

Меньше, умнее и мощнее:

использование 800-V транзисторов семейства CoolMOS P7 для разработки обратноходовых ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Меньшие по габаритам, более умные и более мощные — именно такие тенденции наблюдаются на современном рынке для маломощных приложений с импульсным питанием (Switched-Mode Power Supply, SMPS). «Меньше» — чтобы такой источник питания имел более компактный форм-фактор и, следовательно, более высокую удельную плотность мощности. «Умнее» — для организации интеллектуального взаимодействия между системами и между системой и человеком, что необходимо для удобства для пользователей. «Мощнее» подразумевает то, что система требует, чтобы импульсные блоки питания, например используемые в прогрессивной архитектуре распределенного питания, могли дать больше энергии для питания сразу множеству самых разнообразных устройств, что в итоге позволяет сэкономить затраты для их изготовителей и конечных потребителей.

**Стефан Преимель
(Stefan Preimel)**

**Перевод и дополнения:
Владимир Рентюк**

Выгоды от этих рыночных тенденций очевидны. Меньший размер приводит к экономии пространства и делает конечные системы все более и более портативными. Энергосбережение, благодаря достижению более высокой эффективности и более разумного дизайна, помогает потребителям экономить деньги на счетах за электроэнергию. Также оно позволяет поддерживать более «экологичный» мир: так как в системе требуется меньше источников питания, следовательно, меньше загрязнений окружающей среды при их производстве и меньше отходов, когда дело доходит до их утилизации вследствие выработки ресурса и морального старения.

Рассматриваемые тенденции при проектировании импульсных источников питания (ИИП) ставят перед разработчиками новые задачи. Из-за растущих выходных мощностей и меньших форм-факторов, приводящих к более высокой удельной плотности мощности, инженеры должны тратить больше усилий на повышение эффективности (КПД) и управление в части отвода тепла от системы питания. В то же время требование по более длительному сроку службы заставляет специалистов для повышения надежности оптимизировать конструкцию ИИП уже на системном уровне.

Адаптеры и зарядные устройства, светодиодное освещение, блоки питания аудиоаппаратуры, вспомогательные блоки питания и блоки питания промышленного оборудования являются типичными маломощными представителями рынками ИИП, где обратноходовая топология (flyback) является наиболее распространенной. Фундаментальную роль в этой топологии играют высоковольтные МОП-

транзисторы (в технической литературе известные как High-Voltage Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, HV MOSFET), а это значит, что поиск подходящего для этой цели МОП-транзистора имеет главенствующее значение для решения задач, связанных с текущими требованиями рынка ИИП.

Обратноходовой DC/DC-преобразователь

Особенность flyback-преобразователя заключается в том, что он не передает непосредственно входное напряжение во вторичную цепь, то есть на прямом ходу. Он преобразует входное напряжение в выходное путем накопления в течение времени включения ключа и сохранения энергии в сердечнике трансформатора, а передача его во вторичную цепь происходит уже во время выключения ключа. То есть передача энергии происходит во время обратного хода — отсюда и название. На рис. 1 показаны принцип работы и часть практической схемы такого преобразователя.

Когда ключ S_1 замкнут, то через первичную обмотку трансформатора T_1 , имеющую индуктивность L_{prim} с нарастанием со скоростью V_{IN}/L_{prim} течет ток I_{S1} . В течение этого времени через вторичную обмотку трансформатора, имеющую индуктивность L_S , ток в нагрузку не поступает. В этот период времени ток нагрузки на вторичной стороне обеспечивается энергией, предварительно накопленной в конденсаторе C_1 .

