

# Электронная компонентная база силовых устройств

## Часть 1

**В статье описываются особенности электронных компонентов силовых устройств (СУ) и приводятся их основные параметры. Рассмотрены применяемые в настоящее время полупроводниковые силовые компоненты (диоды, тиристоры, симисторы, транзисторы, интегрированные силовые модули), устройства управления ими, коммутационные и некоторые пассивные компоненты отечественного и зарубежного производства. Первая часть посвящена диодам.**

**Владимир Ланцов**

vlantsov@list.ru

**Саркис Эраносян, к. т. н.**

sergera840@mail.ru

В работе [1] рассмотрены основные параметры некоторых электронных компонентов, применяемых в мощных (до 5–10 кВт) импульсных источниках вторичного электропитания (ИВЭ). Приводятся параметры силовых транзисторов (MOSFET, IGBT), быстродействующих (fast, ultrafast) диодов, в том числе диодов Шоттки. В качестве примера использования некоторых типов этих компонентов приведены две схемы импульсных ИВЭ мощностью 1200 Вт (27 В/45 А) и 2400 Вт (48 В/50 А). Источники выполнены с использованием активных корректоров коэффициента мощности (ККМ/PFC) и однотактных прямоходовых преобразователей напряжения по схеме так называемого «косого моста» (ОПН-КМ), работающих на частоте 200 кГц. Дополнительные сведения приведены в [2].

С тех пор прошло более трех лет. Общеизвестно, что на современном этапе развитие силовой преобразовательной техники идет в основном за счет усовершенствования силовых компонентов и устройств управления ими (контроллеров). Иными словами, если еще 15–20 лет тому назад схемотехника диктовала тенденции развития новых полупроводниковых приборов, то последние 5–7 лет все идет наоборот. То есть новые, более совершенные силовые компоненты и интегральные узлы и устройства позволяют реализовывать новые схемотехнические решения [3]. В этой связи авторы считают целесообразным и полезным рассказать о произошедших изменениях в компонентной базе за минувшие годы не только для применения в импульсных источниках, но уже шире — для силовых устройств (СУ). Конечно, мы отдаем себе отчет в том, насколько велико многообразие СУ и применяемых в них электронных компонентов. Однако, по нашему мнению, введя разумные ограничения, представляется возможным дать обзор компонентной базы для наиболее широко распространенных классов СУ, интересующих большинство читателей. Прежде всего это импульсные источники питания, различные инверторы и преобразователи, регуляторы напряжения, устройства управления электроприводом, нагревательные устройства и кондиционеры, переносные сварочные агрегаты бытового и промышленного исполне-

ния, защитно-коммутационная аппаратура, ручной электроинструмент и т. д. С целью конкретизации предмета рассмотрения предварительно приведем сведения по классификации некоторых СУ. В частности, большинство специалистов сходится на том, что по современным представлениям импульсные источники питания условно можно разделить на классы: маломощные (до 100 Вт), средней мощности (до 400–500 Вт), большой мощности (до 5–10 кВт), сверхбольшой мощности (свыше 10 кВт). В то же время электропривод считается маломощным примерно до 4 кВт, а область электропривода средней мощности лежит в границах приблизительно до 40 кВт [4]. По оценкам специалистов, эти сектора занимают значительно более половины рынка бытовых (холодильники, стиральные машины, кондиционеры, ручной электроинструмент и т. д.) и промышленных электроприводов. По мнению известного специалиста в области силовой электроники Колпакова А. И., основанному на многих исследованиях, 90% продаваемых во всем мире промышленных приводов имеют мощность от 5 до 100 кВт [3]. Таким образом, прежде всего мы будем рассматривать силовые электронные ключи для применения в импульсных ИВЭ с мощностью не менее 500 Вт, электроприводах и других СУ с мощностью 40–100 кВт. Для представления о возможностях силовых приборов также будут в определенной степени рассмотрены компоненты и более мощных силовых устройств. Таким образом, это означает, что непосредственно в этой статье мы приведем характеристики, особенности и тенденции развития силовых электронных ключей на токи от 10–20 А до 200–250 А и более с напряжениями от 100 до 6000 В, как отечественного, так и зарубежного производства.

