

Рассмотрение лавинных процессов в транзисторах серии CoolMOS™

при их использовании в импульсных источниках электропитания. Часть 1

В статье описаны стандартные методы экспериментального исследования лавинного процесса и проблемы, связанные с ним, в импульсных источниках питания, а также характеристики безопасного режима при лавинных процессах в CoolMOS™ транзисторах. Показано, что хотя транзисторы серии CoolMOS™ и не велики по размеру кристалла по сравнению с обычными транзисторами MOSFET, но все же обеспечивают высокие показатели устойчивости при работе с лавинными процессами.

Перевод:
Наджия Хамзин

penta7@rambler.ru

Введение

CoolMOS™ транзисторы почти 20 лет являются первой, существенно новой технологией производства высоковольтных транзисторов MOSFET, обладают значительными преимуществами в работе с точки зрения потерь проводимости и потерь на переключение, а также обеспечивают выигрыш в габаритах. Однако при 5-кратном уменьшении размера кристалла для той же самой величины $R_{DS(on)}$ и его 3-кратном уменьшении при том же самом номинальном токе могут возникнуть сомнения в устойчивости работы этих улучшенных транзисторов по сравнению с их предшественниками. Усовершенствования в области полного теплового сопротивления (благодаря тонкой структуре кристалла) и высокая, свойственная данной МОП-ячейке прочность конструкции обеспечивают превосходную область безопасной работы (SOA), а также устойчивость при лавинном процессе. В данной статье исследуются методы контроля и оценки лавинного процесса при обычном одиночном импульсе. Обсуждаются прикладные проблемы в импульсных источниках электропитания, включая схемотехнические проблемы, присутствующие в источниках питания с периодически повторяющимся лавинным процессом. Особое внимание уделено производительности CoolMOS™ транзисторов, и как она соотносится с задачами практической реализации.

Номинальные параметры лавинного процесса при одиночном импульсе

Величина энергии лавинного процесса является мерой способности транзистора рассеивать энергию лавинного пробоя в переходе сток/исток. При этом транзистор действует практически как мощный кремниевый стабилитрон. В идеале, полная запасенная энергия лавинного процесса должна быть ограничена только размером и полным тепловым сопротивлением транзистора, но в реальной ситуации другие факторы также накладывают дополнительные ограничения на рабочий режим. Спецификации про-

мышленного стандарта лавинного процесса определяют условия проведения испытаний с максимальным током стока, обычно равным номинальному значению параметра тока стока «тестируемого компонента» (Device Under Test), которым заряжается испытательный дроссель. Размер данного дросселя определяется номинальным значением энергии из соотношения для мощности рассеяния в течение лавинного процесса.

Начальные условия предполагают значение температуры перехода, равное 25 °С.

Энергия, рассеянная в течение лавинного пробоя E_{AS} , может быть вычислена как:

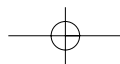
$$E_{AS} = \frac{1}{2} LI^2 \left(\frac{V_{AV}}{V_{AV} - V_{BUS}} \right), \quad (1)$$

где собственная индуктивность катушки, необходимая для достижения заданной энергии в импульсе тока I , определена как:

$$L = 2 \left(\frac{E_{AS}}{I^2} \times \frac{V_{AV} - V_{BUS}}{V_{AV}} \right). \quad (2)$$

Во время проведения испытаний с лавинным процессом катушка индуктивности (дроссель) заряжена до пикового значения тока путем установления тестируемого компонента во включенное состояние (формы сигнала на рис. 2), и далее тестируемый компонент переводится в выключенное состояние в момент достижения требуемого значения импульса тока. Восстановление сердечника в катушке индуктивности приводит в тестируемом компоненте к лавинному пробую, который инициализирует в катушке индуктивности разряд тока, спадающий, в конечном счете, к нулю.

С какими видами отказов можно столкнуться во время проведения данного вида испытаний? Согласно рис. 1, на котором приведено типичное поперечное сечение мощного транзистора с ДМОП-структурой, существует паразитная структура биполярного NPN-транзистора, коллектор которого — n -эпитак-



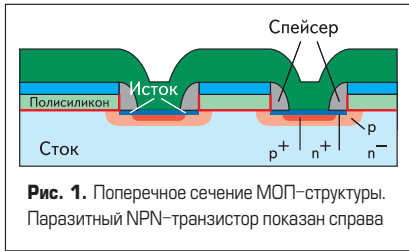
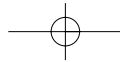


Рис. 1. Поперечное сечение МОП-структуры. Паразитный NPN-транзистор показан справа

сиальная дрейфовая область, с подложкой, сформированной из шейной области мощного MOSFET-транзистора, а эмиттер сформирован n^+ -слоем истока. При нормальных условиях переход база/эмиттер фактически закончен алюминиевой металлизацией истока MOSFET-транзистора. В MOSFET-транзисторе могут возникнуть проблемы, если есть недостатки по качеству изготовления области между базой и эмиттером, или если в структуре канала присутствует существенное сопротивление шейной области. В результате протекания электрического тока лавинного процесса может возникнуть разность потенциалов, достаточная для достижения уровня напряжения включения перехода база/эмиттер (Б/Э). При этом паразитный биполярный транзистор переходит в открытое состояние. Напряжение VCBO на данном паразитном транзисторе превышает номинальное значение напряжения пробоя MOSFET-транзистора. Он способен выдержать только половину этого напряжения, что приведет к выходу из области безопасной работы транзистора SOA.