Когда ключ S_1 размыкается, то резкий спад магнитного поля в трансформаторе вызывает изменение по-

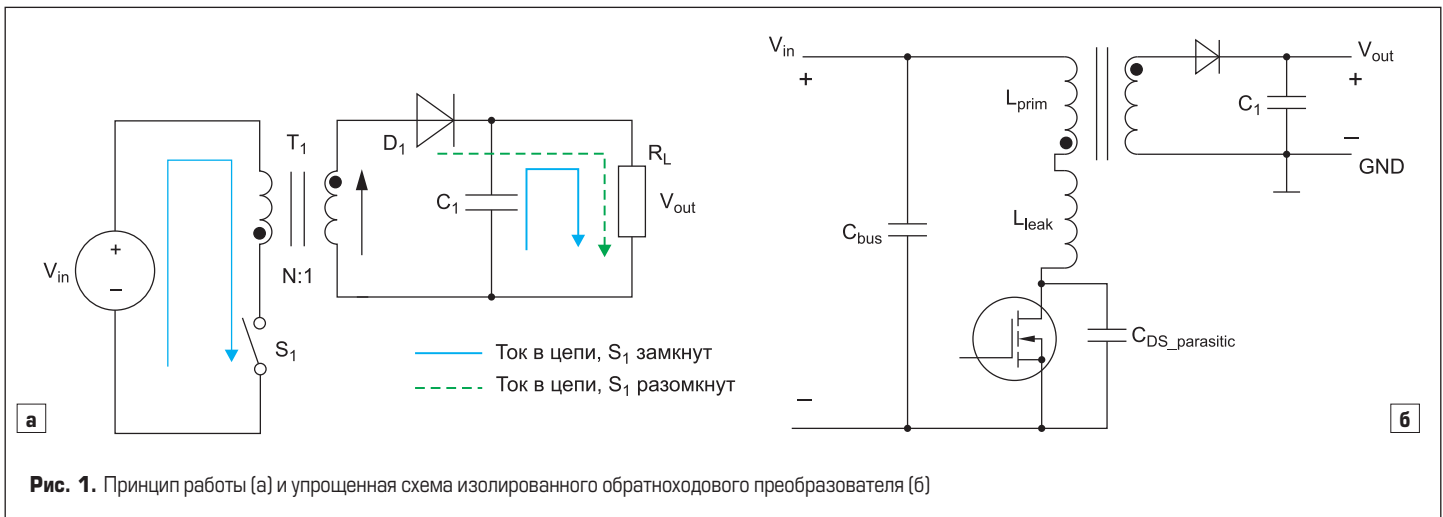


Рис. 1. Принцип работы (а) и упрощенная схема изолированного обратного преобразователя (б)

лярности напряжения и, соответственно, тока первичной и вторичной обмоток. Энергия, запасенная в первичной обмотке трансформатора, теперь передается на вторичную обмотку. Напряжение на вторичной обмотке резко возрастает, и импульс тока, падая со скоростью V_{OUT}/I_S , поступает в нагрузку и заряжает конденсатор C_1 . Диод D_1 здесь используется в качестве пикового выпрямителя. Такой принцип работы приводит к тому, что на стоке ключа (в рассматриваемом случае это МОП-транзистор) мы имеем форму напряжения, которая приведена на рис. 2.

Как можно видеть, при допустимом рабочем напряжении от питающей сети 230 В переменного тока на стоке транзистора мы имеем максимальное напряжение не 374 В, полученное в результате выпрямления максимального входного 268 В, и даже не 504 В, которое является суммой входного и выходного напряжений, а все 650 В, а то и более, что связано с особенностями функционирования такого преобразователя. За ограничение этого напряжения отвечают специальные ограничительные цепи. Их описание, детальная топология и методы стабилизации выходного напряжения приведены в соответствующей технической литературе. Мы же ограничимся вопросами касающимися МОП-транзистора, который, для обеспечения надежности и создания приемлемого технологического запаса по напряжению сток-исток V_{DS} , как мы видим, необходимо выбирать с рабочим напряжением не менее 700 В, а лучше с $V_{DS} = 800$ В.

Дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при выборе высоковольтных МОП-транзисторов обратных ИИП

Определение «правильный» МОП-транзистор применительно к обратному преобразователю требует ее должного понимания на системном уровне, а также того, как используется такой транзистор в данном приложении. Современные обратные ИИП разрабатываются с использованием ключей в виде высоковольтных МОП-транзисторов и рабочей частотой преобразования в диапазоне 40–100 кГц. Последнее связано с необхо-

димостью уменьшить до допустимого уровня электромагнитных помех (ЭМП) и выполнить жесткие требования стандартов в части электромагнитной совместимости (ЭМС). Наличие ЭМП неизбежно и связано с особенностью функционирования преобразователя (см. рис. 2). Однако, с другой стороны, используются решения и с преобразованием на более высоких частотах, что вызвано стремлением уменьшить физические размеры. Это связано с тем, что более высокая рабочая частота позволяет использовать меньшие по номиналу и габаритам индуктивные компоненты (трансформаторы, дроссели и катушки индуктивности фильтров). Кроме того, увеличение КПД при малой нагрузке требует меньших потерь на переключение (коммутационных потерь), а высокая эффективность при полной нагрузке требует меньших потерь проводимости. Все сказанное выше взаимосвязано и часто требует определенных компромиссов.

Для уменьшения коммутационных потерь наиболее важными параметрами МОП-транзисторов являются заряд затвора Q_g

и энергия, накопленная при включении E_{oss} . Параметр Q_g тесно связан с решением управляющего драйвера МОП-транзисторов, меньшее значение заряда затвора приводит к упрощению непосредственно самого драйвера и к снижению потерь при управлении. E_{oss} — это энергия, накопленная в выходной емкости МОП-транзистором, которую необходимо учитывать при его использовании и управлении, что тоже связано с управляющим драйвером и динамическими потерями. Кроме того, важным параметром является и сопротивление канала транзистора во включенном состоянии $R_{DS(on)}$, которое определяет потери на проводимость и играет критическую роль в условиях полной нагрузки преобразователя.

Еще одна проблема — это устойчивость МОП-транзистора к воздействию статического электричества (в технической литературе — Electro Static Discharge, ESD), и это одна из областей, где выбору МОП-транзистора должно уделить самое пристальное внимание. Устойчивость одного из ключевых элементов ИИП к воздействию статического электричества

