

Юрий Петропавловский

MOSFET компании Infineon

и их применение для драйверов светодиодных ламп

➔ Современные светодиоды (СД) отличаются высокой световой эффективностью и длительным сроком службы, поэтому задача адекватного повышения эффективности и надежности систем питания полупроводниковых осветительных приборов является весьма актуальной. СД ретрофитных LED-ламп, линейных осветительных приборов и панелей, промышленных и уличных светильников обычно подключаются к сетям переменного тока при помощи импульсных преобразователей напряжения (ИП). Значений КПД распространенных ИП (70–80%) для достижения современных требований по энергоэффективности оказывается недостаточно. Основной вклад в потери преобразования вносят каскады на силовых биполярных и полевых транзисторах. В современных ИП малой и средней мощности в качестве силовых ключей в основном применяются полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET), от параметров которых в значительной степени зависит КПД подключаемых к сетям переменного тока приборов. Совершенствованием технологий производства MOSFET и улучшением их качественных параметров занимаются практически все ведущие производители полупроводниковых приборов.

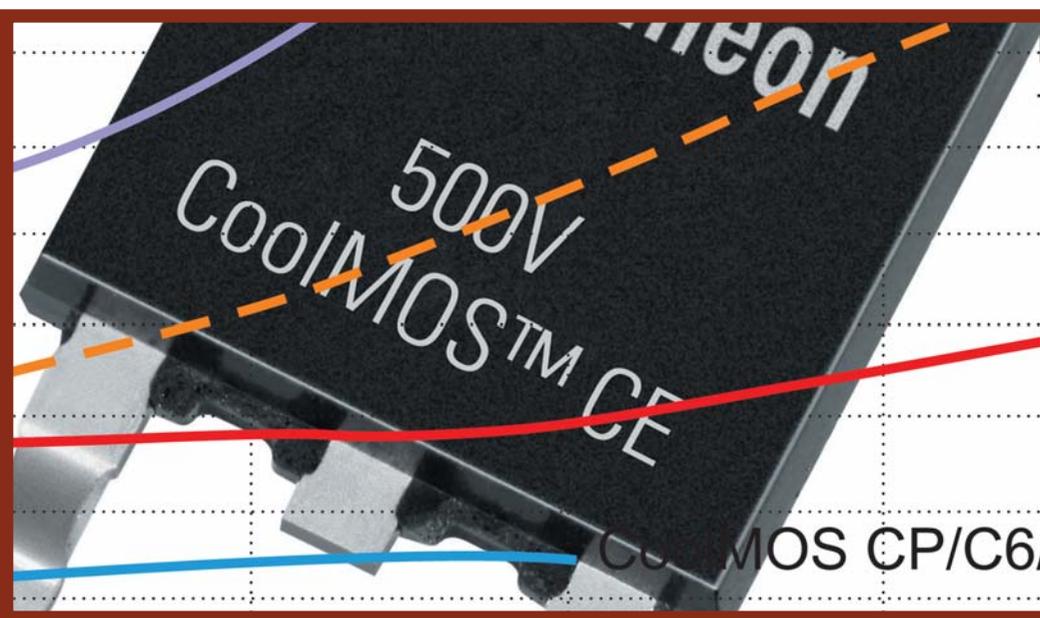
Один из крупнейших мировых производителей полупроводниковых приборов, компания Infineon Technologies AG (Германия) в январе 2015 г. завершила сделку по приобретению известной полупроводниковой компании International Rectifier (США). Ассортимент выпускаемой продукции и возможности объединенной компании (далее Infineon) существенно расширились по многим направлениям, в том числе и в части полупроводниковых приборов и микросхем для систем освещения и подсветки.

В номенклатуре продукции Infineon, предназначенной для систем LED-освещения и подсветки, представлены высокоэффективные MOSFET с низкими потерями переключения, а также драйверы СД на основе преобразователей с коррекцией коэффициента мощности, позволяющие реализовать ИП для различных, в том числе светодиодных приложений с высокой эффективностью (до 95% и выше).

Линейки MOSFET 500/600/650/800 V CoolMOS CE

Полевые транзисторы семейства CoolMOS основаны на технологии суперперехода (Super Junction, SJ). Первая линейка — CoolMOS S5 — была выпущена в 1998 г. Данная технология направлена на устранение одного из главных недостатков силовых MOSFET, каковым является значительный рост сопротивления открытого канала $R_{ds(on)}$ традиционных полевых транзисторов с блокирующим напряжением более 500 В. К настоящему времени выпущено уже семь поколений MOSFET семейства CoolMOS и более десятка линеек приборов различного назначения. Некоторые особенности полевых транзисторов с суперпереходом приведены в статье Джона Хэнкока (Jon Hancock), главного инженера AC/DC-приложений компании Infineon Technologies, в [1], русский перевод статьи представлен в [2].

Для светодиодных осветительных приложений, кроме эффективности, важны также стоимостные характеристики приборов. Линейка MOSFET 500 V CoolMOS CE с блокирующим напряжением 500 В предназначена для потребительских приложений с привлекательным соотношением цена/качество. В составе линейки имеется более десятка типов приборов, ориентированных и на применение в LED-освещении [3].



Приборы линейки характеризуются сниженными, по сравнению с традиционными приборами, энергией выключения (E_{oss}) и зарядом затвора (Q_g), высокой электрической прочностью встроенного диода с малым зарядом восстановления (Q_{rr}) и привлекательной ценой. В составе линейки для систем LED-освещения предлагаются приборы в корпусах DPAK (рис. 1) и IPAК (отличаются удлиненными выводами), наиболее подходящие для применения в ретрофитных LED-лампах. Классификационные параметры этих приборов из каталога компании 2015 г. приведены в таблице.

Целевой областью применения полевых транзисторов 800 V CoolMOS CE с блокирующим напряжением 800 В является LED-освещение. В сравнении с сопоставимыми по характеристикам традиционными

полевыми транзисторами, приборы этой линейки отличаются более низким удельным сопротивлением открытого канала ($R_{ds\ on} \cdot A$), меньшими потерями выключения (E_{oss}), меньшим зарядом затвора и отличным соотношением цена/качество [4].

