фильтра.

В примере выше нас интересует только излучение ЭМП испытываемого образца. Если бы нам понадобилось защитить это устройство от нежелательного излучения, следовало бы выбрать T-фильтр. По сути, он представляет собой две L-цепи с индуктивностью, подключенной к схеме с меньшим импедансом.

Если бы T-фильтр состоял из индуктивности L_1 на стороне испытываемого устройства, индуктивность L_3 была установлена на стороне нагрузки, а посередине между ними находился конденсатор C_2 , то L-схема для подавления кондуктивных помех включала бы в себя компоненты C_2 и L_3 . Если при оценке восприимчивости к кондуктивным помехам исходить из того, что у испытываемого устройства импеданс меньше, чем у нагрузки, L-цепь состоит из компонентов C_2 и L_1 . В обоих случаях индуктивность во вторичной цепи обеспечивает дополнительную фильтрацию. Однако вклад этого компонента относительно мал по сравнению с двумя другими.

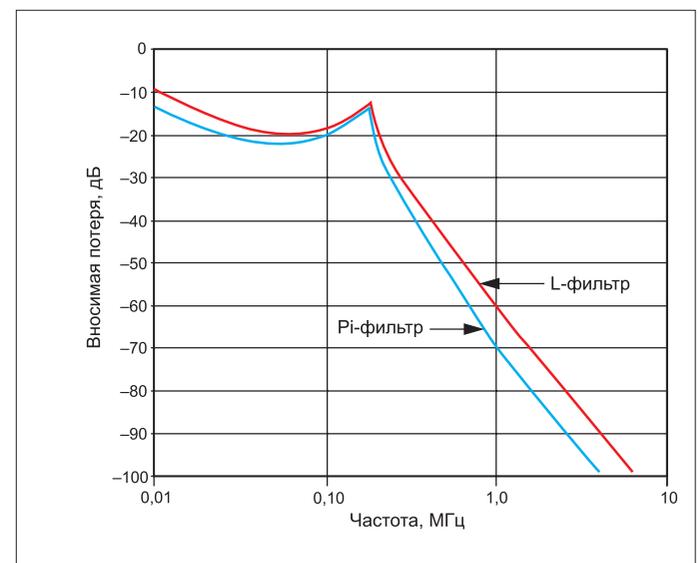


Рис. 5. Кривые вносимой потери L- и Pi-фильтров при импедансе источника 50 Ом и 1-Ом нагрузке

Хотя мы обсудили фильтрацию только синфазных электромагнитных помех, те же соображения применимы при выборе ЭМП-фильтров для дифференциального режима, в котором помехи присутствуют в виде напряжения между отдельными силовыми линиями.

Выводы

Правильный выбор схемы фильтра для подавления электромагнитных помех не сложен, если как минимум учитываются следующие параметры:

- импеданс источника, создающего ЭМП;
- импеданс нагрузки, создающий ЭМП;
- режим распространения ЭМП (синфазный, дифференциальный или оба);
- требования к кондуктивным помехам;
- требования к восприимчивости кондуктивных помех.

К числу других не вполне очевидных требований относится учет эффектов, вызванных рассогласованием; характеристики при полной нагрузке и неспособность обеспечить расчетное значение вносимой потери из-за ESL и ESR конденсаторов, а также паразитной емкости индуктивностей. ■

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 6'2018