Во время проведения испытаний при одиночных импульсах с лавинным процессом температура перехода быстро увеличивается. Так как температура перехода увеличивается, коэффициент усиления паразитного биполярного транзистора тоже увеличивается, а потенциал перехода V_{BE} уменьшается. Поэтому, хотя транзистор MOSFET вероятнее всего и не выйдет из строя на ранних этапах работы в условиях лавинного процесса, отказ может произойти позже, потому что критический ток пробоя достигается при возрастании температуры перехода. Данные рабочие характеристики определяют два параметра, обычно ограничивающие способность мощных транзисторов работать с лавинным процессом, а именно, максимальное значение критического тока и максимальная температура кристалла. Из-за взаимозависимости между этими двумя параметрами наиболее неблагоприятный режим

возникает при их комбинации, который обычно не возникает при проведении испытания с одиночным импульсом, приведенного в справочнике. Но с ним (режимом) можно столкнуться в реальных условиях работы.

Типичный случай возникновения лавинного процесса в рабочем устройстве изображен на рис. 4, где причиной возникновения кратковременного лавинного процесса чаще всего является индуктивность рассеяния трансформатора или паразитная индуктивность выводов. Ключевым моментом здесь является температура перехода, которая уже достаточно высока из-за штатного режима работы оборудования. В этом случае вполне возможно возникновение лавинного процесса с большим скачком тока и повышенной начальной температурой, зависящей от теплового расчета рассматриваемого оборудования. Это — потенциальный сценарий наихудшего случая, приводящий к отказам из-за критического значения тока.

Топологии импульсного источника питания и лавинный процесс

В импульсных источниках электропитания применяются разнообразные топологии преобразователей напряжения, использующих модуляцию длительности импульса для регулировки уровня выходного напряжения. В таблице 1 показаны основные, широко распространенные схемы. Обратите внимание на то, что хотя классическое описание этих схем содержит только широтно-импульсную мо-

дуляцию с жестким режимом переключения, существует много вариантов резонансных схем с такими же характеристиками (например, специализированные преобразователи типа Cuk и SEPIC), которые используют для переноса энергии множество реактивных компонентов, но имеют рабочие характеристики для переноса энергии множество реактивных компонентов, но имеют рабочие характеристики для переноса энергии, описанными далее.

В сравнительном анализе схем, приведенном ниже, фундаментальной точкой сравнения является следующее: включает ли топология преобразователя компоненты, такие как диод, которые в течение процесса выключения обеспечивают ограничение индуктивных токов, появляющихся в результате использования неразумных методов размещения компонентов на плате. Во всех типах мостовых преобразователей каждый ключ в плече имеет свой фиксирующий диод, который ограничивает индуктивные выбросы напряжения в момент отключения и помогает возвращать энергию в источник электропитания независимо от того, является ли источник энергии резонансных колебаний результатом циркуляции тока в индуктивных компонентах или же является следствием наличия индуктивности рассеяния трансформатора или паразитной индуктивности выводов обмотки формирующей катушки. Обратногодходная схема и прямоходовой преобразователь с единственным транзистором не имеют внутреннего полупроводникового компонента, который бы обеспечивал ограничение напряжения, если

