

Выбор катушек индуктивности для фильтров силовых преобразователей

Фильтры, выполненные на катушках индуктивности и конденсаторах, обычно устанавливаются на входы и выходы импульсных DC/DC-преобразователей, чтобы уменьшить отраженный пульсирующий ток и выходные шумы, а также обеспечить соответствие требованиям к электромагнитной совместимости (ЭМС). Рабочие характеристики во всем диапазоне частот у катушек индуктивности с одинаковыми базовыми характеристиками (номинальными значениями индуктивности и тока) у разных поставщиков могут существенно различаться. В результате из-за высоких кондуктивных (наведенных) и излучаемых ЭМП не соблюдаются требования к ЭМС. В статье рассматриваются характеристики катушек индуктивностей и причины их изменения в области высоких частот.

ПО МАТЕРИАЛАМ КОМПАНИИ RECOM

Большинство современных DC/DC-преобразователей, используемых в цепях электропитания оборудования, и все изолированные DC/DC-преобразователи относятся к импульсным преобразователям энергии, у которых внешнее напряжение постоянного тока «прерывается» на высокой частоте для создания переменного тока, необходимого для функционирования силового дросселя у первых из упомянутых преобразователей или внутреннего изолирующего трансформатора у вторых. Выходное напряжение переменного тока, если речь идет об изолированном DC/DC-преобразователе, снимаемое с вторичной обмотки трансформатора, снова выпрямляется, обеспечивая напряжение постоянного тока. Кроме того, вся схема DC/DC-преобразователя охвачена обратной связью, поддерживающей стабильность выходного напряжения, которая достигается за счет управления рабочим циклом. Как правило, оно осуществляется изменением скважности с помощью широтно-импульсной модуляции, а иногда и дополнительно путем управления частотой для снижения потерь при малой нагрузке.

Благодаря такому подходу современные преобразователи отличаются высокой эффективностью (КПД) и, соответственно, низкими потерями. Недостатком рассматриваемых преобразователей является то, что любой процесс, связанный с переключением, создает высокочастотную пульсацию на входе и выходе наряду с кондуктивными и излучаемыми помехами. Эти помехи могут нарушить работу рядом расположенных каскадов и даже другого связанного каскада. Как известно, для повышения эффективности преобразователей их эксплуатируют на высоких частотах. Поскольку при этом увеличиваются скорости нарастания и спада фронтов импульсов, спектр генерируемых помех оказывается значительно шире и уходит в область достаточно высоких частот.

LC-фильтры для ослабления выходного шума

Любой силовой преобразователь для коммерческого применения оснащен функцией фильтрации, позволяющей уменьшить пульсации и шумы до типичного пикового значения около 1% от выходного напряжения постоянного тока. Это в большинстве случаев приемлемо, но если приложениям требуются более низкие уровни шумов, самое простое решение заключается в использовании внешнего LC-фильтра (рис. 1).

Поскольку импеданс катушки индуктивности теоретически равен нулю, а импеданс конденсатора – бесконечности (без учета

тока утечки), LC-фильтр не оказывает заметного влияния на напряжение постоянного тока. Однако при увеличении частоты импеданс X_L индуктивности увеличивается, а импеданс X_C конденсатора уменьшается, создавая эффект «делителя напряжения». В общем случае, появляется фильтр низкой частоты (ФНЧ) с высоким вносимым затуханием. Частота среза демпфированного LC-фильтра $f_c = \pi\sqrt{L/C}$ выбирается так, чтобы уменьшить пульсации на частоте переключения преобразователя (как правило, она не должна быть выше 1/3 от рабочей частоты преобразования). Однако довольно сложно предугадать, как в действительности фильтр станет подавлять шумы, спектр частот которых простирается до десятков МГц.

Причина в том, что на определенной частоте, когда $X_L = X_C$, LC-цепь «резонирует», и шум может усиливаться, а не ослабляться, хотя этот эффект, как правило, демпфируется нагрузочным резистором. Выше частоты резонанса все еще происходит некоторое ослабление шума, но начинают появляться другие паразитные эффекты, напрямую связанные с характеристиками входящих в фильтр элементов.

