

# Проектирование источников питания: мини-руководство

Ф. Досталь<sup>1</sup>

УДК 621.314.1 | ВАК 05.27.01

Источник питания – ключевой элемент любой электронной системы, от характеристик которого зависят такие важные характеристики готового изделия, как энергоэффективность, срок службы, электромагнитная совместимость, габариты, стоимость. В статье представлен обзор возможностей для проектирования источников питания, рассмотрены основные и широко применяемые топологии изолированных и неизолированных источников питания, их преимущества и недостатки, а также вопросы, связанные с фильтрацией и электромагнитными помехами. Цель мини-руководства – дать общее представление о принципах проектирования современных источников питания.

## ВВЕДЕНИЕ

В большинстве электронных систем требуется преобразование напряжения источника питания в напряжение схемы, для питания которой он предназначен. Напряжение на батарее снижается по мере ее разрядки, а использование DC/DC-преобразователя гарантирует, что большая часть энергии, накопленной в аккумуляторе, будет использоваться для питания схемы. Также, от сети переменного тока невозможно запитать электронные схемы напрямую. Источники питания и преобразователи напряжения используются во всех электронных системах и за прошедшие годы они подвергались оптимизации для решения конкретных задач. Как правило, целями такой оптимизации являются минимальные габариты устройства, высокий КПД, электромагнитная совместимость и низкая стоимость решения.

## ПРОСТЕЙШИЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ: LDO-СТАБИЛИЗАТОР

Один из простейших типов источника питания – линейный регулятор или стабилизатор с малым падением напряжения (LDO). Линейный стабилизатор можно представить как регулируемый резистор, установленный между входом и выходом, таким образом выходное напряжение остается постоянным, вне зависимости от входного напряжения и тока нагрузки (рис. 1).

В течение многих лет схема типового силового преобразователя строилась на основе подключенного к сети 50/60-Гц трансформатора с определенным соотношением обмоток для генерирования нестабилизированного

выходного напряжения, которое на несколько вольт выше, чем напряжение питания, необходимое в системе. После трансформатора включен линейный стабилизатор для преобразования этого промежуточного напряжения в стабилизированное напряжение для питания схемы (рис. 2).

Недостаток схемы, показанной на рис. 2, заключается в том, что 50/60-Гц трансформатор имеет большие габариты, вес и стоимость. Кроме того, линейный стабилизатор рассеивает много тепла, снижая общую эффективность системы, а при высокой мощности системы отвод тепла становится затруднительным.

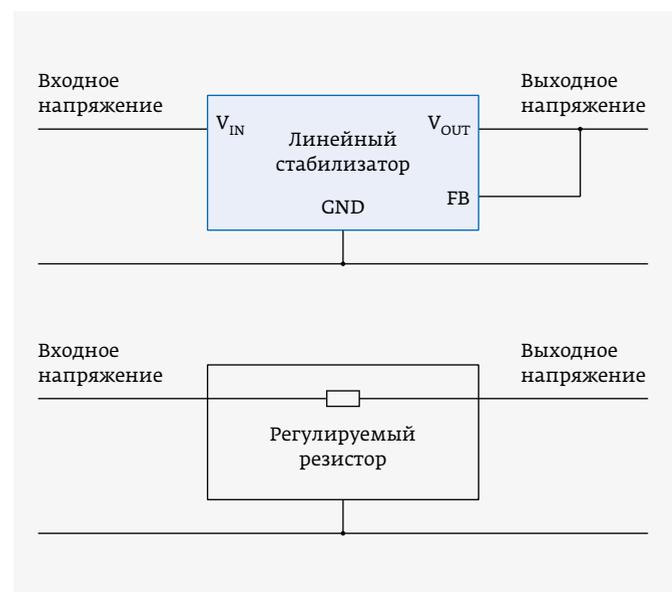
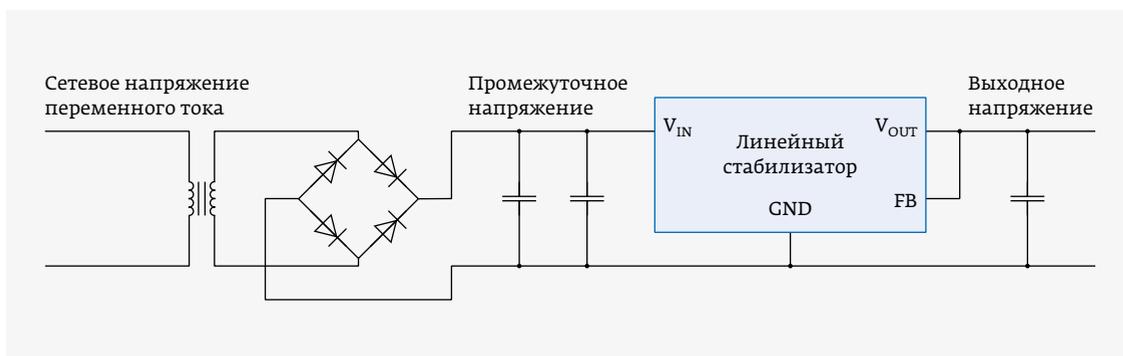


Рис. 1. Принцип работы линейного стабилизатора

<sup>1</sup> Компания Analog Devices, ведущий инженер технической поддержки, frederik.dostal@analog.com.