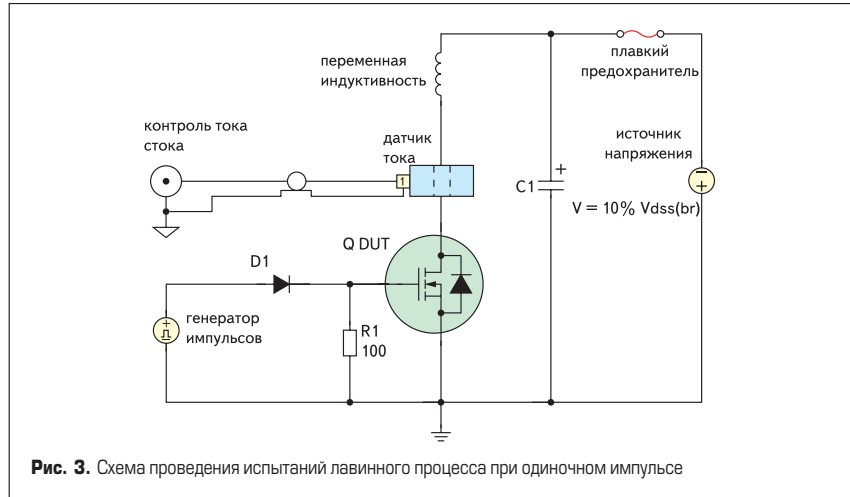


Рис. 3. Схема проведения испытаний лавинного процесса при одиночном импульсе

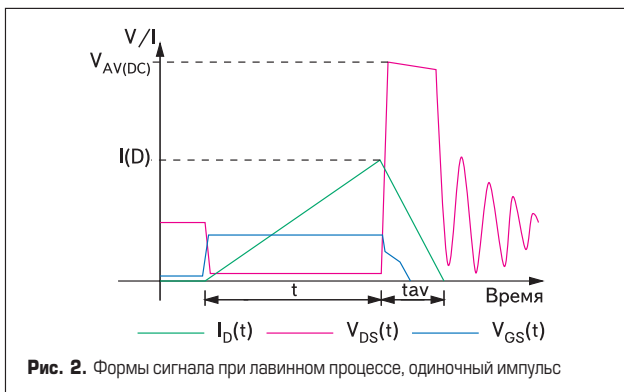


Рис. 2. Формы сигнала при лавинном процессе, одиночный импульс

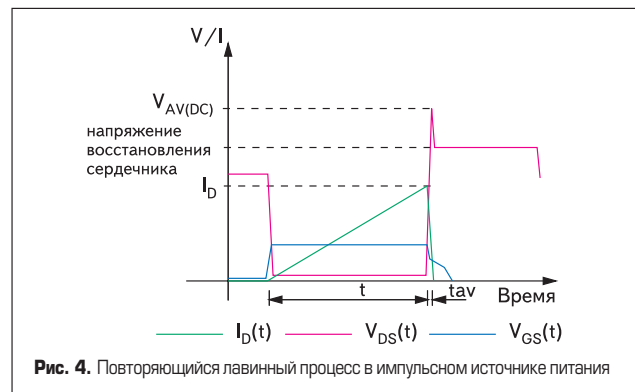


Рис. 4. Повторяющийся лавинный процесс в импульсном источнике питания

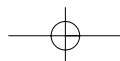


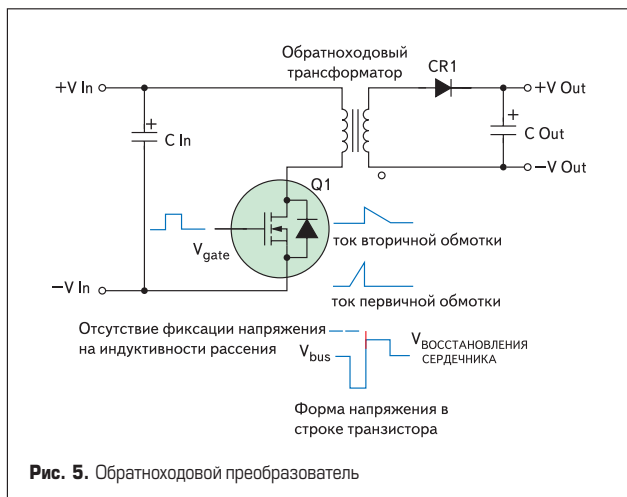
Таблица 1. Топологии импульсного источника питания и выбор транзистора

Топология	Присутствие лавинного процесса	Выбор CoolMOS™ транзистора по напряжению
Повышающий преобразователь с ККМ	Нет	600 В
Обратноходовой преобразователь	Да	600 В
Прямоходовой преобразователь (один ключ)	Да	800 В
Симметричный полумостовой преобразователь	Нет	600 В
Несимметричный полумостовой преобразователь	Нет	600 В
Пуш-пульный преобразователь	Да	800 В
Мостовой преобразователь	Нет	600 В
Мостовой резонансный преобразователь с фазовым сдвигом	Нет	600 В

не предусмотреть защитное демпфирующее устройство.

В таблице 1 также указывается, для каких топологий подходят транзисторы CoolMOS™ на 600 В, и какие из них требуют транзисторы на 800 В для работы в «международных» энергосистемах переменного тока (100VAC — 240VAC). Обратите внимание, что для режима в 200 кГц и выше, в случае больших транзисторов, рекомендуются CoolMOS™ транзисторы с низким внутренним сопротивлением затвора.

Хотя CoolMOS™ транзисторы обладают способностью работать при повторяющемся лавинном пробое (и это весьма безопасно для них благодаря высокой допустимой критической нагрузке по току даже при максимальной температуре перехода) действительно ли этот режим имеет смысл применять с экономической точки зрения или точки зрения конструирования? Какие проблемы могут возникнуть в результате работы в этом режиме, и какие аналитические методы может использовать разработчик, чтобы исследовать эти вопросы до того, как приступить к физической реализации проекта? Исследуем некоторые из этих вопросов и начнем, прежде всего, с обзора самой популярной топологии импульсного источника питания и их типовых рабочих режимов.



Обратноходовой преобразователь

Обратноходовой преобразователь — одна из самых простых и экономичных топологий импульсного источника электропитания, которая лучше всего подходит для преобразования низких уровней мощности, потому что треугольная форма сигнала тока приводит к высоким импульсным потерям в ключе на первичной обмотке трансформатора и к относительно большим значениям переменной составляющей тока и напряжения на выходе схемы преобразования. Трансформатор обратного хода разрабатывается как накопитель энергии и дроссель переноса энергии, используемый для запасаания энергии на первом этапе переключения. Запасенная энергия необходима для формирования импульса тока первичной обмотки трансформатора. Максимальное значение запасенной энергии не зависит от величины входного напряжения сети; вариации в напряжении сети просто изменяют рабочий цикл, требуемый для установления в трансформаторе обратного хода заданного уровня тока. Коэффициент трансформации трансформатора выбирается на основании допустимого значения наведенного на обратном ходе напряжения, а также желательного выходного напряжения. В течение второго этапа коммутации силовой ключ должен объединить напряжение питания $+V_{in}$ и наведенное напряжение восстановления сердечника, определяемое регулируемым выходным напряжением V_{out} и коэффициентом трансформации трансформатора.

Несвязанная индуктивность между первичной и вторичной обмотками (индуктивность рассеяния) также запасает энергию, и, так как эта энергия не ограничена выходной обмоткой, это вызовет лавинный процесс на первичной обмотке в случае отсутствия ограничения напряжения демпфирующей цепью RCD.

Передача энергии происходит за счет накопления энергии в дроссель/первичную обмотку трансформатора обратного хода при включенном мощном транзисторе. Когда транзистор выключается, восстановление сердечника катушки индуктивности приводит на стороне вторичной обмотки к прохождению тока через CR1 на выходной конденсатор. Индуктивность рассеяния первичной обмотки должна быть ограничена на стороне первичной обмотки.

