

# DC/DC-преобразователи с улучшенной фильтрацией электромагнитных помех



**Стивен Саммер,**  
президент компании Modular Devices, Inc. (MDI),  
доктор технических наук (электротехника)

Компания MDI (США) является пионером в разработке и производстве широкого спектра гибридных DC/DC-преобразователей со встроенными фильтрами электромагнитных помех, которые соответствуют широко используемому стандарту MIL-STD-461C в части электромагнитного излучения и восприимчивости. В последнее время заказчики проявляют интерес к преобразователям, которые соответствуют более поздним редакциям стандарта MIL-STD-461, а именно: D, E и F.

Новые редакции требуют более сильного подавления помех, что влечет за собой изменение топологии фильтров, — в основном из-за других способов измерений и других предельных значений. Реализация процесса подавления фильтром помех без увеличения нежелательного резонансного эффекта и при сохранении объема и размеров выпускаемых компанией MDI изделий — не простая задача. Она была решена путем оптимизации компоновки и конструкции фильтра. В результате компания представила на рынке три улучшенных продукта из семейства гибридных DC/DC-преобразователей: компактную серию 3090 с выходной мощностью 5 Вт, серию 6681 — 30 Вт и серию 3656 — 80 Вт. Модели этих серий имеют одиночные или двойные выводы, которые включают в себя встроенные фильтры электромагнитных помех и соответствуют стандартам MIL-STD-461D/E/FCE101, CE102, CS101/114/115 и 116, а также DO-160C/D/E/F/G CE разделу 21 и CS разделам 20 и 22. Это значит, что данные преобразователи полностью соответствуют требованиям электромагнитной совместности (ЭМС) для устройств, применяемых в космической технике, а также в военной и гражданской авиации. Все модели очень компактны и высокоэффективны, включают в себя автономные встроенные фильтры и удовлетворяют требования стандартов:

- MIL-STD-461D/E/F
  - электромагнитные излучения (CE)
    - CE101, выводы питания, 30 Гц — 10 кГц;
    - CE102, выводы питания, 10 кГц — 10 МГц;
  - восприимчивость (CS)
    - CS101, выводы питания, 30 Гц — 150 кГц;
    - CS114, защита кабеля, 10 кГц — 200 МГц;
    - CS115, защита кабеля, импульсное воздействие;
    - CS116, кабели и выводы питания, воздействие затухающего синусоидального сигнала, 10 кГц — 100 МГц.
- DO-160C/D/E/F/G
  - электромагнитные излучения
    - раздел 21: цепи питания, категории 15 кГц — 30 МГц, категории B, LMN, AZ;
  - восприимчивость
    - раздел 20: цепи питания, 10 кГц — 400 МГц;
    - раздел 22: наведенные молнией процессы.

Модели 3090 и 6681 достаточно надежны, чтобы функционировать в соответствии со стандартом MIL-STD-704A при наличии импульсов 80 В/100 мс в рабочем напряжении. Модели серии 3656, разработанные в соответствии со стандартом MIL-STD-1275 в части электронной автоматики, способны выдержать скачки напряжения до 100 В и пиковые выбросы в 250 В.

Далее рассмотрим проблемы, которые необходимо было решить в процессе создания улучшенных моделей преобразователей.

**Электромагнитные помехи.** Это нежелательное электромагнитное излучение от электрических и электронных устройств, к которым относится и DC/DC-преобразователь. Излучение может провоцировать нарушение работы других устройств как внутри заданной системы, так и вне ее. Оно может также вызвать нарушение работы внутри самого устройства, что называется внутренними помехами.

**Все DC/DC-преобразователи являются источниками электромагнитных помех.** В природе нет коммутующих DC/DC-преобразователей, не излучающих электромагнитные помехи. Спектр помех до фильтра (которые данный фильтр должен погасить)



зависит от способа изменения входного напряжения — обычная широтно-импульсная модуляция или переключение «нулевой ток/нулевого напряжения». Нужно учитывать и уровень помех на входе преобразователя. Широтно-импульсная модуляция обычно (но не всегда) имеет фиксированный частотный спектр, в то время как схемы «нулевой ток/нулевого напряжения» могут иметь изменяющийся частотный спектр.

Схемы «нулевой ток/нулевого напряжения» излучают меньше электромагнитных помех до фильтра, шум приходит в виде «пакетов» и на малых нагрузках появляется на относительно низких частотах. Низкочастотный спектр делает фильтрацию более сложной и больше похожей на фильтрацию с фиксированной частотой относительно размеров и массы фильтров. Учитывая относительно низкий уровень мощности, на который рассчитаны гибридные DC/DC-преобразователи, мы обычно используем ШИМ на фиксированной частоте.

