

Взгляд на обеспечение требований по ЭМС со стороны блоков питания

Электромагнитные помехи (ЭМП) всегда являются потенциальной проблемой для импульсных источников питания, причем в силу самой их природы преобразования энергии. Это проблема касается как преобразования напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока (AC/DC), так и напряжения постоянного тока в напряжение постоянного ток (DC/DC). Современные решения преобразователей могут хорошо работать с точки зрения излучение ЭМП и устойчивости к их воздействию, но для достижения наилучших результатов должны быть выполнены соответствующие внешние подключения. Иногда для удовлетворения конкретных требований приложения хватает входных и выходных конденсаторов, а иногда им необходима дополнительная фильтрация. Однако неправильно спроектированный и просто конструктивно неверно выполненный фильтр может на практике не улучшить ситуацию, а усугубить проблему ЭМП. В этой статье приводятся некоторые рекомендации по достижению наилучшей производительности в части ЭМП для AC/DC- и DC/DC-преобразователей, в том числе и при использовании внешних помехоподавляющих фильтров.

**Стив Робертс
(Steve Roberts)**

**Перевод:
Владимир Рентюк**

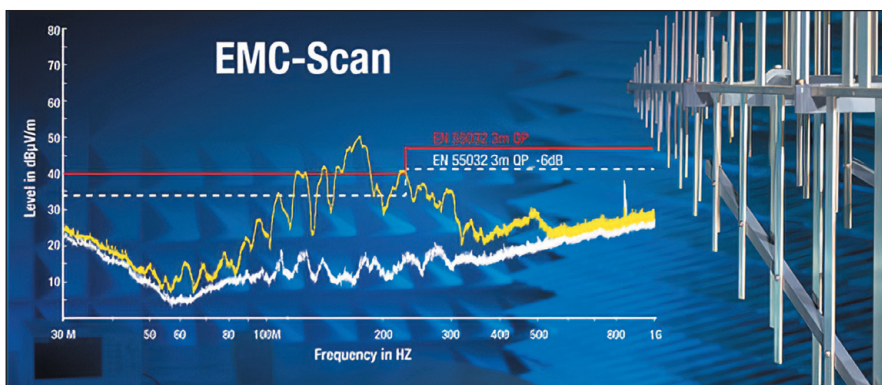
Электромагнитная совместимость (ЭМС) оборудования — это термин, охватывающий кондуктивные и излучаемые помехи, а также устойчивость к внешним кондуктивным напряжениям и излучаемым электромагнитным помехам, и в дополнение — устойчивость к электростатическому разряду (Electrostatic Discharge, ESD). Сюда также относятся и вносимые AC/DC-преобразователями искажения в линии электропитания. В Европе директива EMC 2014/30/EU обязывает конечное оборудование соответствовать гармонизированным стандартам в части обеспечения ЭМС (подробно про проблемы ЭМС написано в серии статей [4]). В этой статье, не пытаясь объять необъятное, кратко рассмотрим причины кондуктивных помех и излучения от AC/DC- и DC/DC-преобразователей и то, как компоненты фильтра могут влиять на их производительность с точки зрения электромагнитной совместимости.

Высокая эффективность может привести к высокому уровню собственных шумов

Инженерам хорошо известны неоспоримые преимущества импульсных преобразователей (в англ. терминологии — Switching Mode Power Supply, SMPS), а именно высокая эффективность (здесь подразумевается их КПД) при небольших габаритах и весе. Но, как обычно бывает в решениях радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в бочке меда найдется и ложка дегтя. При проектировании или использовании импульсных преобразователей в роли источников питания разработчикам РЭА придется бороться с электрическим шумом и помехами, которые они генерируют просто в силу своей природы.

Несомненно, что современные схемные решения и конструкции преобразователей значительно усовершенствованы за счет улучшения характеристик их компонентов и топологий с низким уровнем генерируемых шумов помех, например резонансных. Кроме того, такие методы, как «размытие спектра», помогают уменьшить энергию излучения в контролируемой полосе частот ее измерения.