Так, например, собственная емкость $C_{WINDING}$ катушки индуктивности создает еще один резонанс на гораздо более высокой частоте. Эта емкость позволяет шуму «обходить» катушку. На более высоких частотах потери в ее сердечнике увеличиваются. Возрастает и сопротивление по переменному току $R_{WINDING}$ провода катушки из-за поверхностного эффекта. Конденсатор на высоких частотах также начинает работать как резистор, поскольку его реактивное сопротивление становится небольшим по сравнению с его эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR). Кроме того, у конденсаторов имеется еще и эквивалентная

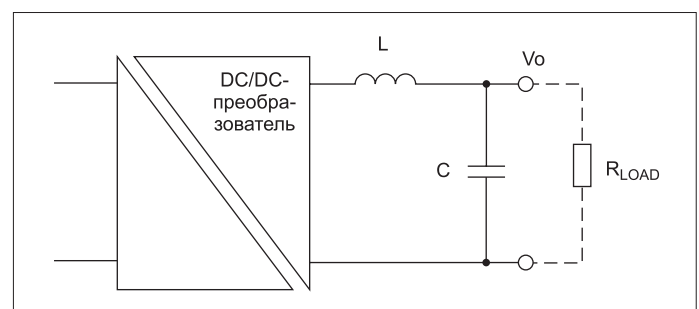


Рис. 1. Внешний LC-фильтр, используемый в импульсных источниках питания для снижения пульсации и шумов выходного напряжения

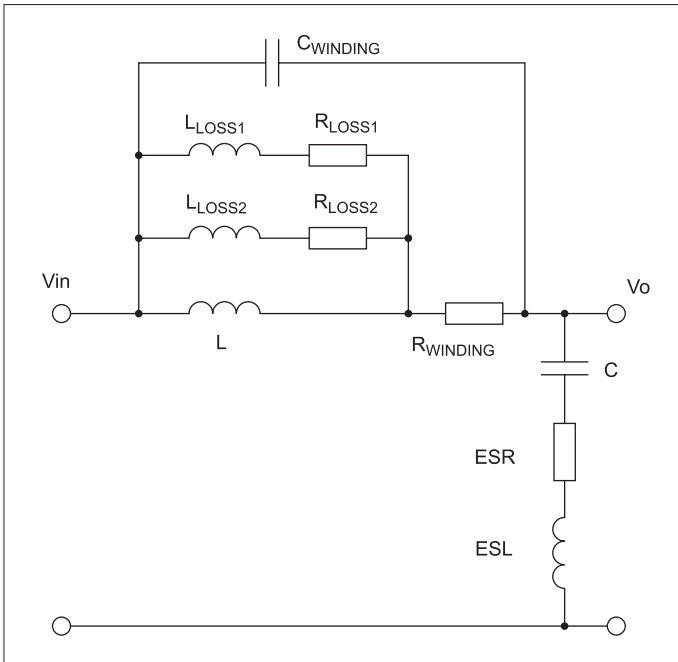


Рис. 2. Эквивалентная схема внешнего LC-фильтра с паразитными составляющими

последовательная индуктивность (ESL), наличие которой также вызывает собственный высокочастотный резонанс. На рис. 2 представлена эквивалентная схема LC-фильтра с упомянутыми паразитными компонентами.

Влияние паразитных эффектов на подавление помех

Введение в эквивалентную схему фильтра элементов L_{LOSS1} и L_{LOSS2} наряду с R_{LOSS1} и R_{LOSS2} позволяет учесть влияние

частотно-зависимых потерь в сердечнике. При этом разные значения L_{LOSS} дают разные импедансы, а разные величины резистивных элементов R_{LOSS1} и R_{LOSS2} оказывают влияние на разных частотах. Добавление других элементов типа L_{LOSS} и R_{LOSS} позволило бы сделать модель более точной, но значения этих компонентов трудно рассчитать на основе информации, предоставляемой производителями в типовых спецификациях. По этой причине для точной модели конкретной катушки индуктивности и сердечника значения этих паразитных элементов определяются эмпирически.

На рис. 3 показаны результаты моделирования характеристики вносимого фильтром затухания с учетом предполагаемых значений L, C, а также паразитных компонентов L_{LOSS} , R_{LOSS} и без них. Видно, что с паразитными компонентами потери в сердечнике могут оказывать заметное влияние на ослабление высокочастотного шума. В данном случае в районе 10 МГц видно, что разница составляет 20 дБ. К сожалению, данные по потерям в сердечнике в типовых спецификациях, как правило, отсутствуют и для катушек одного и того же номинала могут существенно различаться.

Катушка индуктивности для входного фильтра

При выборе катушки индуктивности для входного фильтра ЭМП, обеспечивающего соответствие требованиям по обеспечению ЭМС DC/DC-преобразователя (рис. 4), обычно используется ее номинальная индуктивность из технических данных от производителя, сопротивление постоянному току (R_{DC}) и иногда — собственная резонансная частота. Хотя эта информация и помогает уменьшить отраженную пульсацию входного тока на известную величину, без данных по паразитным элементам трудно установить затухание шума и его спектр.