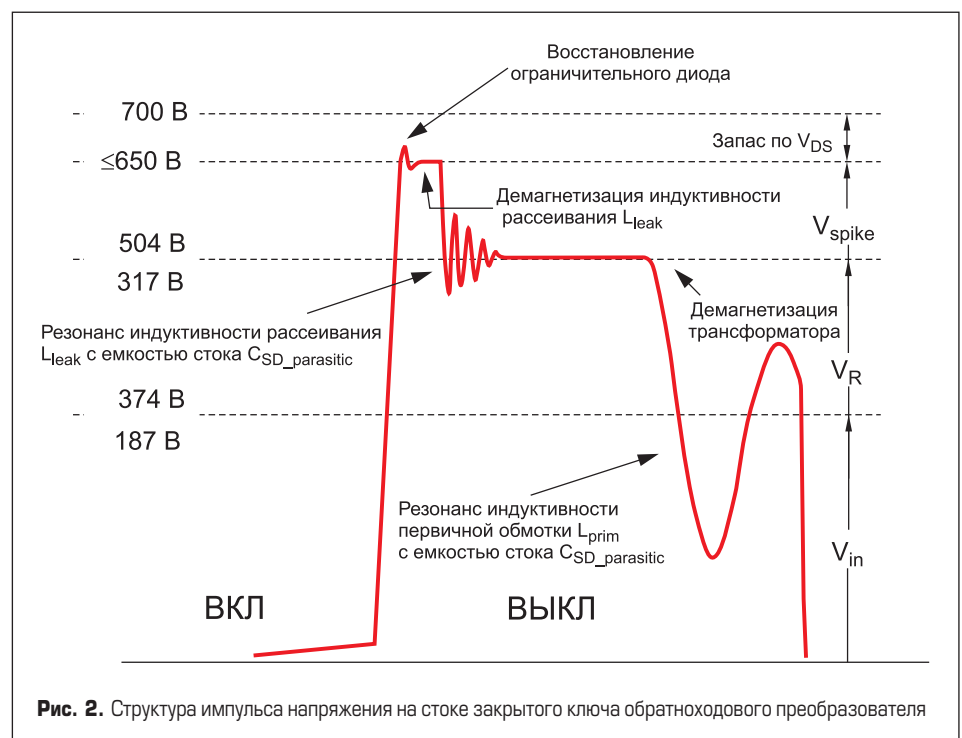


Рис. 2. Структура импульса напряжения на стоке закрытого ключа обратного преобразователя

Таблица 1. Сравнение основных параметров транзисторов с $R_{DS(on)}$ на уровне 450 мОм в корпусах TO-220 FullPAK от разных поставщиков (данные взяты из соответствующих спецификаций)

Параметр	CoolMOS P7	Конкурен­т­ный прибор 1	Конкурен­т­ный прибор 2	CoolMOS C3
TO220FP $R_{DS(on)}$, Ом	0,45	0,45	0,40	0,45
Q_g , нКл	24	29	43	64
E_{oss} , мкДж	2,7	6,3	4,9	6,1
C_{iss} , пФ	770	860	1813	1583
C_{oss} , пФ	14	35	25	32

помогает повысить выход годной продукции и уменьшить потери от рекламационного возврата изделий. Так что для обеспечения скорейшего выхода на рынок инженерами-разработчиками должны быть учтены надежность и легкость управления, а транзистор должен быть выбран с параметрами, максимально отвечающими требованиям проекта. Здесь, в части организации управления, также необходимо учитывать еще такой параметр, как пороговое напряжение включения МОП-транзистора — $V_{GS(th)}$. Для этого должны быть рассмотрены следующие моменты: низкое значение $V_{GS(th)}$ упрощает управление МОП-транзистором, а меньшее отклонение $V_{GS(th)}$ от номинального значения дает разработчикам больше свободы при проектировании ИИП. (Необходимо также учитывать и то, что очень низкие значения $V_{GS(th)}$ ухудшают помехоустойчивость ИИП, поэтому здесь требуется взвешенный подход и поиск разумных компромиссов. Транзисторы семейства продуктов CoolMOSTM P7 имеют лучшее в своем классе $V_{GS(th)} = 3$ В и самое низкое отклонение порогового напряжения $\pm 0,5$ В от номиналь-

ного значения, что вполне достаточно для выполнения требований по помехоустойчивости применительно к ИИП обратногоходовой топологии. — Прим. перев.)

800 В CoolMOS P7 — новый эталон эффективности и тепловых характеристик

Последняя версия 800-В транзисторов семейства продуктов CoolMOS P7 от компании Infineon устанавливает новый стандарт транзисторов технологии Super-Junction с рабочими напряжениями «сток-исток» 800 В и сочетает в себе лучшие в своем классе характеристики и простоту использования современного технического уровня. (Основная идея технологии Super-Junction, называемой иногда «суперпереход», заключается в том, что исток разбит на отдельные области, связанные металлическими переходниками, и обеспечивает повышение эффективности работы устройств, в особенности при малых токах нагрузки. — Прим. перев.)

В таблице 1 представлен обзор основных параметров для ряда конкурентных продук-

тов с максимальным значением $R_{DS(on)}$ от 400 до 450 мОм в корпусах TO-220 FullPAK. Транзисторы семейства продуктов CoolMOS P7 были полностью оптимизированы для обеспечения максимальной производительности в своем классе по сравнению с ближайшими конкурентами: характеристики семейства продуктов CoolMOS P7 в части заряда затвора Q_g и входной емкости C_{iss} улучшены на 17% и 10% соответственно. Что же касается таких параметров, как энергия включения E_{oss} и проходная емкость C_{oss} , то здесь мы видим резкое улучшение на 43–45%. Такая оптимизация динамических и статических характеристик транзисторов семейства CoolMOS P7 значительно повышает их КПД и уменьшает потери, связанные с тепловыделением, как наглядно показано на примере измерения качественных характеристик обратногоходового светодиодного драйвера мощностью 80 Вт (рис. 3).