**Рис. 2.**  
Типовая  
схема силового  
преобразова-  
теля на осно-  
ве сетевого  
трансформато-  
ра и линейного  
стабилизатора

## ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Чтобы избежать недостатков схемы, показанной на рис. 2, были изобретены импульсные источники питания. На вход этих устройств подается не сетевое напряжение переменного тока с частотой 50 или 60 Гц, а постоянное напряжение (или выпрямленное переменное напряжение). Затем генерируется напряжение гораздо более высокой частоты для того, чтобы использовать трансформатор намного меньшего размера, а в неизолированных системах используется LC-фильтр для формирования постоянного напряжения на выходе. Преимущества такого решения – небольшие размеры и относительно невысокая стоимость. Генерируемое промежуточное переменное напряжение не обязательно должно быть синусоидальным. Простой прямоугольный сигнал с широтно-импульсной модуляцией будет также работать хорошо, его легко сформировать с помощью ШИМ-генератора и силового ключа.

Вплоть до 2000 года в качестве ключей наиболее часто использовали биполярные транзисторы. Они работают хорошо, но имеют относительно низкую скорость переключения. Кроме того, биполярные транзисторы не очень энергоэффективны, что ограничивает их частоту переключения 50 или 100 кГц. На сегодняшний день вместо биполярных транзисторов используются быстрые полевые МОП-транзисторы, имеющие меньшие потери переключения, что позволяет им работать на скоростях до 5 МГц. Такие высокие частоты переключения позволяют применять в силовом каскаде катушки индуктивности и конденсаторы небольшого размера.

Импульсные стабилизаторы обладают массой преимуществ. Как правило, они обеспечивают преобразование напряжения с высоким КПД, позволяют повышать и понижать напряжение, они довольно компактные и недорогие. Недостатки заключаются в том, что их не так просто спроектировать и оптимизировать, кроме того, они генерируют электромагнитные помехи из-за коммутационных и переходных процессов. Доступность микросхем импульсных стабилизаторов, а также инструментов проектирования источников питания, таких как LTpowerCAD и LTspice, значительно упростили сложный

процесс проектирования. С помощью таких инструментов проектирование схемы импульсного источника питания можно выполнить в полуавтоматическом режиме.

## РАЗВЯЗКА В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

При проектировании источника питания в первую очередь необходимо прояснить вопрос, требуется ли гальваническая развязка. Гальваническая развязка используется по нескольким причинам. Она делает цепи более безопасными, обеспечивает работу системы в плавающем режиме и предотвращает распространение зашумленных токов заземления через различные электронные устройства в одной схеме. Наиболее распространенные изолированные топологии – обратноточковой и прямоходовой преобразователи. Однако в более высокомоощных системах используются другие изолированные топологии, такие как двухтактная, полумостовая и мостовая.

Если гальваническая развязка не нужна, в большинстве случаев используется неизолированная топология. Изолированные топологии всегда содержат трансформатор, само устройство становится крупнее и дороже, а найти готовый трансформатор, отвечающий требованиям конкретного источника питания, довольно проблематично.

## НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫЕ ТОПОЛОГИИ, КОГДА РАЗВЯЗКА НЕ ТРЕБУЕТСЯ

Наиболее распространенной неизолированной топологией импульсного источника питания является понижающий преобразователь (buck converter, step-down converter). На его вход подается положительное напряжение, а на выходе генерируется выходное напряжение ниже входного. Это одна из трех основных топологий импульсных источников питания, для которых требуются только два ключа, катушка индуктивности и два конденсатора (рис. 3). Ключ верхнего плеча передает импульс тока со входа и генерирует напряжение узла, амплитуда которого меняется в диапазоне от входного напряжения до напряжения земли. LC-фильтр сглаживает импульсное напряжение на коммутационном узле и генерирует выходное напряжение постоянного тока. В зависимости

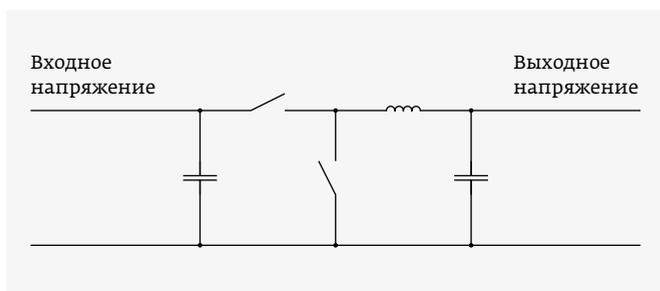


Рис. 3. Схема простого понижающего преобразователя

от скажности ШИМ-сигнала, управляющего ключом верхнего плеча, генерируются разные уровни выходного напряжения. Понижающий DC/DC-преобразователь относительно прост в проектировании, имеет высокий КПД и требует минимального количества компонентов.