В линейке MOSFET 600/650 V CoolMOS CE с блокирующим напряжением 600/650 В также имеются приборы в корпусах DPAK, ориентированные на применение в системах LED-освещения. Приборы характеризуются низкими потерями переключения и проводимости, малым зарядом затвора и привлекательным соотношением цена/качество [5].

Особенности выбора

Выбор конкретных типов приборов рассматриваемых линеек следует начи-



Рис. 1. Прибор линейки CoolMOS CE

Таблица. Классификационные параметры семейства CoolMOS

Тип прибора	$U_{си\ макс}$, В	$R_{ds\ on}$, Ом	Q_g , нК	$I_{св}$, А, пост/имп.	E_{oss} , мДж	Свх/Свых, пФ	t_r/t_f , нс	t_{rr} , нс	di/dt диода, А/мкс	Корпус
500 V CE (2012 г.)										
IPD50R280CE	550	0,28	32,6	13/42,9	3,2	49/773	6,4/7,6	230	500	PG-T0252/DPAK
IPD50R380CE		0,38	24,8	9,9/32/4	2,54	40/584	5,6/8,6	207		
IPD50R500CE		0,5	18,7	7,6/24	2,02	31/433	5/12	180		
IPD50R650CE		0,65	15	6,1/19	1,69	26/342	5/13,1	162		
IPD50R800CE		0,8	12,4	5/15,5	1,46	23/280	5,5/15,9	158		
IPD50R950CE		0,95	10,5	4,3/12,8	1,28	19/231	4,9/19,5	140		
IPD50R1K4CE		1,4	8,2	3,1/8,8	0,79	11/178	6/30	120		
IPD50R2K0CE		2	6	2,4/6,1	0,62	9/124	5/38	110		
IPD50R3K0CE		3	4,3	1,7/4,1	0,49	7/84	5,8/49	99		
IPU50R950CE		0,95	10,5	4,3/12,8	1,28	19/231	4,9/19,5	140		
IPU50R1K4CE		1,4	8,2	3,1/8,8	0,79	11/178	6/30	120		
IPU50R2K0CE		2	6	2,4/6,1	0,62	9/124	5/38	110		
IPU50R3K0CE		3	4,3	1,7/4,1	0,49	7/84	5,8/49	99		
800 V CE (2013 г.)										
IPD80R1K0CE	800	0,95	31	5,7/18	-	785/33	15/8	520	400	PG-T0252/DPAK
IPD80R1K4CE		1,4	23	3,9/12		570/25	15/12			
IPD80R2K8CE		2,8	12	1,9/6		290/13	15/18			
IPU80R1K0CE		0,95	31	5,7/18		785/33	15/8			PG-T0251/IPAK
IPU80R1K4CE		1,4	23	3,9/12		570/25	15/12			
IPU80R2K8CE		2,8	12	1,9/6		290/13	15/18			
600 V CE (2014 г.)										
IPD60R400CE	650	0,4	32	10,3/30	2,8	700/46	9/8	290	500	PG-T0252/DPAK
IPD60R460CE		0,46	28	9,1/26	2,5	620/41	9/10	320		
IPD60R650CE		0,65	20,5	7/19	1,9	440/30	8/11	250		
IPD60R800CE		0,8	17,2	5,6/15,7	1,6	373/27	7/12	250		
IPD60R1K0CE		1	13	4,3/12	1,3	280/21	8/13	220		
IPD60R1K5CE		1,5	9,4	3,1/8	1	200/16	7/20	230		
IPD6R2K1CE		2,1	6,7	2,3/6	0,76	140/12	7/50	180		
IPU60R1K0CE		1	13	4,3/12	1,3	280/21	8/13	220		
IPU60R1K5CE		1,5	9,4	3,1/8	1	200/16	7/20	230		
IPU60R2K1CE		2,1	6,7	2,3/6	0,76	140/12	7/50	180		
650 V CE (2014 г.)										
IPS65R1K0CE	700	1	15,3	4,3/12	1,5	328/23	5,2/13,6	226	500	PG-T0251/IPAK
IPS65R1K5CE		1,5	10,5	3,1/8,3	1,15	225/18	5,9/18,2	200		