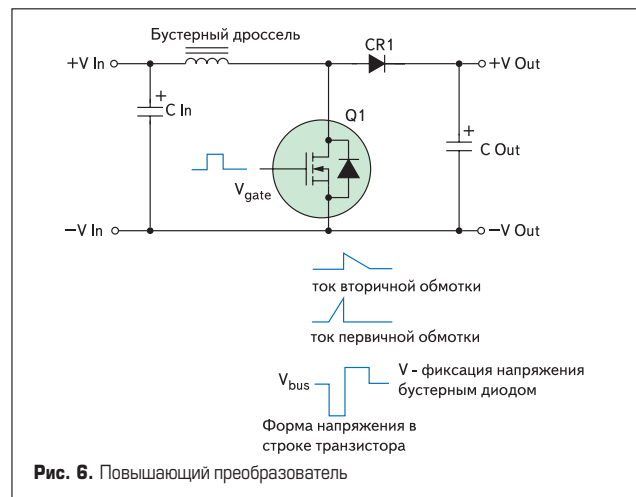
Повышающий преобразователь

Повышающий преобразователь, как показано на рис. 6, является импульсным преобразователем с неизолированным выходом. Он используется для повышения нерегулируемого входного напряжения на более высокий уровень и обычно применяется при проектировании схем с активной коррекцией коэффициента мощности. Бустерный дроссель — устройство накопления и передачи энергии, запасующий энергию во время открытого состояния коммутирующего транзистора Q1 и передающий ее на выходной конденсатор через CR1, когда переключающий транзистор выключен. Если в высокочастотном силовом контуре, сформированном Q1, CR1 емкость C_{out} и паразитная индуктивность выводов и монтажа будут малы, то CR1 ограничит напряжение стока Q1, и возникновение режима лавинного пробоя маловероятно. Если же в данном контуре паразитная индуктивность значительна, то при высоких значениях di/dt в момент выключения транзистора Q1 появляется возможность возникновения кратковременных лавинных процессов.

Перенос энергии происходит в результате заряда бустерного дросселя током при включенном состоянии транзистора. Когда транзистор выключается, восстановление сердечника в дросселе переносит энергию к выходному конденсатору через диод. Выходное напряжение выше, чем входное, потому что опорой напряжения на дросселе является входное напряжение.

Прямоходовой преобразователь с одиночным транзистором

Прямоходовой преобразователь с одиночным транзистором (рис. 7) предлагает несколько существенных преимуществ работы по сравнению с импульсными преобразователями обратного хода, но за счет использования дополнительных компонентов. Вместо того чтобы объединять запасание энергии и развязку/преобразование напряжения в одном индуктивном компоненте, используются отдельный трансформатор и фильтрующий дроссель, обеспечивающие более предпочтительную тра-



пециальную форму сигнала тока и сниженные пульсации выходного тока и напряжения, таким образом снижая шум и уменьшая воздействие на полупроводниковые компоненты схемы и конденсаторы. В обычном прямоходовом преобразователе с одиночным транзистором восстановление сердечника трансформатора происходит после цикла передачи мощности, и в данном случае требуется, чтобы напряжение пробоя в транзисторе, коммутирующем входную обмотку трансформатора, было как минимум вдвое больше входного напряжения. На практике связь между размагничивающей обмоткой с фиксацией уровня и силовой обмоткой первичной цепи может быть не идеальной, и индуктивность рассеяния на первичной обмотке может запасать энергию, вызывающую перенапряжения с лавинным процессом, если отсутствует ограничение демпфирующей цепью RCD, установленной параллельно мощному транзистору Q1. При максимальном протектированном напряжении шины 360 В требуется мощный транзистор Q1 с номинальным значением пробойного напряжения V_{DS} 800 В, если не предпринимаются специальные меры по изменению максимального значения рабочего цикла и установке блокирующей обмотки с целью понижения наведенного напряжения на Q1.

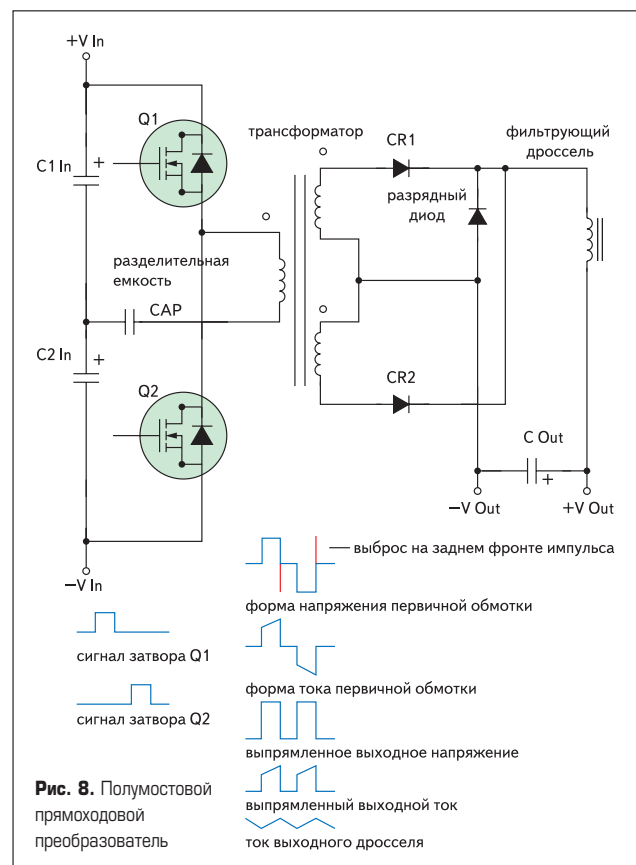
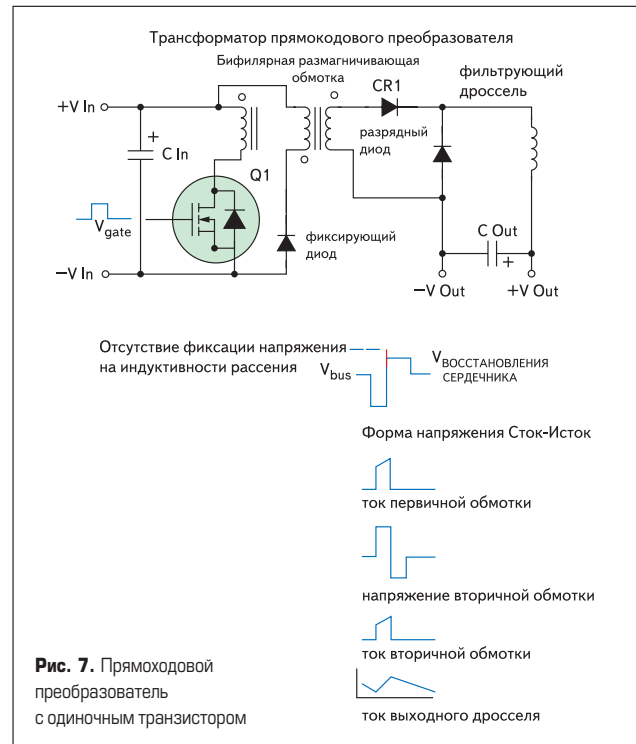
Передача энергии происходит через разделительный трансформатор: когда мощный транзистор Q1 включается, напряжение первичной обмотки наводится на выходную обмотку и детектируется в CR1, заряжая выходную катушку индуктивности. При выключении транзистора в первичной обмотке бифилярная ограничивающая обмотка проводит ток через фиксирующий диод, ограничивая напряжение стока в транзисторе Q1 на уровне двойного входного напряжения, и возвращает энергию из индуктивности намагничивания трансформатора в источник питания первичной обмотки (C_{In}). Вход дросселя на выходе схемы ограничен разрядным диодом на уровне $-0,7$ В относительно потенциала «корпуса». Выходной дроссель с выходным конденсатором запасают энергию и суммируют ее за полный рабочий цикл таким образом, что выходное напряжение становится пропорционально произведению протектированного выходного напряжения и рабочего цикла.