Импульсы тока присутствуют на входе понижающего преобразователя, тогда как на выходе присутствует непрерывный ток катушки индуктивности. По этой причине понижающий стабилизатор характеризуется высоким уровнем шума на входе и низким на выходе. Это важно учитывать при проектировании систем с низким уровнем шума.

Помимо понижающей топологии, второй базовой топологией является повышающая топология (boost, step-up). В ней используются те же пять базовых силовых компонентов, что и в понижающем преобразователе, но в измененной конфигурации: катушка индуктивности включена в первичной цепи, а ключ верхнего плеча – на выходе (рис. 4). Повышающая топология используется для увеличения выходного напряжения относительно входа.

При выборе повышающего преобразователя важно учитывать, что в технической документации на эти устройства всегда указывают максимальный номинальный ток ключа, а не максимальный выходной ток. В понижающем преобразователе максимальный ток ключа напрямую связан с максимально достижимым выходным током, независимо от соотношения между входным и выходным напряжением. В повышающем стабилизаторе соотношение напряжений напрямую влияет на максимальный выходной ток с учетом фиксированного максимального тока ключа. При выборе подходящей ИС повышающего преобразователя необходимо знать не только необходимый выходной ток, но также входное и выходное напряжение разрабатываемой системы.

Повышающий преобразователь имеет очень низкий уровень шума на входе, поскольку катушка индуктивности, установленная на входе, предотвращает быстрые изменения тока. Однако на выходе такая топология довольно шумная. Через внешний ключ протекает только импульсный ток, что вызывает пульсации на выходе.

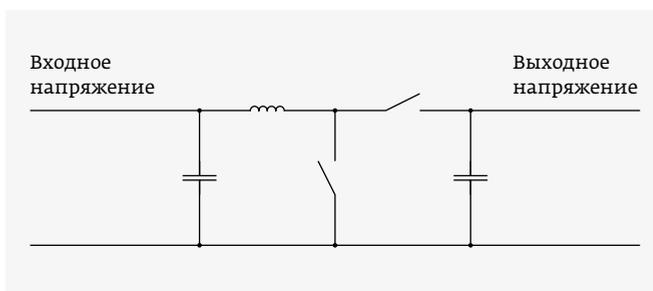


Рис. 4. Схема простого повышающего преобразователя

Третья базовая топология, содержащая всего пять базовых компонентов, – это инвертирующий повышающе-понижающий (buck-boost) преобразователь, то есть он преобразует положительное входное напряжение в отрицательное выходное напряжение. Входное напряжение может быть выше или ниже абсолютного значения инвертированного выходного напряжения. Например, выходное напряжение  $-12$  В может генерироваться из 5 или 24 В на входе. Это возможно без каких-либо специальных модификаций схемы.

В инвертирующей повышающе-понижающей топологии катушка индуктивности включена между коммутирующим узлом и землей (рис. 5). Как на входе, так и на выходе преобразователя присутствует импульсный ток, что делает эту топологию относительно шумной как на стороне входа, так и на стороне выхода. В приложениях с низким уровнем шума эта особенность компенсируется дополнительной фильтрацией на входе и выходе.

Весьма положительный аспект инвертирующей повышающе-понижающей топологии заключается в том, что для такого преобразователя можно использовать любую ИС понижающего импульсного стабилизатора. Это так же просто, как подсоединить выходное напряжение понижающей цепи к системной земле. Земляная шина ИС понижающего преобразователя становится регулируемым отрицательным напряжением. Это свойство

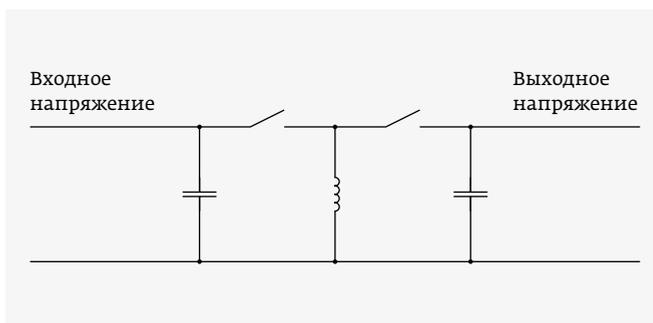


Рис. 5. Схема простого инвертирующего повышающе-понижающего преобразователя

обеспечивает очень широкий выбор ИС импульсных стабилизаторов на рынке.

## СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ТОПОЛОГИИ

Помимо трех основных неизолированных топологий импульсных источников питания, рассмотренных ранее, существует еще несколько доступных топологий. Однако все они требуют дополнительных силовых компонентов. Обычно это увеличивает их стоимость при более низкой эффективности преобразования энергии. Как правило, включение дополнительных компонентов в силовой тракт увеличивает потери, хотя есть определенные исключения. Некоторые из наиболее популярных топологий – SEPIC, Zeta, Ćuk и повышающе-понижающая с четырьмя ключами. В каждой из них реализованы функции, которых нет в трех основных топологиях. Ниже приведены особенности каждой из них.

### SEPIC

SEPIC-преобразователь генерирует положительное выходное напряжение из положительного входного напряжения, которое может быть выше или ниже выходного напряжения. Для проектирования SEPIC-источника питания могут быть использованы ИС повышающего стабилизатора. Недостаток этой топологии – необходимость во второй катушке индуктивности или одном связанном индукторе, а также SEPIC-конденсаторе.