Как можно видеть на рис. 3, даже простая замена транзисторов из семейства продуктов CoolMOS C3 на транзисторы семейства CoolMOS P7 приводит к повышению КПД на 0,5% при малой нагрузке и повышению эффективности на 0,3% при полной нагрузке (см. рис. 1а). Такое улучшение КПД при малой нагрузке уменьшает потери холостого хода системы, а при полной нагрузке наблюдаемое улучшение эффективности приводит к более низкой температуре перехода МОП-транзистора, причем на целых 6 °С, что значительно сокращает накладные расходы для управления его тепловым режимом.

Для достижения высокой удельной плотности мощности, требуемой современным рынком, как правило, используют два способа.

Один из вариантов — использовать высоковольтный МОП-транзистор на высоких рабочих частотах переключения. Это обеспечивает лучшую эффективность, в то время как высокочастотное переключение позволяет системе использовать и меньшие индуктивные компоненты, что уменьшает габаритные размеры системы в целом. Благодаря своим уникальным свойствам использование транзистора семейства продуктов CoolMOS P7 позволяет реализовать такие решения со значительно меньшими коммутационными потерями.

Второй метод — использовать высоковольтный МОП-транзистор с меньшей площадью. Транзисторы семейства CoolMOS P7 также дают возможность реализации такого подхода, поскольку предлагаются в корпусах DPAK с еще более низким уровнем $R_{DS(on)}$. Как показано на рис. 4, транзисторы семейства CoolMOS P7 в корпусах DPAK имеют $R_{DS(on)}$ более 450, 360 и 280 мОм. При этом значение 280 мОм является лучшим в своем классе продуктов. Оно на 56% ниже, чем у ближайших конкурентов. Улучшенные продукты в корпусах DPAK дают возможность заказчикам экономить место, что позволяет не только увеличить удельную плотность мощности, но и снизить производственные расходы за счет использования полностью автоматических сборочных процессов. Последнее достигается при переходе от приборов, монтируемых