**Стандарты, определяющие допустимые уровни излучения электромагнитных помех.** Поскольку все технические требования обозначаются в числах, уровень допустимого излучения обычно определяется спектральным пределом, который выражается зависимостью логарифмического уровня помехи (дБ) от логарифма частоты. Указанные требования изложены в следующих стандартах: MIL-STD-461C\*, MIL-STD-461D и выше; DO-160; FCC/VDE; SSP30237\*. Допустимый уровень помех определяется значениями тока или напряжения. Звездочкой обозначены стандарты с использованием значений токов, в остальных стандартах — напряжения. Каждый стандарт содержит предельные значения, излучение выше уровня которых не допускается.

**ЭМС и чувствительность к помехам.** Помимо допустимых пределов излучений DC/DC-преобразователем, стандарты в части электромагнитных помех определяют различные внешние воздействия на вход устройства (скачки напряжения, модуляция на звуковых частотах), к которым преобразователь должен быть устойчив. Помехи на входе могут быть вызваны различными источниками, например генератором, или комбинацией эффектов от других нагрузок в системе. Эти помехи неоднородны и зависят от эффекта наложения. Эти неоднородные помехи всегда влияют на выходное напряжение преобразователя. При больших искажениях, обусловленных характеристиками системы, подбирается собственный разрешенный уровень помех в выходном сигнале DC/DC-преобразователя, который должен быть четко аргументирован и понятен.

**Создание фильтра электромагнитных помех.** Фильтры электромагнитных помех для DC/DC-преобразователей пропускают рабочее напряжение, но блокируют высокие частоты. Это фильтры,



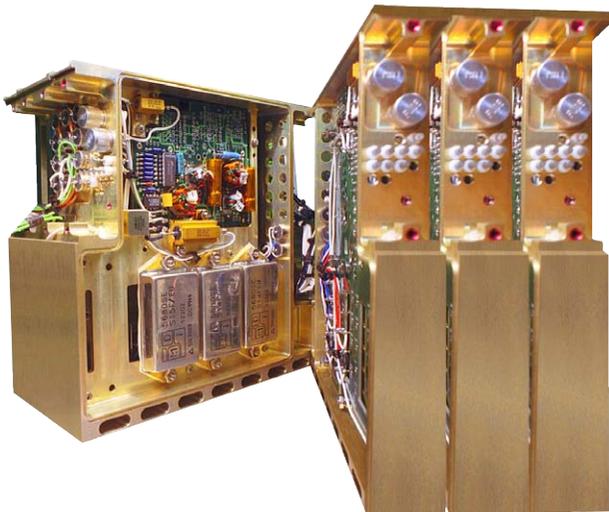
пропускающие нижние частоты. В процессе создания фильтра разработчик оценивает разницу между спектром частот входного напряжения без фильтрации и спектром выходного напряжения, разрешенным стандартами, и предусматривает определенный запас. Инженеры находят лучшую комбинацию L, C и R, которая позволяет достигнуть необходимого уровня затухания помех. Не так просто найти комбинацию, чтобы соответствовать всем требованиям стандарта. Разработка фильтра для DC/DC-преобразователя осложняется следующими факторами:

- резонанс фильтра чрезмерно увеличивает входную восприимчивость и может отрицательно сказаться на выходном напряжении преобразователя;
- резонанс фильтра провоцирует потери и нагревание;
- выходное сопротивление фильтра может сделать преобразователь нестабильным;
- потери в фильтре понижают эффективность;
- паразитные и поверхностные эффекты фильтра могут уменьшить затухание;
- компоненты фильтров должны находиться внутри самого преобразователя.

**Как справиться с чувствительностью на звуковых частотах.** Фильтры электромагнитных помех являются низкочастотными, они вырезают частоты, лежащие в звуковом диапазоне, поскольку частота переключения гораздо выше звукового диапазона. LC-фильтры имеют один или более резонансов вблизи частоты среза. В зависимости от добротности, номиналов LC и др. фильтр может усиливать помехи. Этот нежелательный эффект можно уменьшить за счет изменения резонансных частот. Подбором резонансных частот мы также можем уменьшить вероятность возникновения больших токов в цепи, которые приводят к нагреву фильтра.

**Как избежать «колебаний Миддлбрука».** Большинство управляемых DC/DC-преобразователей имеют в некоторой степени отрицательное сопротивление. Другими словами, при постоянной нагрузке на выходе повышение напряжения вызывает уменьшение входного тока. В работе доктора Миддлбрука описывается, как комбинации выходных положительных сопротивлений фильтров взаимодействуют с отрицательным сопротивлением DC/DC-преобразователей, создавая колебания на входе. Поскольку DC/DC-преобразователь должен быть эффективным, мы хотим иметь это отрицательное сопротивление, но при этом предотвратить «колебания Миддлбрука», удерживая сопротивление фильтра как можно ниже.