### Zeta

Zeta-преобразователь подобен SEPIC, но способен генерировать как положительное, так и отрицательное выходное напряжение. Кроме того, он не имеет нулевой

точки в правой полуплоскости (RHPZ), что упрощает контур управления. Для такой топологии можно использовать ИС понижающего преобразователя.

### Ćuk

Ćuk-преобразователь инвертирует положительное входное напряжение в отрицательное выходное напряжение. В нем используются две катушки индуктивности: одна – на входной, другая – на выходной стороне, что делает устройство довольно малошумящим как на входе, так и на выходе. Недостатком является то, что существует не очень много ИС импульсных преобразователей, поддерживающих эту топологию, поскольку для контура управления требуется вывод отрицательной обратной связи по напряжению.

### Повышающе-понижающая топология с четырьмя ключами

Этот тип преобразователя стал довольно популярным в последние годы. Он генерирует положительное выходное напряжение из положительного входного напряжения. Входное напряжение может быть выше или ниже регулируемого выходного напряжения. Этот преобразователь может заменить схемы на основе SEPIC-топологии, поскольку обеспечивает более высокую эффективность преобразования и требует только одну катушку индуктивности.

## НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫЕ ИЗОЛИРОВАННЫЕ ТОПОЛОГИИ

Помимо неизолированной топологии, для некоторых приложений требуются силовые преобразователи с гальванической развязкой. Причины могут заключаться в соображениях безопасности, необходимости иметь плавающее заземление в разветвленных системах, в которых различные схемы соединены между собой, или предотвращения протекания земляных токов в чувствительных к помехам приложениях. Наиболее распространенные изолированные топологии – обратноходовые и прямоходовые преобразователи.

Обратноходовой преобразователь обычно используется для уровней мощности до 60 Вт. Схема работает таким образом, что во включенном состоянии энергия накапливается в трансформаторе (рис. б). Во время паузы эта энергия передается во вторичную обмотку и выход. Этот преобразователь прост в проектировании, но для него требуются относительно большие трансформаторы для накопления энергии, необходимой для корректной работы. Этот фактор ограничивает применение топологии для небольших уровней мощности.

Помимо обратноходового преобразователя, большой популярностью пользуется прямоходовой преобразователь. В нем трансформатор используется иначе,

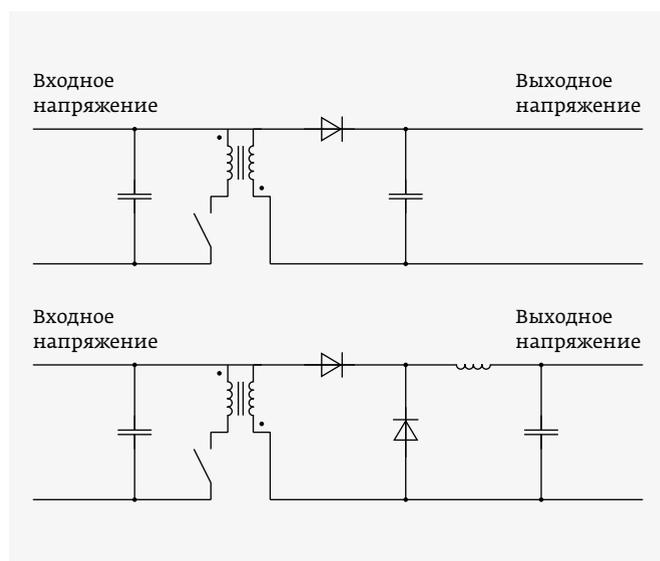


Рис. 6. Обратноходовой преобразователь (вверху) и прямоходовой преобразователь (внизу)

чем в обратноходовой топологии. Во включенном состоянии, пока есть ток через первичную обмотку, есть также ток через вторичную обмотку. Энергия не должна накапливаться в сердечнике трансформатора. После каждого цикла переключения мы должны убедиться, что намагничивание сердечника отсутствует, чтобы трансформатор не перешел в режим насыщения после нескольких циклов переключения. Размагничивание сердечника может быть достигнуто с помощью нескольких приемов. Один из популярных способов – использование активного ограничителя, состоящего из конденсатора и дополнительного ключа.