По данным [5], в 2007 г. большая часть (95%) применяемых в России силовых компонентов была зарубежного производства. Вместе с тем в последние годы российские фирмы — производители электронных компонентов на основе использования передовых зарубежных технологий и внедрения современного высокопроизводительного оборудования сделали заметные успехи по выпуску силовых элементов [5, 6].

Отечественная электронная промышленность и ранее, и сейчас традиционно ориентирована в основном на рынок компонентов для промышленного и военного применения.

Рассмотрим структуры, отличительные особенности и основные параметры следующих классов современных силовых полупроводниковых приборов:

- выпрямительные низкочастотные диоды и мосты;
- быстрodeйствующие диоды, в том числе диоды Шоттки;

### Низкочастотные выпрямительные диоды и мосты

Выпрямительные диоды содержат один *p-n*-переход и являются относительно простыми полупроводниковыми приборами. В зависимости от рабочей частоты (быстрodeйствия), такие диоды делятся на низкочастотные (до 1 кГц), высокочастотные и импульсные (быстрodeйствующие). При изложении данного раздела будем рассматривать только низкочастотные диоды. Другие группы диодов рассматриваются в следующем разделе. Основные параметры выпрямительных диодов [7]:

- максимально допустимое обратное повторяющееся напряжение  $U_{RRM}$ ;
- максимально допустимый выпрямленный прямой средний/прямой эффективный (среднеквадратичный) ток —  $I_{F(AV)}/I_{F(RMS)}$ ;
- максимально допустимый импульсный ток  $I_{FSM}$  — для повторяющихся или единичных импульсов диодов (в частности, за 10 мс — половина периода частоты 50 Гц или за 8,3 мс — для частоты 60 Гц);
- прямое падение напряжения на включенном диоде  $U_{FM}$ ;
- допустимая рабочая частота  $f_{max}$

Максимально допустимая мощность рассеяния, как правило, не задается и определяется стандартными типами корпусов диодов (с определенными значениями теплового сопротивления переход-корпус  $R_{thJC}$ ). В большинстве случаев выпрямительные диоды крепятся к теплоотводящему радиатору (охладителю), а при таблеточной конструкции корпуса — с двух сторон. Отвод тепла обеспечивается путем естественной конвекции или принудительной вентиляции.

Для сетевых выпрямителей обычно выбираются выпрямительные диоды или мосты с напряжением  $U_{RRM} = 600-800$  В для однофазной (~220/230 В) и 800–1000 В для трехфазной (3×~220 В или 3×~380 В) сети переменного тока [8]. При этом приняты во внимание максимальное повышение сетевого напряжения (на +20%), возможные «перекося» напряжения фаз сети и др. В этом случае особенно важно обеспечить напряжение изоляции выводов относительно корпуса блока, которое должно быть  $U_{isol} \geq 2000$  В.

Отметим, что, в отличие от других силовых компонентов, в СУ российские разработчики и производители значительно чаще используют силовые выпрямительные диоды отечественных фирм. Отечественные низкочастотные диоды имеют хорошо отработанную технологию, достаточно надежны и сравнительно недороги, например, диоды серий Д1ХХ (Д106-, Д112-, Д122- и т. д.), Д2ХХ (Д232-), Д3ХХ (Д333) и др. Эти диоды перекрывают диапазон напряжений  $U_{RRM} = 100-6000$  В и токи  $I_{F(AV)} = 10-6600$  А. Диоды выпускаются в штыве (металлостеклянные корпуса SD1–SD3, металлокерамические корпуса SD4–SD7), таблеточном и модульном исполнении. Одним из основных производителей силовых диодов и вообще компонентов силовой электроники является ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) [9]. Поставка диодов осуществляется многими фирмами-дилерами: ООО «Симметрон», ООО «Платан», ООО «Силовой диод» (г. Москва) и др. В частности, очень широкую номенклатуру силовых диодов поставляет ООО «Энергосистемаавтоматика» (г. Москва) [10].

В таблице 1 приведены основные параметры некоторых низкочастотных выпрямительных диодов отечественных фирм.