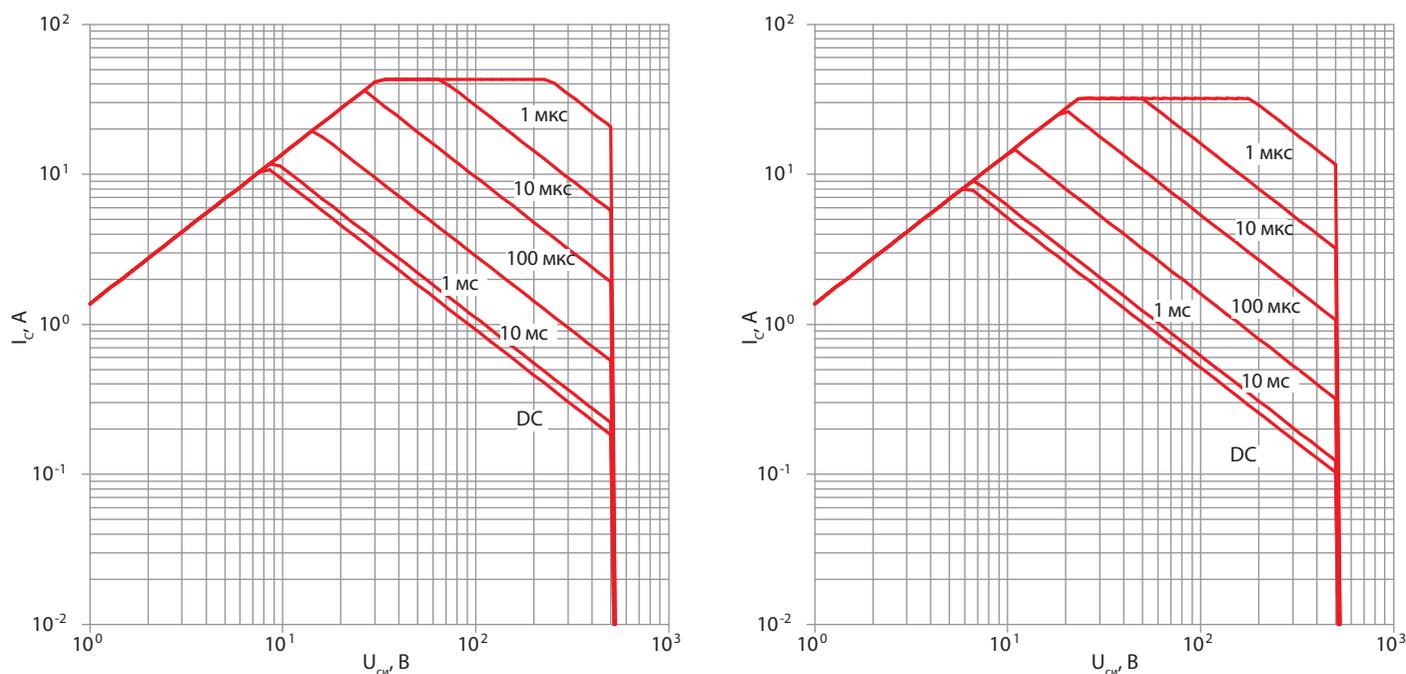


Рис. 2. Области безопасной работы прибора IPD50R280CE

нать с определения требуемых ключевых параметров — блокирующего напряжения и группы сопротивлений открытого канала $R_{ds\,on}$ от которых напрямую зависят и другие параметры транзисторов, приведенные в таблице.

При разработке ИП с питанием от сетей переменного тока, в том числе LED-драйверов, следует иметь в виду, что на выбор приборов по блокирующему напряжению влияют такие факторы, как номинальное напряжение сети и его возможные отклонения; топология преобразователя; уровень нагрузки по току стока; различные возможные температуры кристалла приборов. Рассмотрим их подробнее.

Приборы линейки 500 V CoolMOS CE в основном используются в ИП с питанием от сетей с номинальными напряжениями 100/110/120/127 В и отклонениями в диапазоне 80–140 В (RMS). Транзисторы линейки 600/650 V CoolMOS CE рекомендованы для работы в ИП с номинальными сетевыми напряжениями 220–240 В и отклонениями до $\pm 20\%$, а приборы линейки 800 V CoolMOS CE можно применять в ИП с широким диапазоном сетевых напряжений 80–270 В, причем с большим запасом по надежности.

По рекомендациям Infineon приборы линейки 600/650 CoolMOS CE следует применять в обратноходовых преобразователях малой мощности (до 45 Вт), 500 V CoolMOS CE — в резонансных преобразователях

(LLC) малой и средней мощности, 800 V CoolMOS CE — в квазирезонансных обратноходовых преобразователях малой и средней мощности.

На рис. 2 обозначены области безопасной работы транзистора IPD50R280CE при температурах кристалла $+25\text{ °C}$ (слева) и $+80\text{ °C}$. Как показывают диаграммы, максимально допустимое напряжение на стоке зависит от длительности импульсов и тока стока. Для данного прибора максимальный

постоянный ток стока при $T = +25\text{ °C}$ 13 А, импульсный — 42,9 А, а безопасная работа при напряжении на стоке до 500 В и $T = +80\text{ °C}$ обеспечивается при импульсном токе порядка 10 А только при достаточно коротких длительностях импульсов (короче 1 мкс). Такой же характер имеют и области безопасной работы транзисторов других рассматриваемых линеек, поэтому правильный выбор транзисторов по блокирующему напряжению является критически важным

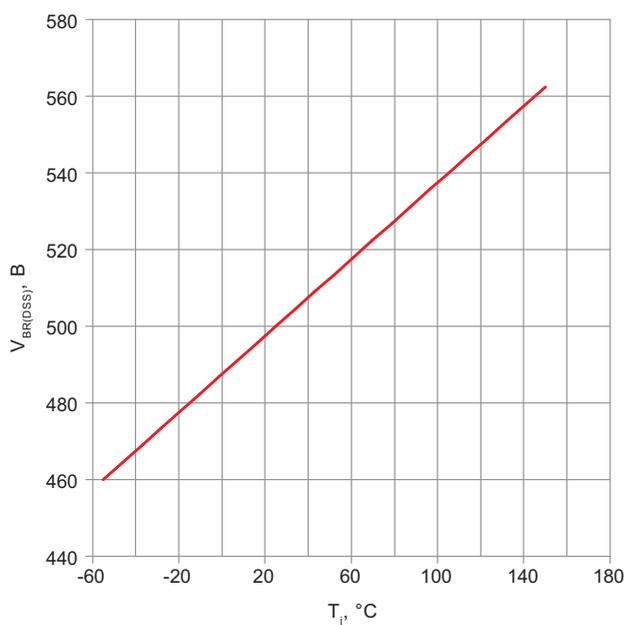


Рис. 3. Температурная зависимость U_{br} прибора IPD50R280CE

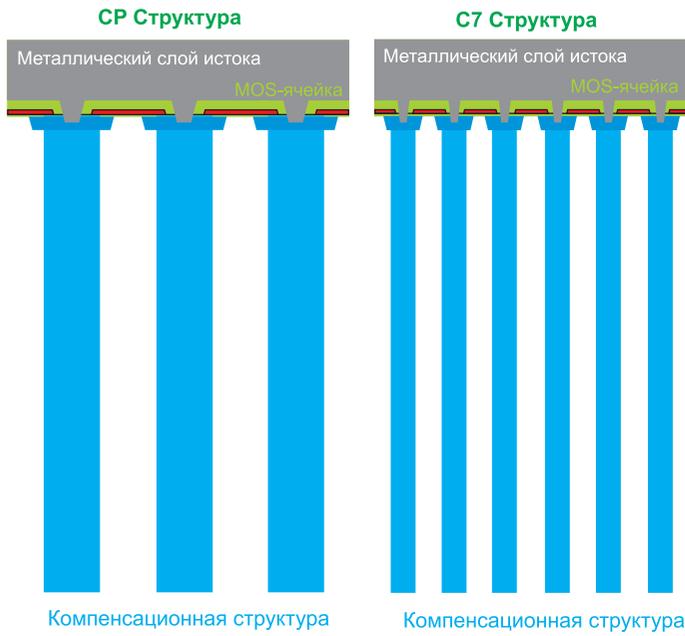


Рис. 4. Структура кристалла прибора с суперпереходом

для обеспечения надежной и длительной работы ИП. Следует отметить, что допустимое блокирующее напряжение V_{br} транзисторов напрямую зависит от температуры кристаллов. На рис. 3 приведена зависимость блокирующего напряжения прибора IPD50R280CE от температуры. Видно, что значение V_{br} при отрицательных температурах существенно меньше номинального (500 В).