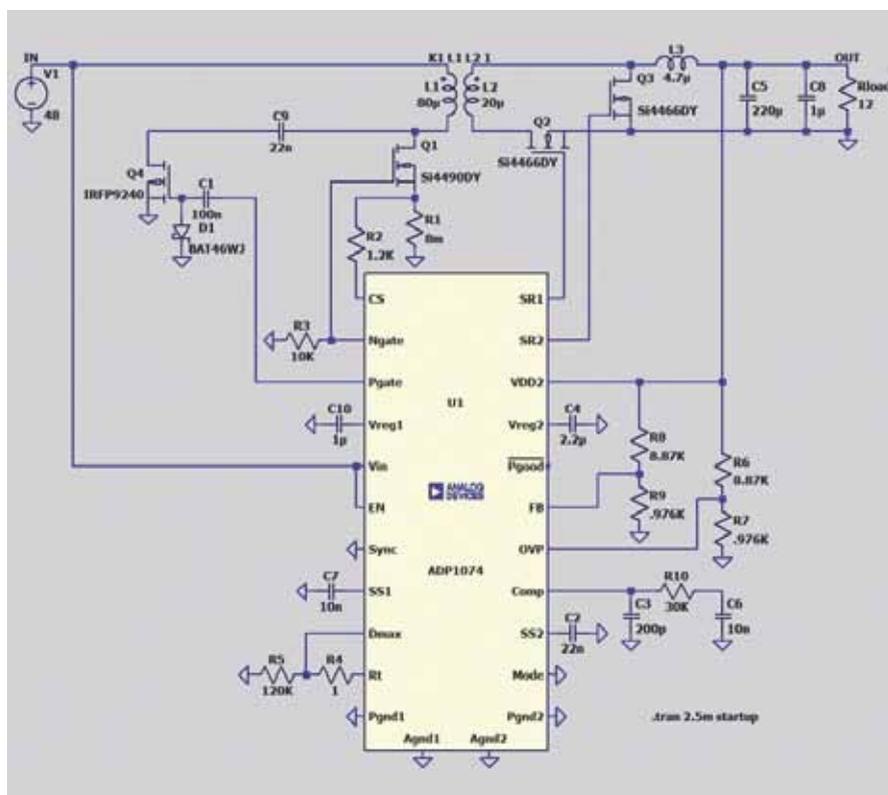
На рис. 7 показана созданная в среде моделирования LTspice схема прямоходового преобразователя с активной схемой ограничения намагничивания трансформатора на базе микросхемы ADP1074. Как показано на рис. 6, в прямоходовом преобразователе есть дополнительная катушка индуктивности в выходном тракте, в отличие от обратноходового преобразователя. Хотя это еще один дополнительный компонент, требующий пространства на плате и повышающий стоимость системы, он помогает снизить выходной шум по сравнению с обратноходовым преобразователем. Кроме того, габариты трансформатора для прямоходового преобразователя намного меньше при том же уровне мощности, чем для обратноходового преобразователя.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ ИЗОЛИРОВАННЫЕ ТОПОЛОГИИ

Помимо обратноходовой и прямоходовой топологий, существует много различных видов трансформаторных гальванически развязанных преобразователей. Ниже представлены сведения о наиболее распространенных топологиях.

### Двухтактная топология

Двухтактная топология аналогична прямоходовому преобразователю. Однако вместо одного ключа нижнего плеча для нее требуются два активных ключа нижнего плеча. Также нужна первичная обмотка трансформатора с центральным отводом. Преимущество двухтактного преобразователя заключается в том, что он работает с меньшим уровнем шума по сравнению с прямоходовым преобразователем,



**Рис. 7.** Созданная в LTspice схема прямоходового преобразователя с активной схемой ограничения на основе ADP1074 для формирования изолированного выходного напряжения

а также для него требуется трансформатор меньшего размера. Гистерезис кривой намагничивания трансформатора используется в двух квадрантах, а не в одном.

## Полумостовая и мостовая топологии

Эти две топологии обычно используются для систем с более высокой мощностью, от нескольких сотен Вт до нескольких кВт. Для них, помимо ключей нижнего плеча, требуются ключи верхнего плеча, но схема обеспечивает передачу очень высокой мощности при относительно небольших габаритах трансформаторов.

## ZVS

Этот термин, который означает «переключение при нулевом напряжении» (zero voltage switching), часто используют для изолированных преобразователей большой мощности. Еще одно название такой топологии – LLC-преобразователи (индуктор – индуктор – конденсатор). Эти архитектуры ориентированы на преобразование с очень высокой эффективностью. Они генерируют резонансный контур и переключают силовые ключи, когда напряжение или ток на ключах близки к нулю. Таким образом, потери на переключение сводятся к минимуму. Однако такие решения могут быть трудными в проектировании,

а частота переключения не фиксирована, что иногда приводит к проблемам с электромагнитными помехами.

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

Помимо линейных стабилизаторов и импульсных источников питания, существует третья группа преобразователей мощности – преобразователи на переключаемых конденсаторах. Их также называют преобразователями с накачкой заряда. В данных преобразователях для умножения или инвертирования напряжения используются ключи и конденсаторы. Преимущество таких схем заключается в том, что они не нуждаются в катушке индуктивности. Обычно такие преобразователи используются для низких уровней мощности, менее 5 Вт. Однако, недавно были проведены значительные усовершенствования данных конверторов, позволяющие создавать преобразователи на переключаемых конденсаторах гораздо большей мощности. На рис. 8 показана схема преобразователя мощностью 120 Вт на основе контроллера LTC7820, который обеспечивает преобразование 48 в 24 В с КПД = 98,5%.

## ЦИФРОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Все источники питания, обсуждаемые в статье, могут быть реализованы как аналоговые или цифровые блоки питания. Что такое цифровой источник питания на самом деле? Энергия всегда должна передаваться через аналоговый силовой каскад с ключами, катушками индуктивности, трансформаторами и конденсаторами. Цифровая часть представлена двумя функциональными блоками. Первый – это цифровой интерфейс, который позволяет электронной системе «общаться» с источником питания. Для оптимизации источника питания в различных условиях эксплуатации можно оперативно задавать различные параметры. Кроме того, источник питания может связываться с главным процессором и сигнализировать об аварии или неисправности. Например, система может отслеживать превышение заданного тока нагрузки или чрезмерную температуру источника питания.

Еще одно цифровое решение – замена аналогового контура управления на цифровой. Такой подход может работать вполне корректно,

но для большинства приложений оптимальным вариантом является обычная аналоговая обратная связь с элементами цифрового управления некоторыми параметрами, например оперативная регулировка коэффициента усиления усилителя ошибки или динамическая установка параметров компенсации контура для реализации стабильной и быстрой обратной связи. Примером устройства с чисто цифровым контуром управления является контроллер ADP1046A от Analog Devices. Еще одна микросхема, LTC3883, – один из примеров понижающего стабилизатора с цифровым интерфейсом и оптимизированным аналоговым контуром управления.

## ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Электромагнитные помехи всегда являются проблемой, на которую следует обращать внимание при разработке импульсных источников питания. Причина в том, что в импульсных источниках питания коммутируются токи большой величины в очень короткие промежутки времени. Чем быстрее происходит переключение, тем выше общая эффективность системы. Время перехода между включенным и выключенным состоянием определяет время в течение которого ключ находится в активном режиме и создает потери переключения. На рис. 9 показан сигнал на коммутирующем узле импульсного источника

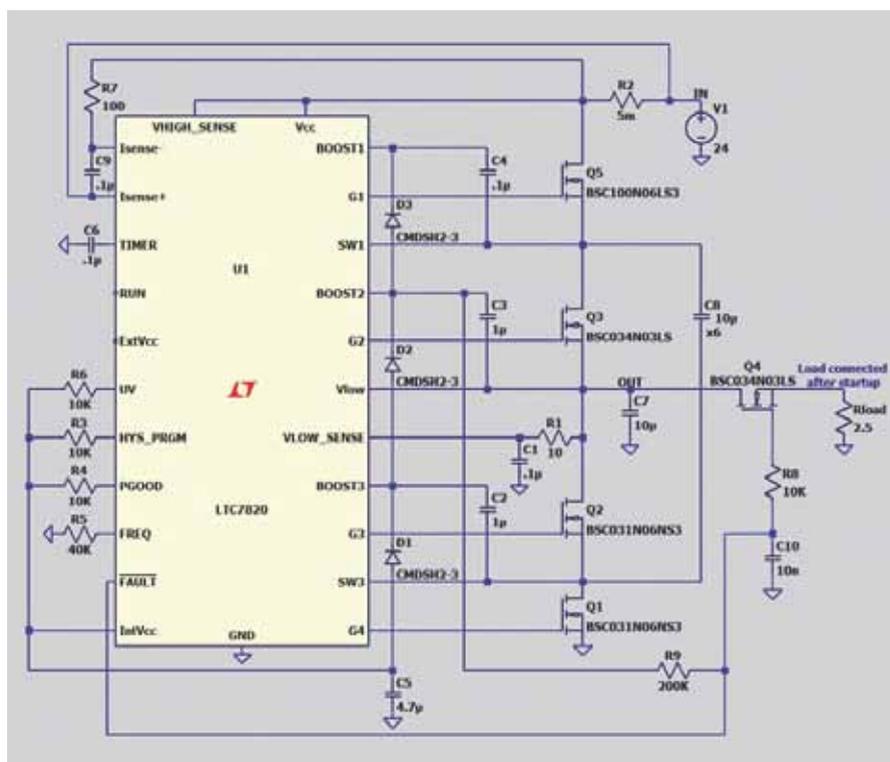
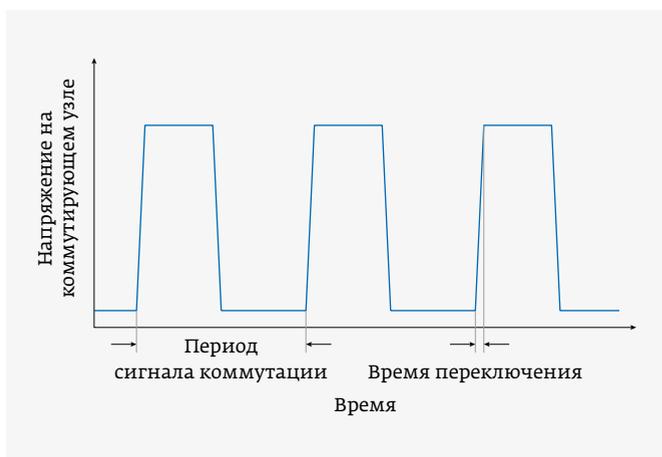


Рис. 8. Преобразователь с накачкой заряда высокой мощности на основе контроллера LTC7820



**Рис. 9.** Сигнал на коммутирующем узле импульсного источника питания

питания. Представим себе понижающий стабилизатор. Высокое напряжение определяется наличием тока, протекающего через ключ верхнего плеча, а низкое напряжение – отсутствием тока.