Что же касается источника шума, то основной вклад — это следствие быстрого переключения силовых полупроводников, причем время нарастания и спада фронта импульса измеряется в наносекундах, что, собственно, и необходимо для достижения высокой эффективности. Однако высокие скорости нарастания напряжения dV/dt и тока di/dt не могут быть лишь внутренней проблемой преобразователя, они проявляются в виде коротких импульсов напряже-



ния или тока, распространяемых вдоль входных или выходных линий. Из анализа Фурье (зависимость огибающей излучения от общей формы сигнала переключения, которая показана на рис. 1) ясно видно, что с уменьшением времени нарастания/спада импульса T_r ширина полосы излучения T_f увеличивается с полной амплитудой A , на которую влияет рабочий цикл переключения T_{on}/T_p [1].

Компоненты шума

Кондуктивные шумы (их более привычно называть — «помехи») бывают двух типов: дифференциальные (Differential Mode, DM) и синфазные (Common Mode, CM). На рис. 2 схематично показаны оба типа помех. Как правило, они присутствуют вместе, с тем или иным уровнем. Дифференциальные помехи (они указаны синими стрелками и имеют индекс dm) измеряются как напряжение между прямой линией передачи тока и линией его возврата (общим проводом). Синфазные помехи (они указаны красными стрелками и имеют индекс cm) измеряются между обеими линиями передачи тока (прямой и обратной) и заземлением системы. Обычно они записываются как напряжение через определенный импеданс. Это связано с тем, что импульсные преобразователи энергии, например генераторы синфазных помех, могут рассматриваться в качестве источника тока. Кроме того, синфазные помехи проявляются на высоких частотах.

Дифференциальные помехи легко измеряются с помощью осциллографа или анализатора, но что касается синфазных помех, для их измерения требуются специальные приспособления, так называемые эквиваленты сети. В качестве таких эквивалентов используется схема стабилизации полного импеданса линии, известная как LISN (англ. LISN — Line Impedance Stabilization Network), или эквивалента сети AMN (англ. AMN — Artificial Mains Network). Это два разных названия для одного и того же устройства. В русскоязычной технической литературе и стандартах типа ГОСТ Р чаще всего используется термин «эквивалент полного сопротивления сети» (ЭПСС) и реже LISN.

Такой эквивалент включает в себя определенный оконечный импеданс и фильтрацию, необходимую для изоляции любого эффекта от источника питания в восходящем направлении. Структура и параметры эквивалента LISN определяются стандартами CISPR, обычно CISPR 22, — «Information technology equipment. Radio disturbance characteristics. Limits and methods of measurement» («Оборудование информационных технологий. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений»). Как уже было сказано, LISN предназначен для измерения уровня кондуктивных помех от AC/DC-преобразователя, но иногда он используется и для оценки помех DC/DC-преобразователей. LISN измеряет взвешенную комбинацию дифференциальных и синфазных помех, так что даже при отсутствии синфазных помех будет видна половина амплитуды дифференциальных шумов. Сказанное означает,

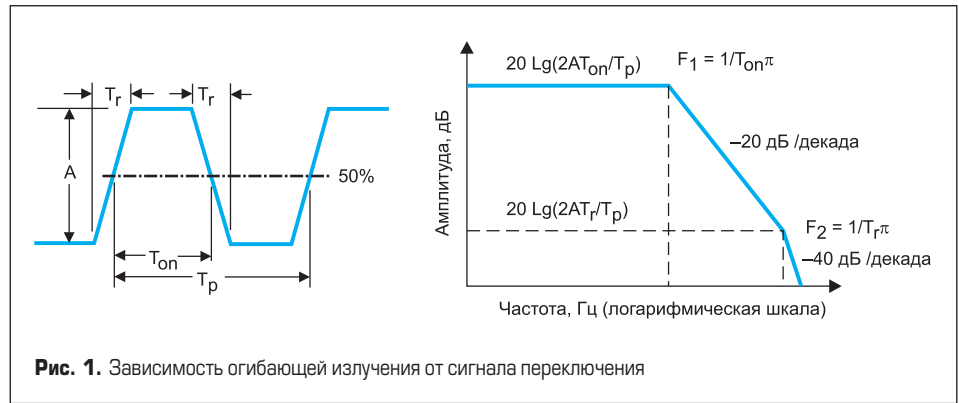


Рис. 1. Зависимость огибающей излучения от сигнала переключения

что для обеспечения соответствия предельным значениям в части ЭМП, указанном в стандарте CISPR 22 и вытекающем из него стандарте EN 55022, необходимо обеспечить затухание обоих типов помех, как дифференциальных, так и синфазных (подробно [4–6]).