Как видно даже из краткого анализа выходного фильтра, потери в сердечнике на высоких частотах оказывают значительное влияние на уровень подавления шума. Однако производители катушек индуктивностей не предоставляют такой информации. Их можно понять, поскольку эти потери определяются слишком большим количеством переменных. Например, потери в сердечни-

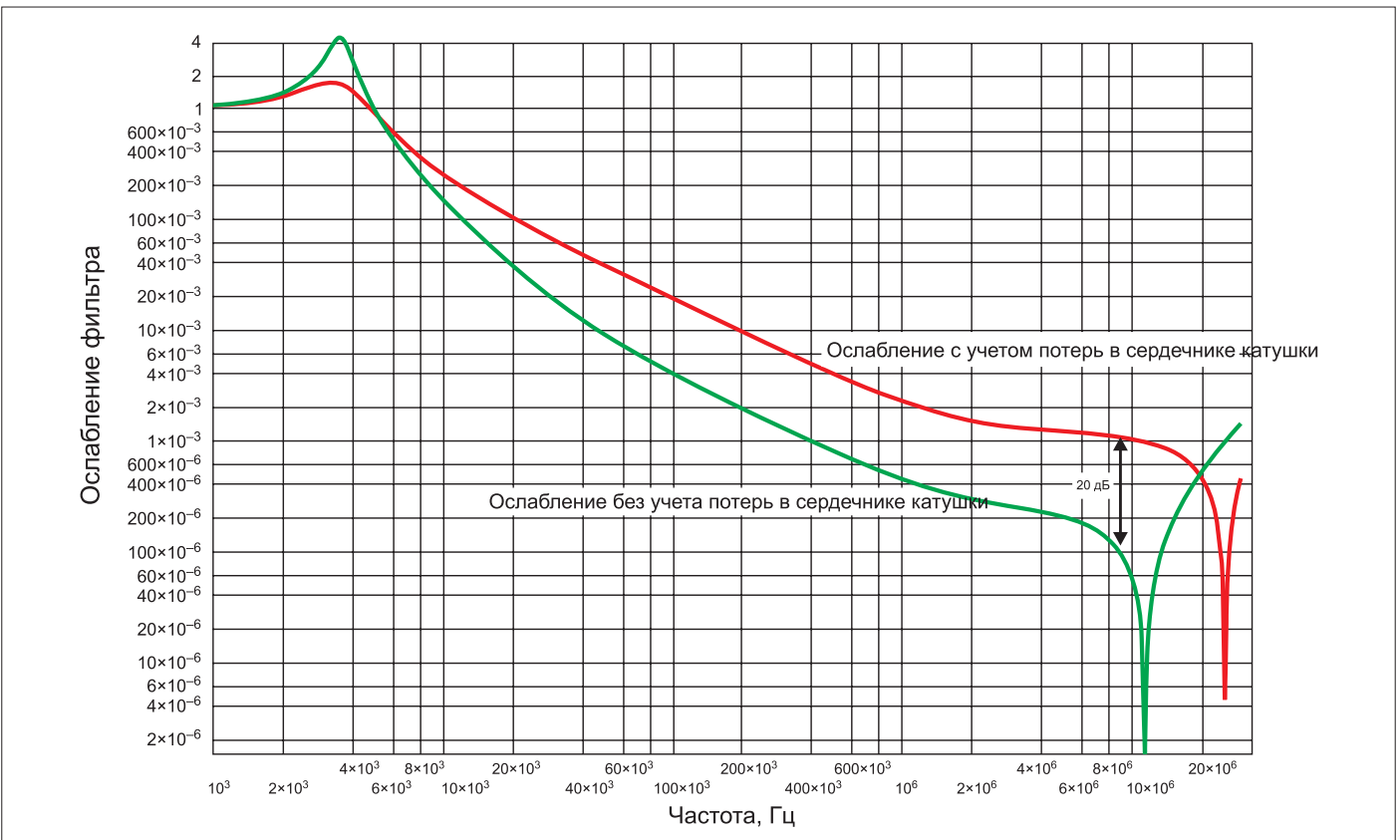
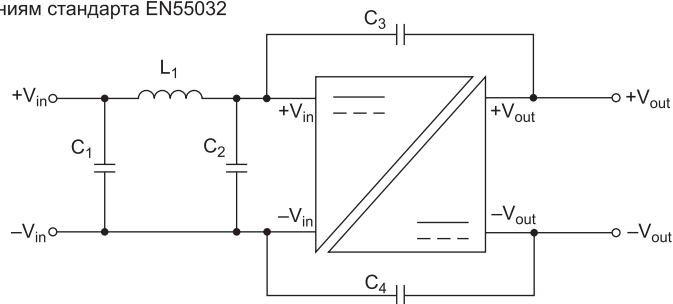


Рис. 3. Ослабление, вносимое LC-фильтром с учетом потерь в сердечнике (красная кривая) и без их учета (зеленая кривая)

Фильтр ЭМП согласно требованиям стандарта EN55032



Перечень элементов класса А

Тип DC/DC-преобразователя	C ₁	L ₁	C ₂	C ₄
RO-0505S	10 мкФ, 100 В, MLCC	-	1 нФ, 50 В, MLCC	-
RO-1205S				2,2 нФ, 5 кВ
RO-2405S				-