На рис. 9 мы видим, что импульсный источник питания генерирует шум не только из-за основной частоты переключения, но также из-за переходного процесса, шум от которого имеет намного большую частоту. Хотя частота переключения обычно составляет от 500 кГц до 3 МГц, время переключения может составлять несколько нс. Если время переключения составляет 1 нс, то мы увидим в спектре соответствующую частоту 1 ГГц. Обе эти частоты будут восприниматься как излучаемые и кондуктивные помехи. Другие паразитные частоты могут возникать из-за колебаний в контуре управления или взаимовлияния источника питания и фильтра.

Есть две причины, по которым следует уменьшать электромагнитные помехи. Первая причина – обеспечить защиту функциональных свойств электронной системы, питаемой конкретным источником питания. Например, 16-разрядный АЦП, который используется в сигнальном тракте системы, не должен воспринимать коммутационный шум, исходящий от источника питания. Вторая причина заключается в соблюдении определенных требований по электромагнитной совместимости, которые вводятся правительствами во всем мире для защиты работы различных электронных систем.

Электромагнитные помехи бывают двух видов: излучаемые и кондуктивные. Наиболее эффективные способы снижения излучаемых электромагнитных помех – оптимизация компоновки печатной платы и использование таких технологий, как Silent Switcher от Analog Devices. Конечно, одно из эффективных решений – поместить схему в экранированный корпус. Однако это может быть непрактично и в большинстве случаев очень дорого.

Кондуктивные электромагнитные помехи обычно ослабляют дополнительной фильтрацией. В следующем разделе обсудим этот вопрос.

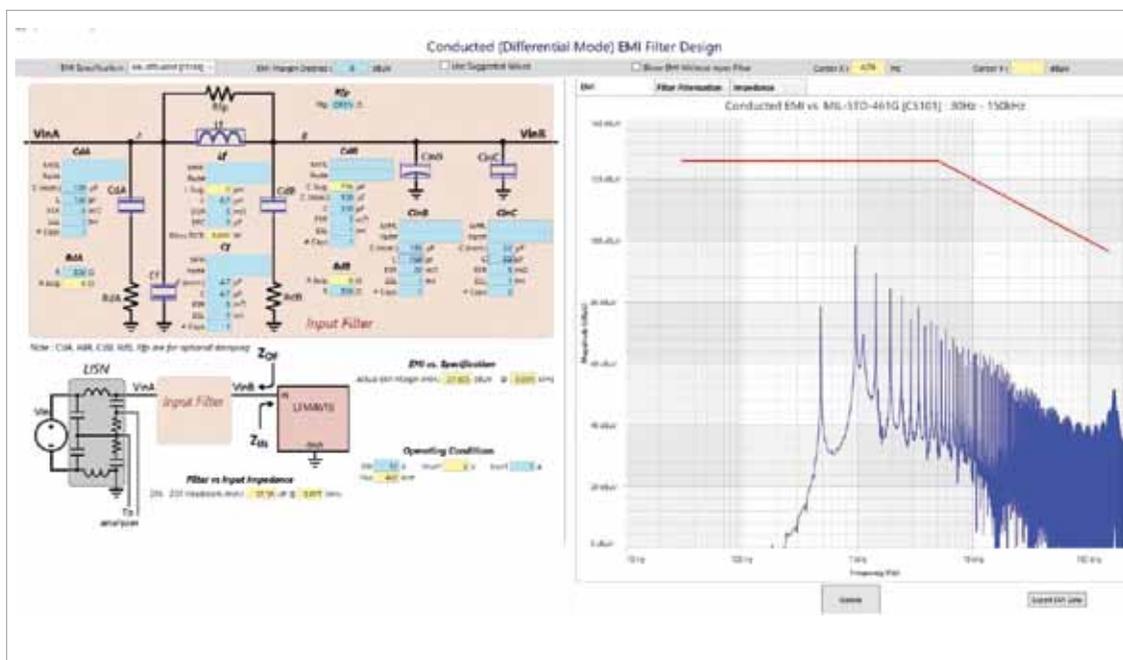
## ФИЛЬТРАЦИЯ

RC-фильтр – базовый вариант фильтра нижних частот. Однако в источнике питания используется не что иное, как LC-фильтр. Часто достаточно последовательного включения индуктивности, которая вместе с входными или выходными конденсаторами импульсного источника питания образует LC- или CLC-фильтр. Иногда в качестве фильтров используются только конденсаторы, но, учитывая паразитную индуктивность силовых кабелей и проводников, в результате также получаем LC-фильтр. В качестве индуктивности L может выступать катушка индуктивности с сердечником или ферритовая бусина. LC-фильтр на самом деле работает как фильтр нижних частот, так что питание постоянного тока может проходить через него, а высокочастотные помехи в значительной степени ослабляются. LC-фильтр имеет двойной полюс, поэтому мы получаем затухание высоких частот на уровне 40 дБ на декаду и относительно резкий спад.