Входные фильтры DC/DC-преобразователя

Что касается DC/DC-преобразователей, для них на уровне ЭМП нет отдельного и единого стандарта. Это связано с тем, что такие преобразователи, как правило, встроены в системы, которые в целом уже как конечный продукт должны соответствовать требованиям по ЭМС для аппаратуры того или иного типа. Производители DC/DC-преобразователей в виде модулей для монтажа на печатную плату включают в них как минимум входной конденсатор, и результирующие уровни шума для РЭА широкого применения зачастую оказываются вполне приемлемыми. Иногда для конкретного приложения требуются более низкие уровни, тогда производитель рекомендует внешний LC-фильтр, который служит для уменьшения уровня дифференциальных помех. Такой фильтр на рис. 3 образуют элементы L и C1.

Может показаться весьма заманчивым использовать здесь компоненты с большими номинальными значениями индуктивности и емкости, полагая, что наступит резкое снижение шумов и помех, но это может быть контрпродуктивно. Большие значения индуктивности могут иметь высокое сопротивление по постоянному току (RDC), которое вызывает падение напряжения и, соответственно, рассеивание мощности. Серьезной проблемой для катушек с большой индуктивностью мо-

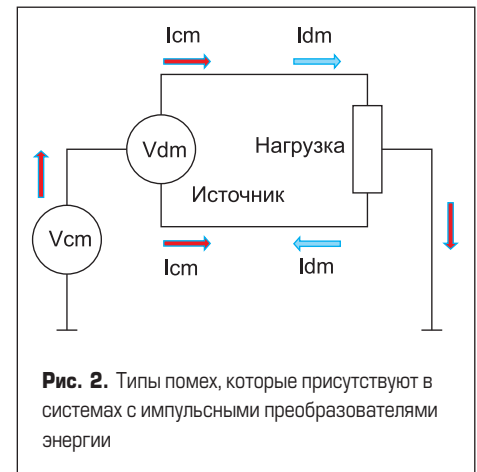


Рис. 2. Типы помех, которые присутствуют в системах с импульсными преобразователями энергии

жет стать и насыщение магнитопровода (сердечника) и сопровождаемое этим снижение индуктивности катушки, а значит, и потеря фильтрующих свойств уже самого фильтра. Кроме того, у данных фильтров частота собственного резонанса может быть низкой, что, в свою очередь, приводит к так называемому звону (паразитной генерации на частоте резонанса) и потенциальному перенапряжению на входе напряжения постоянного тока. Причина звона в том, что входной импеданс преобразователя становится отрицательным, а добротность паразитного колебательного контура — достаточно высокой (проблемы проектирования входного фильтра подробно описаны в [7]) для его демпфирования). Этот эффект может ухудшить контролируемый спектр шума. На рис. 4 показаны результаты сравнительных измерений кондуктивных помех в соответствии с нормами EN55022 (CISPR-22) для DC/DC-преобразователя без входного фильтра, с установленными элемен-