Если первичная обмотка не является бифилярной, но в то же время содержит ограничивающую обмотку, на первичной обмотке будет существенная величина нефиксированной индуктивности рассеяния. Эта индуктивность рассеяния и любая дополнительная паразитная индуктивность запасают энергию, которая не будет ограничена фиксирующей обмоткой и должна быть рассеяна при лавинном пробое на стороне первичной обмотки мощным транзистором (или дополнительными защитными устройствами демпфирующей цепи).

Полумостовой прямоходовой преобразователь

Данная конструкция преобразователя предлагает возможность уменьшения размера трансформатора почти в 2 раза по сравнению с прямоходовым преобразователем с одиночным транзистором, потому что данная пуш-пуш конфигурация с одним выходом использует индукцию трансформатора в обоих направлениях. Она не требует ограничивающей обмотки, но обязательно требует две выходные обмотки, чтобы использовать обе полярности выходного напряжения на трансформаторе. Путем замены маленькой емкости для обеспечения симметрии индукции резонансной цепью становится возможным легко перейти к режиму резонансного преобразования с очень низкими потерями на переключение, потому что включение и выключение напряжения происходит при очень низком значении тока. Внутренние паразитные диоды переключающих транзисторов Q1 и Q2 обеспечивают ограничение переходных процессов при выключении из-за индуктивности рассеяния. Таким образом, лавинный процесс в этой топологии обычно не возникает.

Из-за конденсаторов на стороне первичной обмотки и их влияния на напряжение истока, запускающее трансформатор и выходной дроссель, эта топология не может быть использована в режиме управления по току, что является существенным недостатком с точки зрения динамики контура управления, чувствительности, нестабильности выходного напряжения и тока, а также транзисторной защиты. По этой причине данная топология потеряла популярность для источников электропитания средних габаритов, хотя и существуют практические применения для последовательно соединенных источников освещения с использованием резонансных компонентов.



Передача энергии происходит через разделительный трансформатор двухтактного преобразователя. В начале первого этапа включается мощный транзистор Q1, напряжение первичной обмотки наводится на выходные обмотки и детектируется диодом CR1, заряжая выходной дроссель. Затем транзистор Q1 выключается, напряжение на первичной обмотке трансформатора снижается до нуля и энергия, запасенная в индуктивности рассеяния и индуктивности намагничива-