Разработка фильтра – не самое сложное занятие, но моделирование фильтра может стать довольно трудоемким, так как необходимо учитывать паразитные эффекты и паразитные компоненты схемы. Многие разработчики, имеющие опыт проектирования фильтров, знают, какие фильтры работали корректно в предыдущих проектах, и могут в итеративном режиме оптимизировать фильтр для нового проекта.

При проектировании любого фильтра необходимо учитывать не только поведение схемы при слабом сигнале, например передаточную функцию фильтра на графике Бодде, но и эффекты сильного сигнала. В любом LC-фильтре мощность передается через катушку индуктивности и накапливается в ней. Если на нагрузке больше не требуется мощность вследствие переходного процесса, то катушка индуктивности должна отдать свою мощность куда-либо. Катушка заряжает конденсатор фильтра, если фильтр не рассчитан на такие жесткие условия, произойдет выброс напряжения на выходе и повреждение цепи.

Наконец, фильтры имеют определенный импеданс. Этот импеданс взаимодействует с импедансом силовых преобразователей, подключенных к фильтру. Их взаимодействие может привести к нестабильности и осцилляциям. Инструменты моделирования, такие как LTspice и LTpowerCAD от Analog Devices, могут оказать большую помощь в поиске таких проблем и в проектировании идеального фильтра. На рис. 10 показан графический пользовательский интерфейс инструмента разработки фильтров в среде проектирования LTpowerCAD. Проектирование фильтров с помощью этого инструмента – очень простая задача.



**Рис. 10.** Проектирование входного фильтра для понижающего стабилизатора с помощью LTpowerCAD

### ТЕХНОЛОГИЯ SILENT SWITCHER

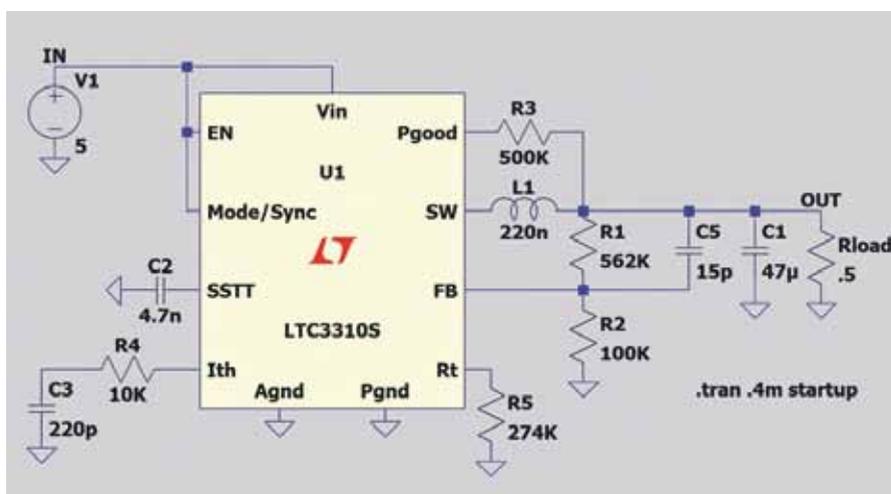
Излучаемые помехи трудно блокировать. Требуется специальное металлизированное экранирование, что может стоить очень дорого. На протяжении долгого времени инженеры искали пути снижения электромагнитных помех, создаваемых импульсными источниками питания. Несколько лет назад с развитием технологии Silent Switcher был сделан большой прорыв. За счет уменьшения паразитных индуктивностей в горячих контурах импульсного источника питания, а также благодаря разделению горячих контуров на два и установки их симметричным образом удалось большей частью взаимно скомпенсировать излучаемые помехи. Сегодня доступно множество

устройств Silent Switcher с гораздо меньшим уровнем помех, чем у обычных изделий. Снижение уровня излучаемых помех позволяет увеличить скорость переключения без серьезного ухудшения характеристик электромагнитной совместимости. Один из примеров такого инновационного подхода – понижающий стабилизатор LTC3310S (рис. 11), который может работать с частотой коммутации до 5 МГц, что позволяет создавать чрезвычайно компактные системы с недорогими внешними компонентами.

### УПРАВЛЕНИЕ ПИТАНИЕМ – НЕОБХОДИМОСТЬ, НО МОЖЕТ ДОСТАВЛЯТЬ УДОВОЛЬСТВИЕ

В статье были рассмотрены некоторые аспекты проектирования источников питания, в том числе различные топологии источников питания, их преимущества и недостатки. Для разработчиков источников питания эта информация может показаться довольно простой, однако как экспертам, так и новичкам будет полезно применять в процессе проектирования программные инструменты, такие как LTpowerCAD и LTspice. С помощью этих инструментов силовые преобразователи можно спроектировать и оптимизировать за очень короткое время.

По вопросам поставки продукции Analog Devices обращайтесь в компанию ЭЛТЕХ по электронной почте [analog@eltech.spb.ru](mailto:analog@eltech.spb.ru).



**Рис. 11.** Схема источника питания на основе понижающего стабилизатора LTC3310S Silent Switcher обеспечивает наименьший уровень излучаемых помех