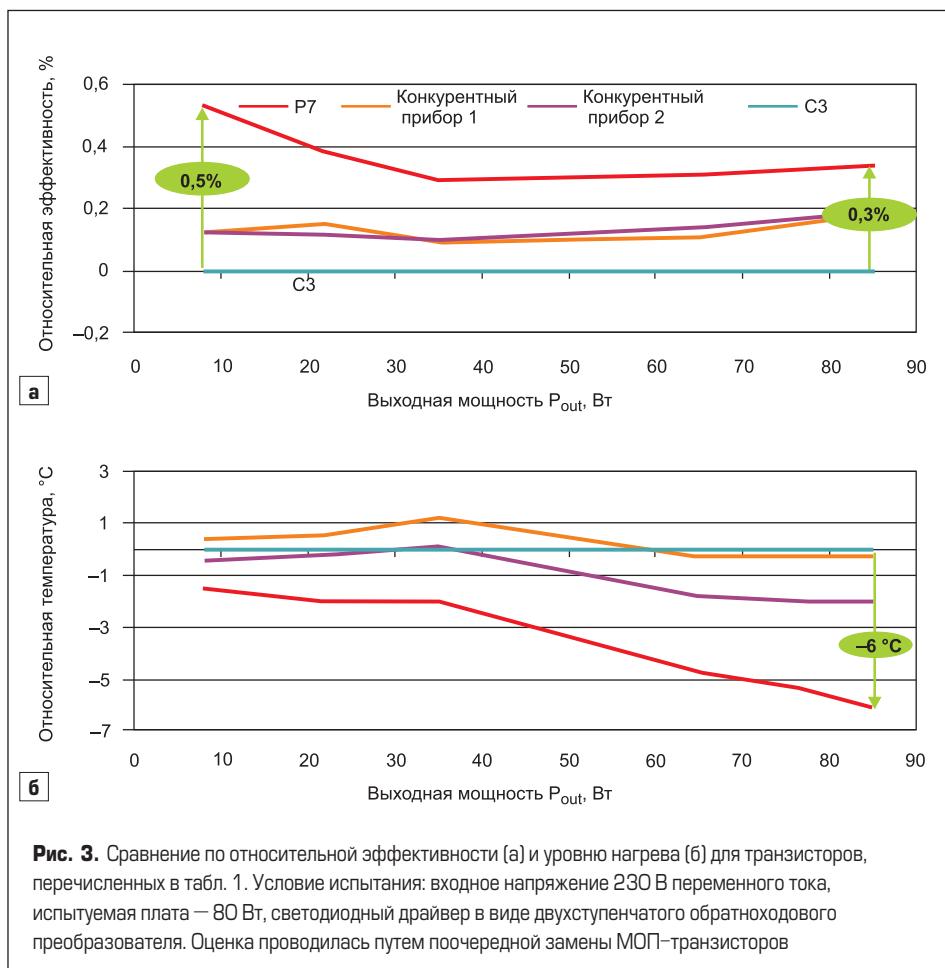


Рис. 3. Сравнение по относительной эффективности (а) и уровню нагрева (б) для транзисторов, перечисленных в табл. 1. Условие испытания: входное напряжение 230 В переменного тока, испытываемая плата — 80 Вт, светодиодный драйвер в виде двухступенчатого обратногоходового преобразователя. Оценка проводилась путем поочередной замены МОП-транзисторов

в сквозные отверстия (так называемые through hole), к корпусам, поддерживающим технологию монтажа на поверхность (SMD).

Одной из наиболее важных функций семейства продуктов CoolMOS P7 является встроенный стабилитрон, который снижает количество отказов, связанных с воздействием разрядов статического электричества. Использование такой защиты направлено на повышение качества и надежности. Стабилитрон интегрирован в приборы семейства CoolMOS P7 между затвором и истоком (рис. 5а), и его функция заключается в обеспечении защиты затвора от пробоя. Как показано на рис. 5б, во время воздействия статического электричества напряжение между затвором и истоком (VGS) ограничивается встроенным стабилитроном.

Путем использования при испытаниях на устойчивость к воздействиям статического электричества так называемой модели человеческого тела, имитирующей разряд при прикосновении человека (Human body model, HBM), было установлено, что транзисторы семейства CoolMOS P7 для транзисторов с $R_{DS(on)}$ между 2 и 4,5 Ом относятся к приборам Класса 1С (1–2 кВ), а для транзисторов с $R_{DS(on)}$ ниже 2 Ом — к приборам Класса 2 (2–4 кВ).

При использовании модели заряженного устройства (Charged Device Model, CDM) рассматриваемые транзисторы в части устойчивости к разрядам электростатического электричества относятся к Классу С3 (≥ 1 кВ). Эта функция защиты от статического электричества помогает уменьшить количество сбоев, связанных с воздействием разрядов электростатического электричества, во время сборки, что приводит к снижению производственных потерь. Это также, благодаря исключению подачи недопустимо высокого напряжения, которое может повредить изолирующий оксидный слой затвора, уменьшает вероятность поступления рекламаций с мест эксплуатации. Все это вместе повышает срок службы МОП-транзистора и исключает возможность использования такого МОП-транзистора, который потом откажет на месте эксплуатации. (Воздействие разрядов статического электричества опасно тем, что возникающие при этом дефекты не приводят к мгновенному выходу транзистора из строя, они, подобно частичным разрядам, накапливаются постепенно и приводят к отказу уже в условиях эксплуатации, часто через сотни часов наработки. — Прим. перев.)