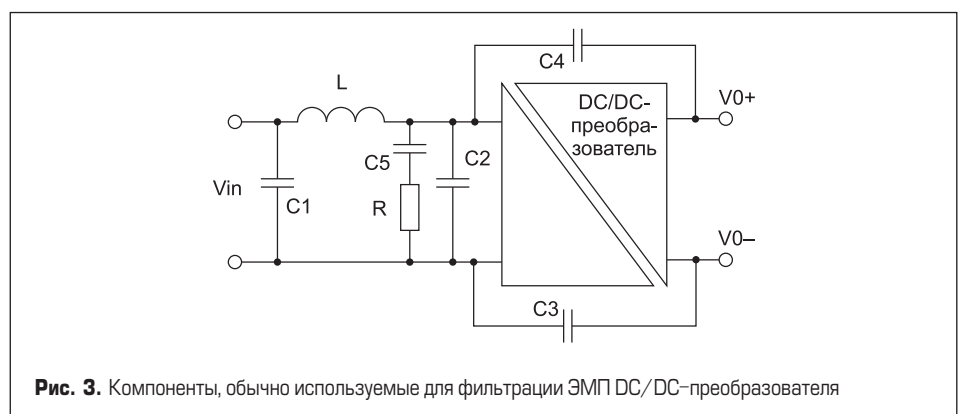
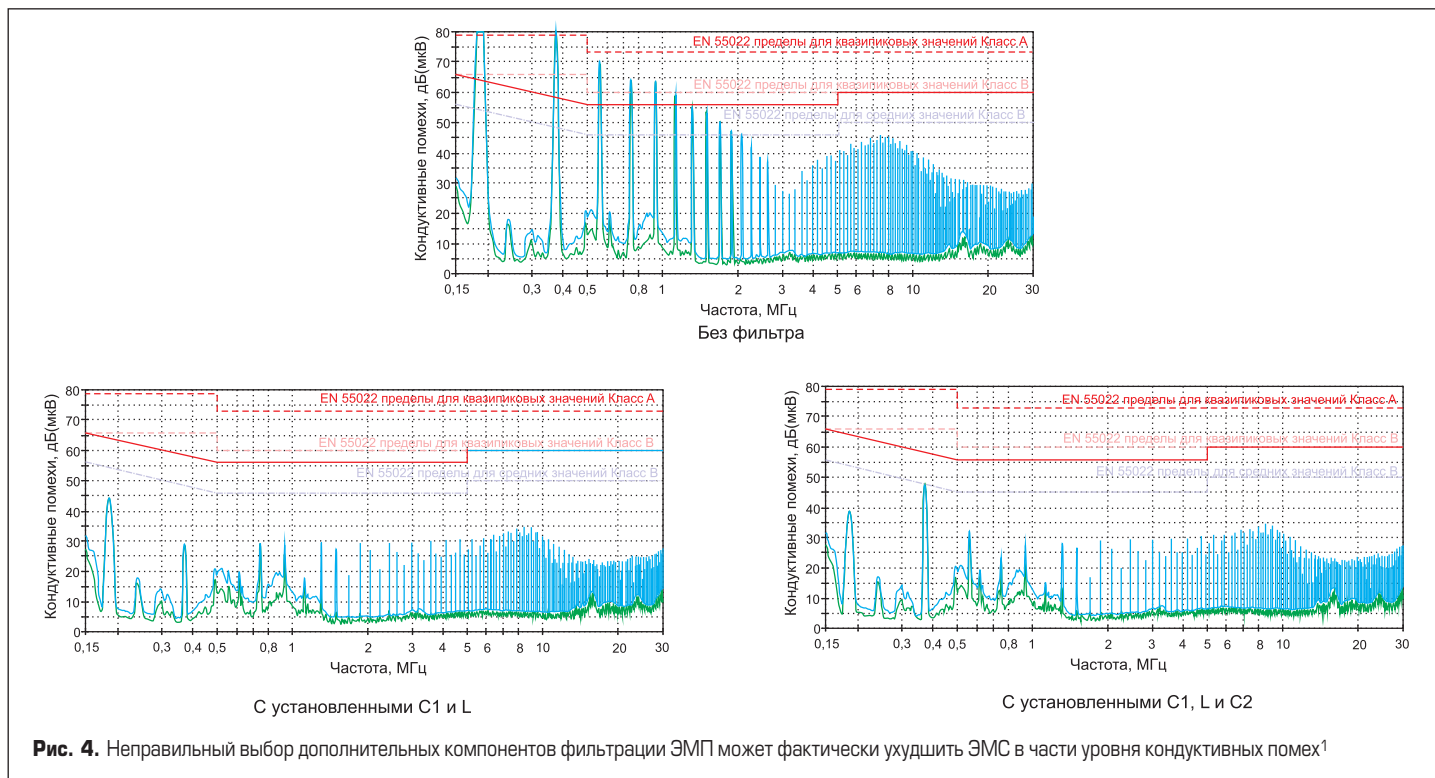


Рис. 3. Компоненты, обычно используемые для фильтрации ЭМП DC/DC-преобразователя



тами L и C1 (рис. 3), а затем с добавленным C2. Как можно видеть, последний вариант имеет более высокие кондуктивные пики помех в низкочастотной части спектра.