Перечень элементов класса В

Тип DC/DC-преобразователя	C ₁	L ₁	C ₃	C ₄
RO-0505S	10 мкФ, 100 В, MLCC	22 мкГн, RLS-226	2,2 нФ, 5 кВ	-
RO-1205S				2,2 нФ, 5 кВ
RO-2405S				2,2 нФ, 5 кВ

Рис. 4. Типичный входной фильтр для подавления ЭМП, обеспечивающий соответствие требованиям DC/DC-преобразователя к ЭМС

ке зависят от амплитуды тока, его формы, частоты, напряжения смещения постоянного тока и температуры. По этим причинам выбрать оптимальную катушку индуктивности сложно. При этом неправильный выбор часто приводит к повышенным уровням кондуктивных и излучаемых ЭМП, которые могут превысить эксплуатационные или установленные стандартами предельные значения. По большому счету, оптимальный выбор катушки фильтра осуществим только в том случае, если имеется возможность протестировать конечное устройство на соответствие ЭМС. Однако следует понимать, что внесение изменений в конструкцию — очень дорогостоящая процедура [3].

Решить поставленную задачу можно, выбрав большое значение индуктивности. Однако при этом собственная резонансная частота катушки снижается. Если же выбран компонент малого размера, у него может оказаться высоким сопротивление по постоянному току, что приведет к рассеиванию некоторой мощности. Попытка установить в этом случае фильтр в петлю обратной связи для регулировки напряжения может негативно повлиять на устойчивость работы DC/DC-преобразователя.

Катушки индуктивности сравнительно большого размера также не лишены недостатков. У них высокая собственная емкость, которая уменьшает вносимое затухание на высоких частотах. Кроме того, большая индуктивность под воздействием скачков тока вызывает скачки напряжения (переходные процессы).

В таком случае разумно выбрать меньшую индуктивность и конденсатор со сравнительно большой емкостью. Однако если использовать алюминиевый электролитический конденсатор, исходя из соображений его стоимости и размера, он не обеспечит хороших высокочастотных характеристик. У конденсаторов других типов, например керамических, хорошие характеристики на высокой частоте, но эти компоненты дорого стоят и занимают много места при больших значениях емкости, поскольку требуется несколько штук таких конденсаторов. Емкость многослойных керамических конденсаторов (MLCC) зависит от приложенного к ним напряжения постоянного тока.

Правильная комбинация L и C достигается за счет компромисса — сочетания стоимости, размера и электрических характеристик этих компонентов. После определения номинальной индуктив-

ности необходимо выбрать тип катушки среди множества предлагаемых на рынке компонентов.

Сердечники бывают разных типов — как по материалам, так и по форме. Их изготавливают из феррита и железного порошка. Кроме того, известны и «экзотические» варианты, например поликристаллические сердечники. Сердечники выпускаются в виде катушек (шпудлек), полностью экранированными, в виде кольца или буквы «Е». Известны разные варианты монтажа завершенной катушки — с выводами через сквозное отверстие или для монтажа на поверхность (SMD), что также может влиять на ее производительность.

Однозначно «плохих» катушек нет. Каждая предлагаемая на рынке катушка индуктивности подойдет для своего конкретного применения. Катушки с ферритовыми сердечниками имеют наименьшие потери, но этот материал, например, дороже, чем железный порошок. Этот порошок, в свою очередь, более устойчив к перегрузкам по току, и сохраняет величину индуктивности лучше, чем феррит (не так быстро входит в насыщение). Однако катушки на таких сердечниках имеют малую индуктивность и большие габариты. У кольцевых или тороидальных сердечников — низкая утечка магнитного поля, но их сложнее наматывать и терминировать, чем сердечники типа барабана или шпудли. Полностью экранированные катушки не излучают электромагнитное поле, но стоят дорого.

Таким образом, в выбор конечного оптимального решения необходимо вовлечь всех тех инженеров и специалистов, которые занимаются проектированием, производством, решением проблем ЭМС и закупками. ■

Литература

1. RECOM: www.recom-power.com.
2. Modelling ferrite core losses//<https://www.ridleyengineering.com/images/phocadownload/7%20modeling%20ferrite%20core%20losses.pdf>
3. В. Рентюк. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти//Компоненты и технологии. № 7. 2017.
4. RO 1 Watt SIP4 Single Output//<https://ru.mouser.com/datasheet/2/468/RO-958310.pdf>

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 10/2019



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81,
K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90,
K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-98

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1M, K52-1BM, K52-1Б, K52-9, K52-11,
K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24,
K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28.

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1A, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип),
K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип),
K53-77(чип), K53-78(чип)

суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001

Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53
e-mail: elecond-market@elcudm.ru, <http://www.elecond.ru>