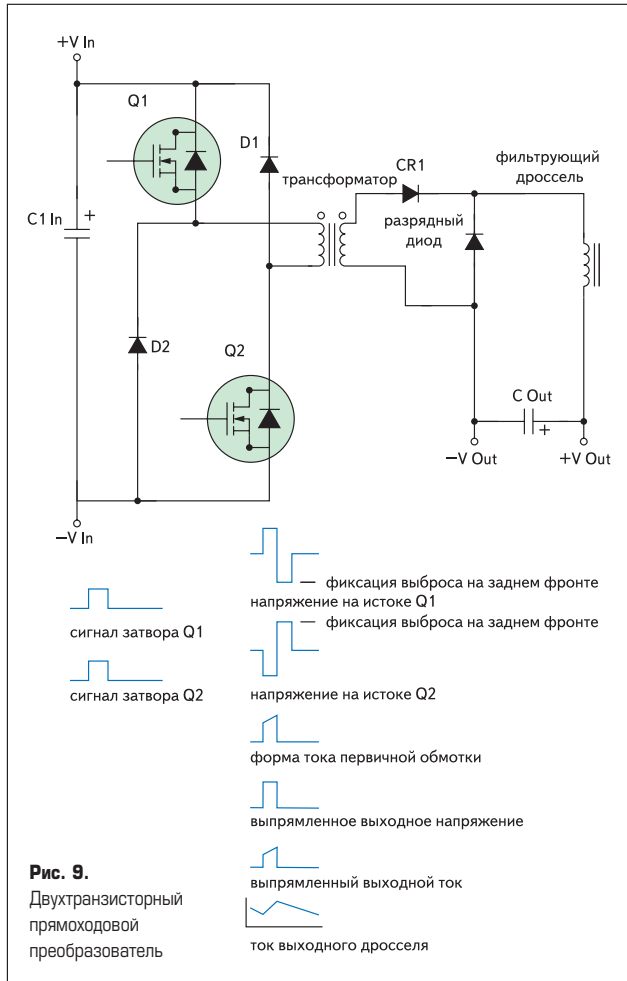


Рис. 9. Двухтранзисторный прямоходовый преобразователь

кладывается напряжение в противоположном направлении, что восстанавливает баланс индукции в сердечнике трансформатора. Выходная часть трансформатора состоит из двух обмоток и соединена с полувольновым выпрямителем, таким образом, последовательность импульсов чередующейся полярности детектируется в однополярную последовательность импульсов удвоенной частоты. Выходной дроссель и выходной конденсатор запасают энергию и суммируют ее за полный рабочий цикл таким образом, что выходное напряжение пропорционально произведению протектированного выходного напряжения и величины рабочего цикла.

Двухтранзисторный прямоходовый преобразователь

Эта топология импульсного источника питания (рис. 9) широко распространена из-за своей надежности, простоты и умеренно высокой производительности. Она подобна по своим рабочим характеристикам прямоходовому преобразователю с одиночным транзистором, но неотъемлемым качеством двухтранзисторной топологии является самоограничение тока намагничивания при восстановлении сердечника силового трансформатора, с исключением при этом возможности возникновения лавинного режима. К тому же, эта топология требует мощных транзисторов с блокирующим напряжением V_{DS} , равным только половине блокирующего напряжения для варианта с одиночным транзистором. Данное снижение требований к напряжению существенно уменьшает значение $R_{DS[on]}$ для кремниевого кристалла в случае обычных транзисторов MOSFET. Таким образом, два меньших транзистора обычно стоят в результате меньше, чем один большой транзистор с более низкими полными потерями.

Двухтранзисторный прямоходовый преобразователь совместим с режимом управления по току и обладает облегченными рабочими режимами для транзисторных ключей благодаря пониженным требованиям к рабочему напряжению. Такая топология дает хорошую производительность в источниках питания средней мощности. Главный недостаток по сравнению с полумостовым преобразователем — необходимость силового трансформатора большего размера, потому что колебание индукции может происходить только в одном направлении, но это также устраняет потребность каких-либо компенсационных методов индукции в управляющих цепях.

ния, вызывает выброс напряжения при выключении, величина которого ограничена внутренним паразитным диодом транзистора Q2. На втором этапе включается транзистор Q2, и к трансформатору при-

Передача энергии происходит через разделительный трансформатор, при включении мощных транзисторов Q1 и Q2, и напряжение

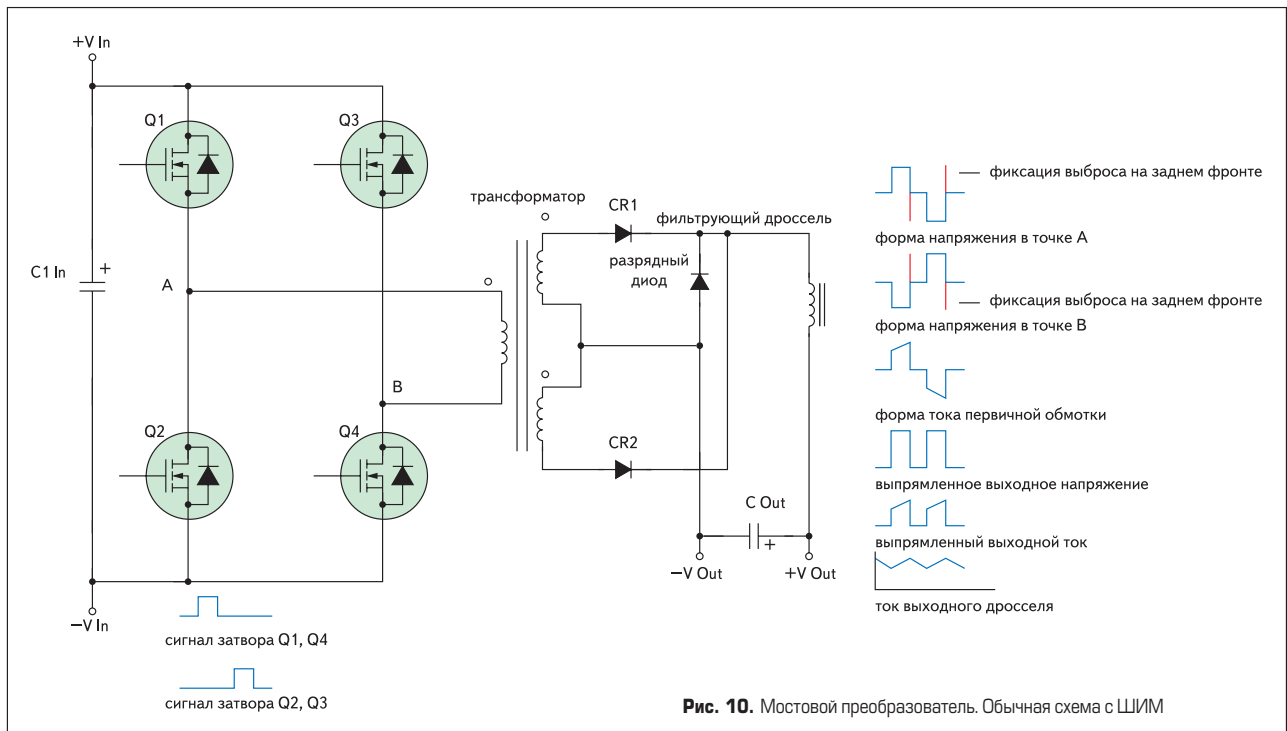
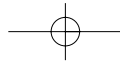