Как показано в таблице, сопротивление открытого канала рассматриваемых при-

боров находится в пределах 0,28–3 Ом. Столь существенная разница объясняется, в основном, топологическими различиями кристаллов приборов. Кристаллы MOSFET с суперпереходом семейства CoolMOS (а также некоторых силовых полевых транзисторов других производителей) состоят из множества единичных транзисторов, соединенных параллельно, что упрощенно показано на рис. 4. Собственно, этим обстоятельством, в основном, и определяются группы

приборов по сопротивлению открытого канала $R_{ds\ on}$ — чем больше элементарных ячеек на кристалле, тем меньше сопротивление.

Все приборы семейства CoolMOS характеризуются значительно меньшими значениями удельного сопротивления открытого канала $R_{ds\ on} \cdot A$ в сравнении с MOSFET, выполненными по традиционным технологиям. На рис. 5 представлены зависимости этого параметра от блокирующего напряжения различных линеек полевых транзисторов CoolMOS. Низкие значения удельного сопротивления $R_{ds\ on} \cdot A$ позволяют размещать кристаллы приборов в корпусах небольших размеров, например DPAK, IPAK с габаритами 6,5×6×2,3 мм, что способствует их применению в компактных конструкциях, в частности в ретрофитных LED-лампах.

При выборе приборов CoolMOS CE по группам $R_{ds\ on}$ следует иметь в виду, что с его понижением одновременно увеличиваются (ухудшаются) такие параметры, как входная и выходная емкости, заряд затвора и потери переключения. Поэтому при расчете ИП следует применять транзисторы с разумным для конкретных приложений запасом по току стока: чрезмерное его значение способствует ухудшению энергоэффективности преобразователей напряжения.

Поскольку ретрофитные LED-лампы являются массовым потребительским продуктом, их стоимость является одним из важнейших показателей. Для драйверов ретрофитных LED-ламп на напряжения 220–240 В хорошо подойдут приборы линейки 800 В CoolMOS CE. Рассмотрим особенности приборов IPD80R2K8CE, IPU80R2K8CE из этой линейки более подробно.

Отпускные цены этих MOSFET (0,41 €/1000 шт. на июль 2015 г.) являются одними из наиболее низких среди всех приборов семейства CoolMOS. На рис. 6 показано положение приборов различных линеек CoolMOS по критериям эффективности и отношению цена/качество. Понятно, что приборы линеек CE по показателю цена/качество близки к традиционным полевым транзисторам (для справки: приборы линейки 600 В CoolMOS C7 отпускаются по 1,31–7,39 €/тыс., линейки 650 В CoolMOS C7 — по 1,17–14,01 €/тыс.). Рассматриваемые приборы характеризуются высокой плотностью мощности и выполнены в малогабаритных корпусах, что

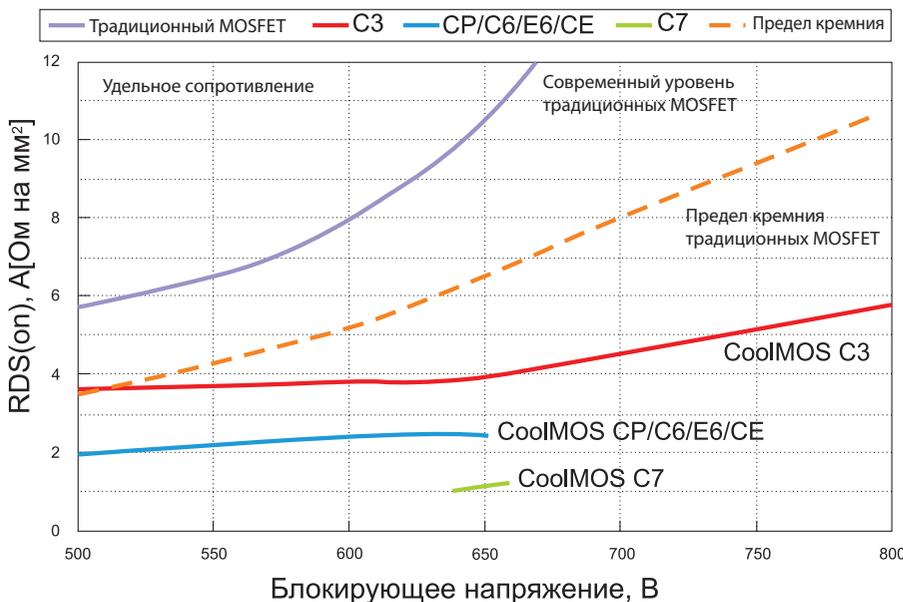


Рис. 5. Удельное сопротивление приборов CoolMOS

позволяет снизить требования к условиям охлаждения при работе в компактных конструкциях ИП. Транзисторы обеспечивают высокую надежность при работе в условиях низких температур, а также удовлетворяют требованиям промышленного стандарта JEDEC (J-STD20, JESD22). Основные параметры приборов (кроме приведенных в таблице):

- диапазон рабочих температур кристаллов $-55...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- тепловое сопротивление кристалл/корпус не более $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, кристалл/окружающая среда — $35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;
- типовое сопротивление открытого канала $2,4\text{ }\Omega$ при $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $6,5\text{ }\Omega$ при $T = +150\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- мощность рассеяния 42 Вт при $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 17 Вт при $T = +100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- сопротивление затвора $R_g = 1,2\text{ }\Omega$ (на частоте 1 МГц);
- задержки включения/выключения $t_{d\text{ on}}/t_{d\text{ off}}$ — $25/72\text{ нс}$;
- пиковый ток обратного диода 6 А .