Другая проблема, которая также может возникнуть, — нестабильность петли регулирования по отрицательной обратной связи (то есть по контуру управления) преобразователя. Это происходит в случае, когда выходной импеданс фильтра на его резонансной частоте близок к входному импедансу DC/DC-преобразователя (который постепенно увеличивается — входной ток уменьшается при увеличении входного напряжения). Данный эффект исследован Миддлбруком в [2]. Он пришел к следующему выводу: во избежание этого негативного эффекта необходимо, чтобы выходное сопротивление входного фильтра было намного меньше, чем входное сопротивление преобразователя. Этого удастся достичь с помощью дополнительной демпфирующей цепочки R и C5, также представленной на рис. 3. Емкость конденсатора C5 должна быть намного больше емкости конденсатора C2 (может быть внутренней по отношению к постоянному току) и умножена на 5. При этом номинальное значение демпфирующего сопротивления вычисляется по формуле: $R = \sqrt{L/C2}$. Альтернативно аналогичный эффект дает использование в качестве C5 электролитического конденсатора с присущим ему эквивалентным последовательным сопротивлением (Equivalent Series Resistance, ESR), но неудобство метода в том, что емкость и сопротивление потерь (ESR) в таком случае не столь хорошо контролируются.

Что касается синфазных помех, они, как правило, не являются проблемой для большинства DC/DC-преобразователей, поскольку их вход и выход могут быть заземлены (подключены к общему проводу). Однако, если это не так, то есть если речь идет об изолированном DC/DC-преобразователе, с входом, не имеющим общей «земли» с выходом, то для снижения уровня синфазных помех можно добавить конденсаторы C3 и C4 (рис. 3), не забывая о необходимости учитывать ограничения по емкости уже с точки зрения безопасности. Подобное ограничение может происходить, если DC/DC-преобразователь является частью защитного барьера для высокого напряжения переменного тока, что часто наблюдается в медицинской аппаратуре [8]. Фактические значения емкости конденсаторов C3 и C4 в этом случае устанавливают максимальный ток утечки переменного тока, который может через них протекать. Кроме того, эти Y-конденсаторы должны соответствовать требованиям безопасности по электрической прочности изоляции, то есть иметь правильно выбранное номинальное рабочее напряжение, с учетом возможных переходных процессов. В крайнем случае, для наиболее чувствительных к обеспечению безопасности применений, таких как медицинское оборудование, имеющее непосредственный контакт с пациентом, может потребоваться два последовательно включенных конденсатора. Это делается на тот случай, если по той или иной причине произойдет короткое замыкание одного из конденсаторов.

В некоторых приложениях может потребоваться и подавление переходных процессов

на входе преобразователя постоянного тока. Отдельные требования по устойчивости к переходным процессам установлены, например, стандартами для автомобильной и железнодорожной промышленности, но в других областях применения эти требования определены не столь четко. Недавний европейский стандарт EN IEC 61204-3: 2018 «Low voltage switch mode power supplies — Part 3: Electromagnetic Compatibility» («Импульсные источники питания низкого напряжения. Часть 3: Электромагнитная совместимость») пока не получил широкого распространения, но в нем уже определены некоторые уровни перенапряжения для различных категорий применения преобразователей постоянного тока.

Входные фильтры AC /DC-преобразователя

Ситуация с AC/DC-преобразователями выглядит проще. Для блоков питания высокой мощности обычно имеется прямое подключение к питающей сети напряжения переменного тока, следовательно, AC/DC-преобразователь, лежащий в его основе, должен соответствовать директиве по электромагнитной совместимости. Соответствие блока питания в целом достигается тем, что внутри него должен быть установлен фильтр, подходящий для предполагаемого применения конечного продукта — промышленного, информационного, телекоммуникационного, медицинского, — как часть испытательного оборудования и т. д.

Однако существует большой рынок AC/DC-преобразователей, устанавливаемых на плате и подключаемых к сети напряжения переменного тока через внутренние дорожки платы и далее через провода подачи питания. Такой AC/DC-преобразователь, как, например, серия

¹Примечания к рис. 4, согласно стандарту CISPR-22:

1. Измерения детектором средних значений обычно используются для определения узкополосных помех и сигналов, в частности для различения/разделения узкополосных и широкополосных помех.