Семейство приборов CoolMOS P7 с рабочим напряжением 800 В предлагает 12 вариантов исполнения по $R_{DS(on)}$ от 4,5 Ом до 0,280 Ом, часть из которых будет доступна во второй половине 2017 г., в шести основных вариантах корпусов. Дополнительно к корпусу TO-220 FullPAK добавлен TO-220 FullPAK Narrow Lead, позволяющий устанавливать на плату выводной транзистор с минимальным зазором, что дает выигрыш по высоте в 1,56 мм. С такой тонкой детализацией в части $R_{DS(on)}$ разработчики ИИП могут легко подобрать идеально подходящий для их кон-

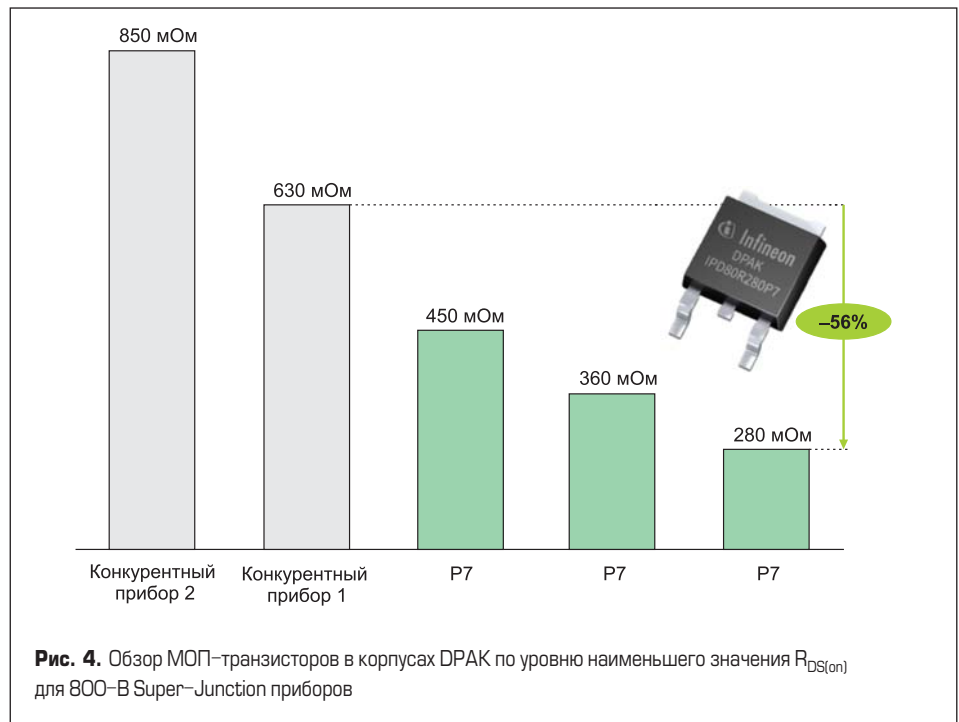


Рис. 4. Обзор МОП-транзисторов в корпусах DPAK по уровню наименьшего значения $R_{DS(on)}$ для 800-В Super-Junction приборов