**Паразитные эффекты LC-элементов.** При разработке фильтра электромагнитных помех мы берем в расчет «чистые» L- и C-элементы. Но реально все пассивные элементы имеют свои паразит-





ные эффекты, которые искажают их работу. В индуктивностях паразитные шунтирующие емкости позволяют проходить высоким частотам. Спротивление обмотки является причиной потери энергии, но дает дополнительное затухание фильтрам. Индуктивность имеет зависимость от тока и температуры.

Конденсаторы имеют эквивалентное последовательное сопротивление и эквивалентную последовательную индуктивность. Емкостное сопротивление конденсаторов зависит от напряжения, температуры и частоты. Конденсаторы и индукторы могут иметь паразитные емкости при поверхностном монтаже. По этим емкостям помехи могут просто обойти фильтр, если не будут выполнены требования к их компоновке.

В целом, для отдельных источников питания можно использовать механическую защиту или электромагнитный пленум, которые применяются для предотвращения паразитных электромагнитных утечек вокруг фильтра. В то же время в миниатюрных гибридных цепях компоненты расположены очень близко и нет никакой возможности для создания физического щита, поэтому такая разработка – скорее искусство, чем наука.

**Почему внешний фильтр для одного и более преобразователей не самый лучший вариант.** Все источники питания имеют внутреннее сопротивление. Все фильтры электромагнитных помех тоже имеют свое внутреннее сопротивление, которое в большинстве случаев гораздо выше, чем в источниках питания. Когда гибридные DC/DC-преобразователи только появились, ни один из них не имел встроенного фильтра. Позже, в ответ на запросы потребителей, некоторые производители разработали отдельные фильтры электромагнитных помех для фильтрации одного и более преобразователя. Это решение имеет ряд недостатков: увеличиваются стоимость, размеры и масса дополнительного герметичного гибридного корпуса;

цепи между выходом фильтра и DC/DC-преобразователей могут излучать дополнительные электромагнитные помехи; из-за объединения выходов конвертеров в одном конструктиве могут возникать взаимные влияния – нагрузка одного конвертера может влиять на входы других преобразователей, использующих тот же фильтр, а это может вызвать выходные перекрестные искажения и дополнительные пульсации.

**Почему один фильтр на один преобразователь – лучшее решение.**

- Единственный корпус уменьшает затраты, размеры, массу и инженерные риски.
- Фильтр электромагнитных помех оптимизирован под заданный преобразователь. Отсутствуют перекрестные выходные искажения.
- Нет никаких дополнительных цепей между фильтром и преобразователем.
- Встроенные фильтры позволяют держать электромагнитные помехи внутри корпуса.

**Электромагнитное излучение и чувствительность.** Большинство стандартов в части электромагнитных помех, помимо требований по электромагнитным помехам в рабочем напряжении, содержат похожие требования и для электромагнитного излучения и восприимчивости. DC/DC-преобразователи компании MDI представлены в абсолютно герметичных металлических корпусах, которые выполняют роль щита от любых электромагнитных излучений. Поэтому только входные, выходные и управляющие выводы требуют проверки электромагнитного излучения.

Первые DC/DC-преобразователи от других производителей не имели фильтров электромагнитных помех и поэтому у них было мало шансов соответствовать современным требованиям в этой области. Многие из них имели стандартные штырьковые разъемы, что является не лучшим решением для защиты от излучений. Выходные выводы были в непосредственной близости от входных, и это не позволяло минимизировать электромагнитное излучение. Большое расстояние между входными

штырьками не только усиливает внешнее, но и увеличивает паразитный шум внутри гибридного преобразователя.

Входные проводники могут выступать в роли антенны, если расположены далеко друг от друга и образуют петлю. Оптимальным решением является их близкое расположение. Для уменьшения электромагнитных эффектов входные цепи можно переплести. При планарном выполнении на печатной плате выводы можно размещать в одной плоскости: вверх и вниз.

Все DC/DC-преобразователи компании MDI содержат выходные фильтры, которые ослабляют влияние высокочастотного шума. Такой шум обычно генерируется в выпрямителях и находится в диапазоне 10-30 МГц. Выходные фильтры обеспечивают высокое затухание уровня выходных шумов.

Тем не менее выходы преобразователей должны быть соединены должным образом для уменьшения любого возможного электромагнитного излучения. Необходимо избегать петель в цепях, выходные и входные выводы не должны располагаться близко друг от друга.

В целом, при соблюдении рекомендаций по правильной компоновке выводов DC/DC-преобразователя требования к электромагнитному излучению и восприимчивости будут полностью выполнены. □



**SM-Complex**  
ELECTRONIC COMPONENTS

**Официальный дистрибьютор  
компании MDI в России – ООО «СМК»**  
191040, г. Санкт-Петербург,  
Лиговский пр., д. 50, корпус 6, оф. №33  
Тел.: (812) 649-9123, (968) 724-9016  
E-mail: info@sm-complex.ru  
www.sm-complex.ru