Зарубежные фирмы Infineon Technologies, Eures, IR, IXYS [11–14] также продолжают выпускать диоды этого класса, выпрямительные мосты (одно- и трехфазные) и силовые сборки [15, 16].

Поскольку выпрямительные мосты собраны из выпрямительных диодов, то, естественно, они имеют аналогичный набор параметров. Но поскольку в мосте 2 диода включены последовательно в каждом полупериоде переменного напряжения, параметр  $U_{FM}$ , есте-

ственно, имеет большее значение. Приведем для примера параметры мостов фирмы IR:

- однофазный мост 26MBxxA:  $U_{RRM} = 200-800$  В,  $I_{F(AV)} = 25$  А,  $I_{FSM} = 475$  А (10 мс),  $U_{FM} = 1,1$  В; корпус D-34 А;
- трехфазный мост 110MT120KB:  $U_{RRM} = 1200$  В,  $I_{F(AV)} = 110$  А,  $I_{FSM} = 950$  А (10 мс), пороговое напряжение  $U_{FMO} = 0,81$  В; корпус — модуль.

### Быстрodeйствующие диоды

Быстрodeйствующие (fast recovery) диоды делятся на диоды с «тонкой базой» по эпитаксиально-планарной технологии (fast-FRED и ultrafast-FRED) и диоды Шоттки [6, 7]. Последние, в свою очередь, могут быть традиционными кремниевыми или на основе карбида кремния (SiC). В диодах с барьером Шоттки (диоды Шоттки, или ДШ) вместо *p-n*-перехода используется контакт металлической поверхности с полупроводником. В месте контакта возникают обедненные носителями заряда слои полупроводника, которые называются запорными. Диоды Шоттки отличаются от диодов с *p-n*-переходом следующими параметрами:

- а) более низкое прямое падение напряжения  $U_{FM}$ ;
- б) более низкое обратное напряжение  $U_{RRM}$ ;
- в) более высокий ток утечки (обратный ток)  $I_R$ ;
- г) почти полностью отсутствует заряд обратного напряжения  $Q_R$ .

В диодах Шоттки (ДШ) прямое падение напряжения является функцией обратного напряжения. У современных ДШ максимальное обратное напряжение составляет около 150–200 В, а прямое падение напряжения меньше, чем у диодов с *p-n*-переходом, на 0,2–0,35 В. ДШ незаменимы при проектировании мощных низковольтных (на практике до 27–48 В) и силовоточных высокочастотных выпрямителей благодаря свойствам а) и г).

Для быстрodeйствующих диодов характерны те же основные параметры, которые приведены для выпрямительных диодов. Важный параметр  $Pt$ , эквивалентный мгновенной энергии на диоде (с конкретным прямым сопротивлением), в отечественных спецификациях или ТУ вообще не указывается. Для зарубежных диодов этот параметр указывается не для всех диодов. Между тем при возникновении перегрузок по току и учете реального времени срабатыва-

Таблица 1. Основные характеристики отечественных выпрямительных низкочастотных диодов

| Наименование (фирма) | $U_{RRM}$ , В | $I_{F(AV)}$ , [T, °C], А | $I_{F(RMS)}$ , А | $I_{FSM}$ , А | $U_{FM}$ , В | Корпус [ $R_{thJC}$ , °C/Вт] |
|----------------------|---------------|--------------------------|------------------|---------------|--------------|------------------------------|
| Д106-25Х             | 200–1200      | 25[85]                   | 39               | 300           | 1,25         | Металлостеклянный [2,0]      |
| Д122-40Х             | 100–1800      | 40[110]                  | 63               | 600           | 1,35         | Металлостеклянный [0,75]     |
| Д232-63              | 100–1600      | 63[150]                  | 98               | 1400          | 1,35         | Металлостеклянный [0,5]      |
| Д132-80Х             | 100–1800      | 80[110]                  | 127              | 1700          | 1,35         | Металлостеклянный [0,38]     |
| Д142-100Х            | 100–1800      | 100[110]                 | 157              | 2400          | 1,35         | Металлокерамический [0,3]    |
| Д151-160Х            | 300–1600      | 160[140]                 | 300              | 4500          | 1,35         | Металлокерамический [0,24]   |
| Д161-250Х            | 300–1600      | 250[140]                 | 393              | 6400          | 1,35         | Таблеточный [0,15]           |
| МДД-320              | 1200–2400     | 340[100]                 | 530              | 8300          | 1,25         | Модуль [0,06]                |
| Д233-500             | 1000–4400     | 500[108]                 | 785              | 7000          | 2,0          | Таблеточный [0,04]           |
| Д243-800             | 2400–4400     | 800[102]                 | 1755             | 12500         | 1,95         | Таблеточный [0,03]           |
| Д153-1000            | 5200–6000     | 1240[90]                 | 2420             | 16000         | 2,0          | Таблеточный [0,018]          |