Мощность, потребляемая ретрофитными LED-лампами, варьируется от единиц до нескольких десятков ватт. При питании от сетей с напряжением $220\text{--}240\text{ В}$ ток стока ключевых транзисторов при таких мощностях укладывается в пределы от сотен миллиампер до одного ампера. Области безопасной работы приборов при $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены на рис. 7. Как показывают диаграммы, ток стока рассматриваемых приборов от 200 мА до 6 А при напряжении на стоке более 500 В безопасен при длительностях импульсов $1\text{ мс}...1\text{ мкс}$, что соответствует частотам коммутации в диапазоне порядка $5\text{--}500\text{ кГц}$.

Отладочная плата Infineon

В качестве примера практической реализации ИП рассмотрим особенности отладочной платы Infineon AN-EVALLED-ICL8002G-B1, предназначенной для отработки сетевых драйверов СД ретрофитных ламп. Внешние виды платы сверху и снизу приведены на рис. 8, электрическая принципиальная схема — на рис. 9. Устройство обеспечивает управление светодиодными лампами мощностью 11 Вт при напряжении $36\text{--}42\text{ В}$ ($I_{\text{вых}}$ около 300 мА) и коррекцию коэффициента мощности (PFC). Диапазон рабочих напряжений сети $196\text{--}265\text{ В}$ (50 Гц), КПД преобразования более 85% , коэффициент мощности более $0,9$. В состав платы входят следующие основные компоненты:

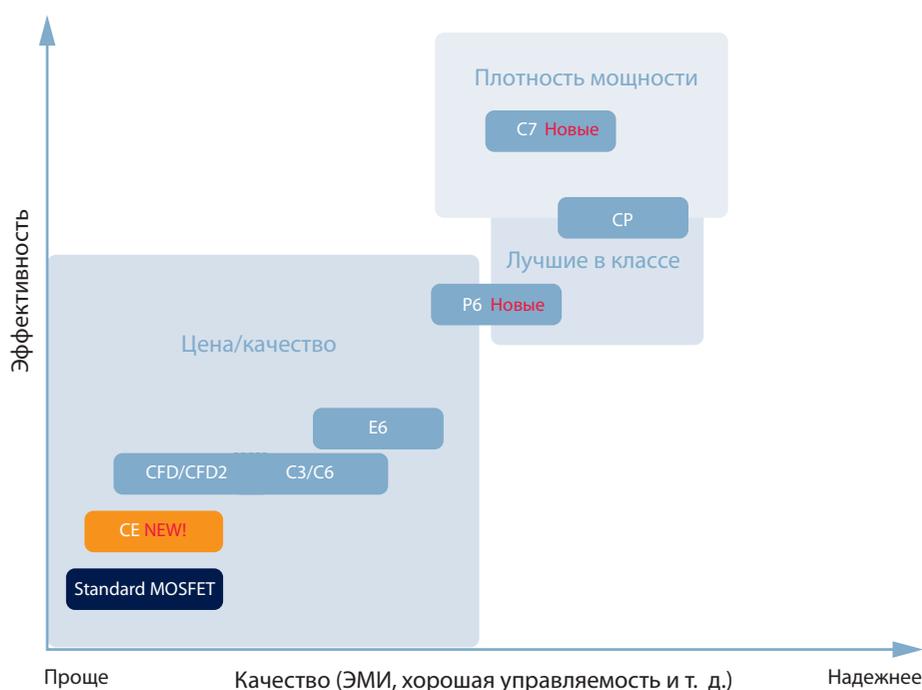


Рис. 6. Качественные показатели приборов CoolMOS

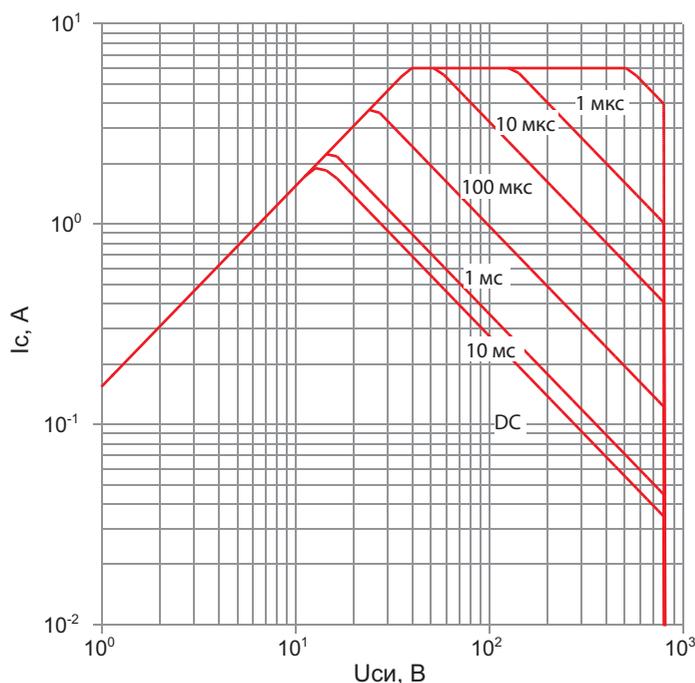


Рис. 7. Область безопасной работы прибора IPD80R2K8C

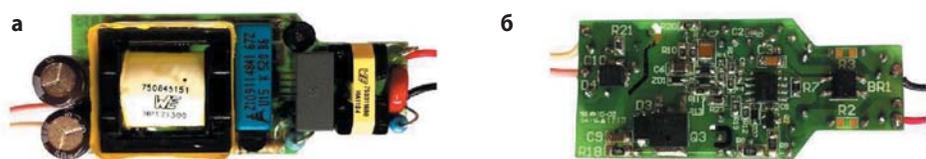


Рис. 8. Отладочная плата AN-EVALLED-ICL8002G-B1: а) вид сверху; б) вид снизу

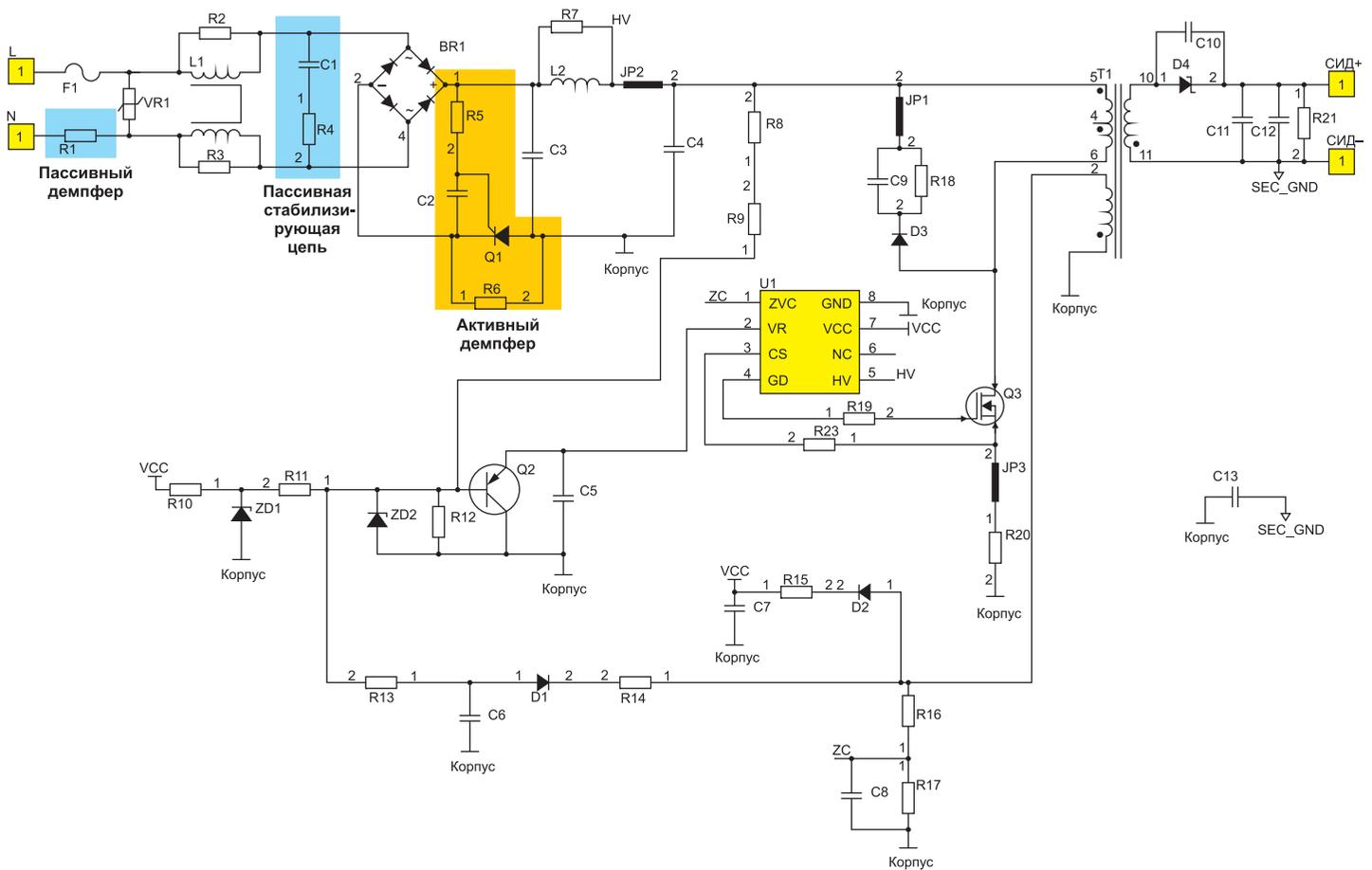


Рис. 9. Электрическая принципиальная схема платы AN-EVALLED-ICL8002G-B1

- U1 — драйвер СД с корректором коэффициента мощности (ККМ) ICL8002G компании Infineon. Микросхема представляет собой квазирезонансный обратнoходовый преобразователь с возможностью регулировки яркости свечения СД. Структура микросхемы приведена на рис. 10. Микросхема полностью совместима с фазовыми диммерами и обеспечивает непрерывную регулировку яркости в широком диапазоне. Регулировка осуществляется по первичной стороне, что уменьшает количество необходимых компонентов с соответствующим уменьшением стоимости и габаритов осветительных приборов. Потенциально достижимые эффективность преобразования и коэффициент мощности ИП, выполненных на основе микросхемы, более 90 и 98% соответственно.
- Q1 — тиристор MCR100-8 компании On Semiconducto (ONSEMI) на напряжение 600 В и ток 0,8 А.
- Q2 — *n-p-n*-транзистор BC857B компании Infineon.

- Q3 — MOSFET IPD80R2K8CE линейки 800 V CoolMOS CE (или SPD02N80C3).
 - D1, D2 — коммутационные диоды SOD323 (75 В, 0,2 А) компании ONSEMI.
 - D4 — диод Шоттки STPS3150U (150 В, 3 А) компании STM.
 - BR1 — мостовой выпрямитель MBS-E3/80 (600 В, 0,5 А) компании Vishay.
 - C3 — конденсатор фильтра 630 В, 15 нФ компании Murata.
 - C4 — конденсатор фильтра 520 В, 0,15 мкФ компании Epcos.
 - L1, L2, T1 — дроссели и импульсный трансформатор компании Würth Elektronik.
- Рассматриваемая отладочная плата совместима с большинством фазовых диммеров (TRIAC Based Dimmers) различных производителей. Фазовые диммеры обеспечивают плавную регулировку действующего значения напряжения при активном сопротивлении нагрузки, что характерно для ламп накаливания. При наличии реактивной составляющей сопротивления нагрузки, например, как

у импульсного преобразователя напряжения, качество регулировки, КПД и коэффициент мощности оказываются неудовлетворительными.