Рис. 10. Мостовой преобразователь. Обычная схема с ШИМ



первичной обмотки наводится на выходных обмотках и детектируется в CR1, заряжая выходной дроссель. Когда ключ первичной обмотки выключается, ток обратного хода в результате работы индуктивности рассеяния и индуктивности намагничивания протекает через фиксирующие диоды D1 и D2, ограничивая напряжение обратного хода первичной обмотки и возвращая энергию индуктивности намагничивания трансформатора в источник питания первичной обмотки ($C1_{in}$). Выходной дроссель и выходной конденсатор запасают энергию за полный рабочий цикл, так что выходное напряжение пропорционально произведению протектированного выходного напряжения и величины рабочего цикла.

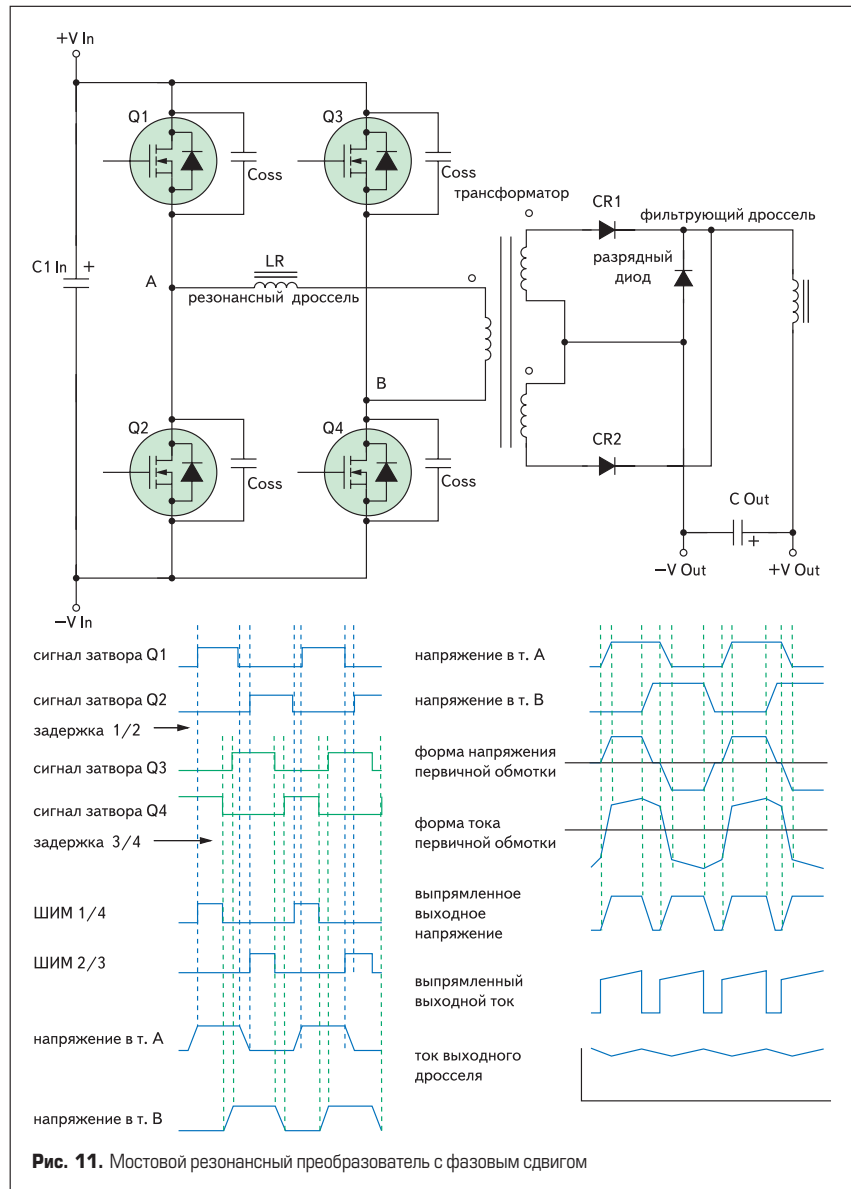
Мостовой преобразователь

Мостовой преобразователь («H» Bridge converter) назван так из-за четырех ветвей переключения (рис. 10) и их общего соединения к нагрузке или выходному трансформатору. Он объединяет некоторые из лучших качеств двухтранзисторных прямоходовых преобразователей и полумостового преобразователя, включая требование низкого напряжения входного питания для силовых ключей, меньший размер трансформатора вследствие использования обеих полярностей петли гистерезиса ВН, свойственное данной схеме ограничение тока намагничивания и переходных процессов из-за индуктивности рассеяния и совместимость с режимом управления по току. Он также обеспечивает неотъемлемую функцию симметрирования индукции силового трансформатора, обеспечивая равные вольт-секундные характеристики на первичной обмотке трансформатора в обоих направлениях.

Поскольку мостовая схема способна работать с эффективным рабочим циклом в дросселе более чем на 50%, устойчивая работа в режиме управления по току без возбуждения субгармонических колебаний требует коррекции усиления внутреннего контура управления, если не используется в качестве выходного выпрямителя удвоитель тока, который сокращает в два раза эффективный рабочий цикл на выходных дросселях.

Частота детектированной выходной последовательности импульсов вдвое больше частоты переключения транзисторов первичной обмотки, что также может позволить уменьшить размер сердечника дросселя для требуемого значения пульсаций напряжения на выходе.