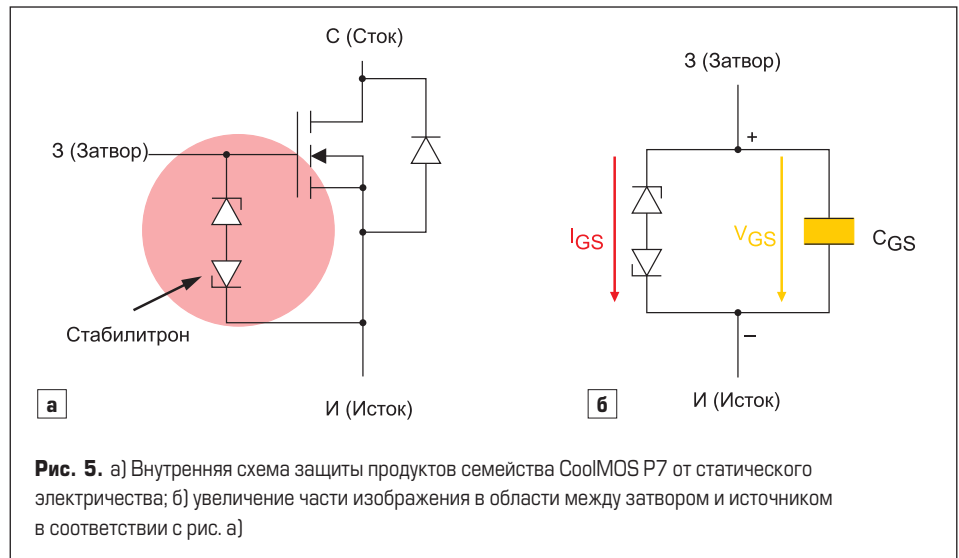


Рис. 5. а) Внутренняя схема защиты продуктов семейства CoolMOS P7 от статического электричества; б) увеличение части изображения в области между затвором и истоком в соответствии с рис. а)

Таблица 2. Варианты исполнения транзисторов семейства CoolMOS P7 с рабочим напряжением «сток-исток» 800 В

$R_{DS(on)}$ мОм	TO-220 FullPAK	TO-220 FP Narrow Lead	TO-252 DPAK	TO-220	TO-247	TO-251 IPAK	TO-251 IPAK SL
4500			IPD80R4K5P7			IPU80R4K5P7	
3300			IPD80R3K3P7			IPU80R3K3P7	
2400*			IPD80R2K4P7			IPU80R2K4P7	IPS80R2K4P7
2000			IPD80R2K0P7			IPU80R2K0P7	IPS80R2K0P7
1400	IPA80R1K4P7		IPD80R1K4P7	IPP80R1K4P7		IPU80R1K4P7	IPS80R1K4P7
1200	IPA80R1K2P7		IPD80R1K2P7	IPP80R1K2P7		IPU80R1K2P7	IPS80R1K2P7
900	IPA80R900P7		IPD80R900P7	IPP80R900P7		IPU80R900P7	IPS80R900P7
750*	IPA80R750P7		IPD80R750P7	IPP80R750P7		IPU80R750P7	IPS80R750P7
600*	IPA80R600P7	IPAN80R600P7	IPD80R600P7	IPP80R600P7			
600						IPU80R600P7	IPS80R600P7
450	IPA80R450P7	IPAN80R450P7	IPD80R450P7	IPP80R450P7			
360	IPA80R360P7	IPAN80R360P7	IPD80R360P7	IPP80R360P7	IPW80R360P7		
280	IPA80R280P7	IPAN80R280P7	IPD80R280P7	IPP80R280P7	IPW80R280P7		

Примечание: * — приборы будут доступны во второй половине 2017 г.



Рис. 6. Демонстрационная плата адаптера мощностью 45 Вт, выполненная в топологии обратного преобразователя с использованием транзистора IPA80R450P7 семейства CoolMOS P7

кретных проектов транзистор, причем еще и в оптимальном для проекта корпусе.

Сводная таблица доступных вариантов исполнения транзисторов семейства CoolMOS P7

с рабочим напряжением 800 В приведена в таблице 2. Транзисторы промышленного класса исполнения ориентированы на пять основных целевых приложений: адаптеры и зарядные

устройства, драйверы светодиодов, ИИП для аудиоаппаратуры, вспомогательные блоки питания и блоки питания промышленного оборудования.

Как можно видеть из предложенного обзора, продукты CoolMOS P7 от Infineon сочетают в себе лучшие в своем классе характеристики и простоту использования современного технического уровня. Приборы этого семейства оптимально подходят для использования в обратноходовых ИИП с выходной мощностью до 250 Вт. Для облегчения имплементации своих продуктов компания оказывает поддержку разработчикам проектов путем предоставления различных руководящих материалов по применению приборов семейства CoolMOS P7 и разнообразными базовыми решениями, включая демонстрационную плату адаптера ноутбука мощностью 45 Вт и выходным напряжением 19 В, выполненную на транзисторе IPA80R450P7 (рис. 6).