Для улучшения качества регулировки яркости свечения СД (без мерцаний) при питании от фазовых диммеров в устройстве применены пассивный демпфер (Passive Damper), пассивная стабилизирующая цепь (Passive Bleeder) и активный демпфер (Active Damper). Пассивный демпфер, состоящий из резистора R1 (100 Ом, 2 Вт) и варистора VR1 (19 Дж, 300 В rms), обеспечивает демпфирование пусковых токов при включении устройства в сеть. Пассивная стабилизирующая цепь C1 (0,15 мкФ, 275 В rms), R4 (1,2 кОм, 2 Вт) сглаживает колебания потребляемого устройством тока при работе фазового диммера. Следует отметить, что подключенные к сети резистивные компоненты постоянно потребляют некоторую энергию и несколько снижают общий КПД всего устройства. Активный демпфер, состоящий из тиристора Q1, резисторов R5 (1 МОм, 1 Вт), R6 (100 Ом, 1 Вт) и конденсатора C2

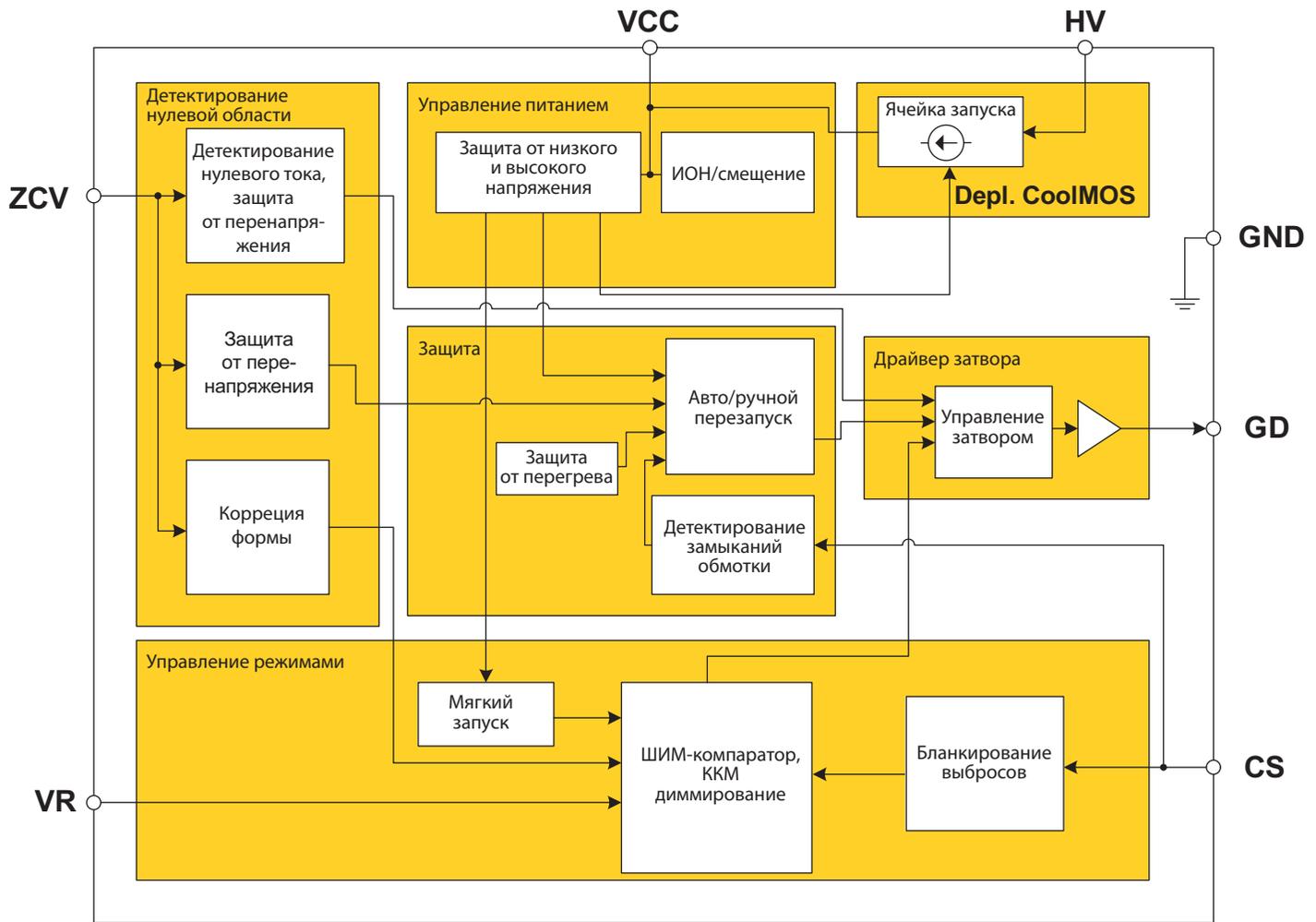


Рис. 10. Структура микросхемы ICL8002G

(150 нФ, 50 В), способствует некоторому повышению общей эффективности преобразования при активизации фазовых диммеров.

В устройстве применена одноступенчатая схема ККМ (Single Stage PFC). Входное напряжение через резисторы R8, R9, R12 и транзистор Q2 поступает на вывод 2 (VR) микросхемы U1, которая, в свою очередь, регулирует пиковый ток в первичной обмотке импульсного трансформатора T1 во время каждого цикла включения транзистора Q3 пропорционально сигналу на этом выводе микросхемы. В результате потребляемый устройством ток по форме приближается к синусоидальному, что и приводит к увеличению коэффициента мощности и общей эффективности.