2. Измерения квазиликовом детектором предусмотрены для взвешенного измерения широкополосных помех при оценке звукового раздражения, например радиослушателя, и также могут быть использованы при измерении узкополосных помех.

RAC20-K компании RECOM, для соответствия самым высоким стандартам по электромагнитной совместимости (класс B) зачастую уже имеет внутреннюю фильтрацию. Но иногда на рынке предлагаются продукты, удовлетворяющие лишь нижней границе класса A.

Отсутствие элементов фильтрации, что вполне естественно, делает преобразователи дешевле и таких ограниченных мер может быть достаточно, особенно если преобразователь питается от сети переменного тока, которая уже отфильтрована в другом месте системы. Болеющие за свое дело и ценящие потребителя производители обязательно предложат в спецификациях на свои продукты проверенную схему подключения и необходимые внешние компоненты фильтра, которые позволят этим преобразователям соответствовать по ЭМП уровням класса A и B. Обычно здесь предлагается X-конденсатор на линии питания напряжения переменного тока и Y-конденсаторы от обеих линий напряжения переменного тока на «землю». Серия AC/DC-преобразователей RAC03-GA компании RECOM служит здесь хорошим наглядным примером.

Для AC/DC-преобразователей необходимо принимать во внимание тот факт, что для того, чтобы фильтрация была эффективной, обеспечивающие ее компоненты должны быть расположены очень близко к преобразователю с непосредственным и низкоимпедансным соединением с «землей».

Помните также, что для AC/DC-преобразователей тоже существуют ограничения на допустимые номинальные значения элементов

фильтра. Например, X-конденсатор должен разряжаться до безопасного напряжения, как правило, в течение 1 с после отключения преобразователя от сети переменного тока. Так что здесь для его разряда может потребоваться соответствующий емкости X-конденсатора параллельно включенный резистор. Как уже было сказано для преобразователей постоянного тока, Y-конденсаторы, в случае если заземление системы отключается, не должны пропускать опасный ток утечки. Максимально допустимый ток для наиболее чувствительных медицинских применений может составлять всего 10 мкА, ограничивая значения емкости конденсаторов до 100 пФ. Другие приложения, например в области информационных технологий, допускают гораздо более высокие токи утечки, в частности до 3,5 мА, что позволяет использовать более высокие значения Y-конденсаторов.

Характеристики системы в части ее ЭМС нельзя предсказать из характеристик ее отдельных компонентов. Поэтому, например, отдельные монтируемые на плате AC/DC-преобразователи даже с малым уровнем ЭМП не могут гарантировать вам выполнение норм и соответствие требованиям стандартов по ЭМС вашего конечного продукта. Для облегчения такого весьма непростого дела, как сертификация по ЭМС [4], некоторые производители, в том числе RECOM [3], выпускающие широкий спектр как системных, так и монтируемых на плате AC/DC- и DC/DC-преобразователей питания, в помощь своим клиентам в тестировании их конечных продуктов на соответствие требованиям в части

ЭМС предлагают им использовать имеющиеся в распоряжении компании ее собственные средства тестирования и консультации квалифицированных специалистов.

Литература

1. www.smeps.us/Unitrode.html
2. Middlebrook R. D. Design Techniques for Preventing Input-Filter Oscillations in Switched-Mode Regulators, Proceedings of PowerCon 5. The Fifth National Solid-State Power Conversion Conference. San Francisco, CA. May 4–6, 1978.
3. RECOM: www.recom-power.com
4. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
5. Рентюк В. Что нужно знать по испытаниям на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
6. Уайт К. Устранение проблем, выявленных в ходе испытаний изделия на выполнение требования по ЭМС // Компоненты и технологии. 2017. № 10.
7. Робертс С. Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация // Компоненты и технологии. 2015. № 8.
8. Робертс С. Требования к DC/DC-преобразователям для медицинской аппаратуры с монтажом на печатную плату. www.recom-power.com/ru/rec-n-board-mount-dc-dc-converters-in-medical-applications-59.html?0