Передача энергии в симметричной двухтактной схеме происходит через разделительный трансформатор. Сначала, когда мощные транзисторы Q1 и Q4 открыты, к первичной обмотке приложено полное напряжение шины, и напряжение первичной обмотки трансформируется на выходные обмотки и детектируется в CR1, заряжая выходной дроссель. Когда Q1 и Q4 выключаются, размах напряжения на первичной обмотке трансформатора снижается до нуля, и энергия, запасенная в индуктивности рассеяния и индуктивности намагничивания, вызывает выброс напряже-



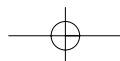
ния при отключении транзистора, который ограничен внутренними паразитными диодами транзисторов Q2 и Q3. На второй стадии включаются транзисторы Q2 и Q3, и трансформатор запускается в противоположном направлении, восстанавливая баланс индукции в сердечнике трансформатора. Выходная часть трансформатора выполнена из двух обмоток и соединена с полуволновым выпрямителем, таким образом, последовательность импульсов чередующейся полярности детектируется в однополярную последовательность импульсов удвоенной частоты. Выходной дроссель и выходной конденсатор запасают энергию и суммируют ее за полный рабочий цикл, так что выходное напряжение пропорционально произведению протектированного выходного напряжения и значения рабочего цикла.

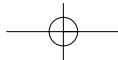
Мостовой резонансный преобразователь

Эта топология (рис. 11) подобна с точки зрения электрической схемы и физической реа-

лизации обычной топологии мостового преобразователя, но ее рабочая схема и схема управления имеют некоторые радикальные отличия и значительно более сложны. Как и в обычной мостовой схеме, преимуществами являются маленький сердечник, низкие требования к рабочему напряжению для мощных транзисторов, незначительная вероятность лавинного процесса и совместимость с режимом управления по току.

Сложность реализации топологии обусловлена схемой управления, необходимой для контроля достижения переключения при нулевом напряжении, что, по существу, и устраняет потери при переключении мощных транзисторов. Вместо того чтобы использовать простую противофазную схему ШИМ-модуляции обычного моста (где транзисторные ключи Q1 и Q4 управляются одинаковыми управляющими сигналами (рис. 10) и ключи Q2 и Q3 также управляются своими одинаковыми сигналами) можно перейти к резонансной схеме. В случае резонансного преобразователя используются уникальные управляющие





сигналы для каждого переключающего транзистора, так что каждое плечо моста переключается прямоугольными импульсами приблизительно квадратной формы в точках «А» и «В» (рис. 11), и смещение по фазе между прямоугольными управляющими сигналами обеспечивает эффективный ШИМ-сигнал на первичной обмотке трансформатора. Ключевое преимущество данной схемы заключается в том, что переключение напряжения сток/исток каждого транзистора происходит за счет энергии, запасенной в индуктивности рассеяния или, при необходимости, в резонансной катушке индуктивности первичной обмотки, и каждый транзистор включается при практически нулевом напряжении сток/исток в широком диапазоне изменения тока нагрузки. Это требует точной синхронизации управляющих сигналов и регулируемых времен задержки между выключением одного транзистора в мосте и включением другого. Выгода заключается в устранении половины и более рабочих потерь в мощных транзисторах MOSFET и возможности увеличения рабочей частоты источника электропитания, с сопутствующим уменьшением размера и веса силового трансформатора и дросселей без увеличения потерь на переключение.

Лавинный процесс маловероятен в данной схеме, но резонансные переключения требуют ограничение колебаний напряжения на внутренних паразитных диодах,

и в данном типе преобразователя были обнаружены условия [2], при которых происходят отказы некоторых транзисторов MOSFET при определенных значениях di/dt . Параметры, которые оптимизируют критически допустимую нагрузку по току при лавинном процессе, также способствуют достижению высокого значения di/dt при переключении тока в транзисторах CoolMOS™ и их пригодности для использования в данных преобразователях.

Перенос энергии происходит через разделительный трансформатор симметричной двухтактной схемы, как и в обычном мостовом преобразователе. Ключевым моментом режима без коммутационных потерь является использование импульсной схемы со сдвигом фаз с применением прямоугольных импульсов на обоих концах первичной обмотки трансформатора. При этом также контролируется рабочий цикл на первичной обмотке трансформатора путем изменения эффективного значения фазы между двумя прямоугольными импульсами. Для достижения режима, близкого к коммутации без потерь, переключение напряжения сток/исток происходит при выключении одного из транзисторов в плече, и далее индуктивность намагничивания или резонансный дроссель перезаряжает напряжение сток/исток на противоположный потенциал, после чего включается другой транзистор. Здесь требуются задержки времени при переключении, ука-

занные как «задержка 1/2» и «задержка 3/4», которые показывают в несколько преувеличенном виде для наглядности требуемые величины задержек во времени. В некоторых случаях эти задержки делаются переменными и являются функцией тока нагрузки с целью оптимизации резонансного переключения напряжения сток/исток как для незначительной, так и для большой нагрузки.

Продолжение следует

Литература

1. Introduction to Avalanche Considerations for CoolMOS™ in SMPS Applications. Application Note, V1.0, Apr. 2001. Infineon Technologies AG.
2. Saro L., Dierberger K., Redl R. High-Voltage MOSFET Behavior in Soft-Switching Converters: Analysis and Reliability Improvements. APEC. 1998.
3. Lenz M., Striedl G., Frohler U. Special Subject Book: SMD Packages Thermal Resistance, Theory and Practice. Infineon Technologies. Jan. 2000
4. Kraus R., Tuerkes P., Sigg J. Physics-Based SPICE Models of Power Semiconductors. Infineon Technologies Application Note AN-PSM3e.
5. Hancock J. M. Hierarchical Cross-Platform Physics Based MOSFET Model. PCIM Conference Proceedings. November 1998.