Применение ККМ по первичной части преобразователя приводит к колебаниям выходного напряжения во вторичной обмотке импульсного трансформатора T1. Для обеспечения независимости

выходной мощности и, следовательно, светового потока СД от напряжения сети, в рассматриваемом устройстве используется специальный канал обратной связи с отдельной обмотки импульсного трансформатора T1 (вывод 2). В состав этого канала входят: выпрямитель D2, R15, C7 для формирования положительного напряжения (цепь VCC); D1, R14, C6 для получения отрицательного напряжения, через резистор R13 подаваемого на базу транзистора Q2; стабилитроны ZD1, ZD2; делитель напряжения R16, R17.

Напряжение ZC с этого делителя поступает на вывод 1 (ZCV) микросхемы U1, предназначенный для детектирования нулевого напряжения, необходимого для работы квазирезонансного преобразователя. Все резисторы канала обратной связи рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить стабилизацию выходной мощности устройства на требуемом уровне (11 Вт), задаваемом резистором R16. На рис. 11 приведены диаграммы, поясняющие работу

схемы стабилизации выходной мощности устройства в заданной рабочей точке используемых СД. На рис. 12 показаны зависимости выходного тока и его отклонения от сетевого напряжения. По диаграммам видно, что выходной ток уменьшается относительно номинала (300 мА) примерно

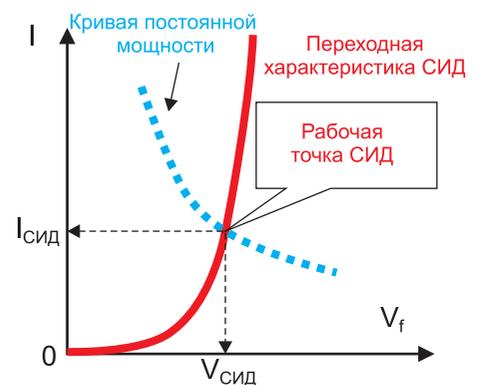


Рис. 11. Метод стабилизации мощности

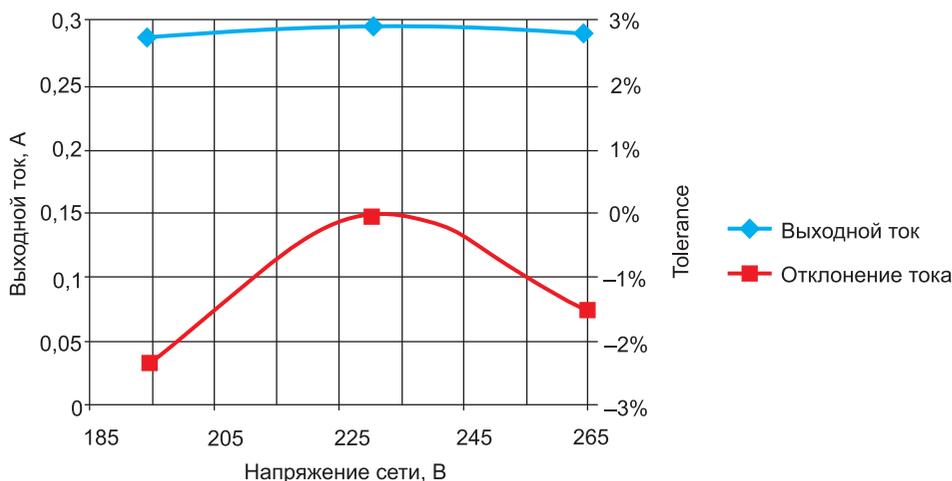


Рис. 12. Характеристики стабилизации тока СД

на 2–3 % как при уменьшении, так и при увеличении напряжения сети относительно номинального (230 В) в рабочем диапазоне 195–265 В.

Применение в рассматриваемом устройстве метода стабилизации выходной мощности имеет определенные преимущества по сравнению с методом стабилизации выходного тока СД. Поскольку даже однотипные СД всегда имеют разброс по прямому напряжению, то экземпляры с большим прямым напряжением будут потреблять и большую мощность при одинаковом токе. Соответственно, при этом они будут и больше нагреваться. Метод стабилизации выходной мощности позволяет оптимизировать тепловые характеристики LED-ламп и в результате экономить за счет уменьшения размеров и массы теплоотводящей конструкции (радиатора) при сохранении высокой

расчетной надежности, поскольку в тепловые расчеты не требуется закладывать запас на разброс прямых напряжений СД. Другим преимуществом метода постоянной выходной мощности является большая независимость светового потока от разброса прямых напряжений подключаемых к устройству СД-модулей и температурных вариаций.

Особенностью рассматриваемого устройства является наличие пульсаций в выходном токе, поскольку питание первичной части преобразователя осуществляется пульсирующим напряжением с выпрямительного моста BR1 частотой 100 Гц. Снижение пульсаций обеспечивают конденсаторы фильтра С11 (180 мкФ, 50 В), С12 (120 мкФ, 50 В), при этих номиналах емкости пульсации (глубина модуляции) выходного тока частотой 100 Гц не превышают 25%.

Используемая в устройстве микросхема ICL8002G обеспечивает ряд защитных функций: от пониженного и повышенного напряжения питания VCC, повышенного выходного напряжения, короткого замыкания выхода и перегрева. Общая эффективность устройства при изменении входного напряжения в пределах 190–265 В при полной нагрузке находится в пределах 84–86%. Более подробные данные по рассматриваемой отладочной плате приведены в руководстве по применению [6].

Литература

1. <http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/images/TechnologyUpdate-1110.pdf>
2. www.russianelectronics.ru:808/leader-r/review/micro/doc/55166/
3. www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/power-mosfet/n-channel-coolmos-tm-500v-650v/500v-coolmos-tm-ce/channel.html?channel=db3a30433784a0400137dfc7a75f3df9
4. www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/power-mosfet/n-channel-coolmos-tm-700v-900v/800v-coolmos-tm-ce/channel.html?channel=5546d461454603990145cc9fc3d46090
5. www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/power-mosfet/n-channel-coolmos-tm-500v-650v/600v-and-650v-coolmos-tm-ce/channel.html?channel=5546d46149b40f65014a147890df09ab
6. www.infineon.com/dgdl/Infineon-icl8002g_b1_flyback-AN-v1.1-en.pdf?fileId=db3a304336797ff90136bb0de17d267a