ния защиты силовых устройств этот параметр, безусловно, должен приниматься во внимание и контролироваться при проектировании СУ. Известны случаи, когда, например, в высокочастотных блоках питания превосходные по своим параметрам зарубежные диоды, выбранные с запасом только по допустимым значениям  $I_{F(AV)}$ ,  $I_{FSM}$  выходили из строя. Это казалось необъяснимым, но, по нашему мнению, происходило при значительных токовых перегрузках или КЗ из-за недостаточного быстродействия узла защиты по току.

Время восстановления обратного сопротивления диода  $t_{rr}$  является основным параметром быстродействующих диодов, определяющих их инерционные свойства. При изменении полярности приложенного к диоду напряжения обратный ток диода может увеличиваться в десятки раз. Величина  $t_{rr}$  в определенной степени зависит от «мягкости» («плавности») характеристики восстановления и нормируется при конкретной величине прямого тока и обратного тока. Следует отметить, что в справочных данных (data sheets) не всегда указываются значения  $U_{RR}$  и  $I_{F(AV)}$ , при которых определено значение  $t_{rr}$ , а также график восстановления обратного сопротивления. Вследствие конечного (не нулевого) значения  $t_{rr}$  дополнительно возникают динамические потери мощности на диоде. При некорректном выборе диодов в части величины  $t_{rr}$  и частоты коммутации  $f_k$  в СУ с увеличением частоты существенно возрастают динамические потери. Особенно это важно в таких устройствах, как импульсные ИВЭ, различные высокочастотные инверторы и преобразователи, например для переносных сварочных агрегатов и т. д.

Плавная коммутация тока зависит от отношения времени  $t_b$ , требуемого для установления напряжения обратного смещения диода, к времени распространения области обеднения в дрейфовую область  $t_a$  [6]. Задача обеспечения приемлемого отношения  $t_b/t_a$  разработчиками мощных компонентов решается успешно. Так, в 2007 г. компания Fairchild Semiconductor (Fairchild) [17] выпустила

диоды типа FFP08S60S и FFPF08S60S (серия Stealth II) с превосходной величиной плавной коммутации ( $t_b/t_a > 1,3$ ) при малом значении времени обратного восстановления ( $t_{rr} < 25$  нс) при напряжении пробоя 600 В. Также этой компанией был выпущен диод FFPF08H60S серии Hyperfast II с временем обратного восстановления  $t_{rr} < 35$  нс при напряжении пробоя 600 В и  $V_{FM} < 2,1$  В.

Среди диодов с малым значением  $V_{FM}$  отметим недавно выпущенное компанией IXYS новое поколение сверхбыстродействующих диодов серии HiPerFRED2 [6, 14]. Диоды рассчитаны на напряжение 200–400 В и прямой ток 10–120 А. При этом предусмотрены разные варианты конструкции: диоды типа DPF с малыми потерями в открытом состоянии и типа DPG — для высокочастотных устройств. Время обратного восстановления диодов серии составляет 35 нс, прямое падение напряжения — 0,98–1,22 В. Отметим также диоды большой мощности компании Westcode [15, 16]. Компания Westcode была основана в 1920 г. в Великобритании и в настоящее время занимается разработкой и поставкой силовых полупроводников большой мощности. Специалисты Westcode осуществляют также разработку и производство специализированных модулей по заданию заказчика с применением новейших методов тестирования [15]. Компания входит в состав корпорации IXYS.

В таблице 2 приведены характеристики и особенности некоторых быстродействующих диодов. Представлены диоды и сборки ведущих зарубежных фирм IR, IXYS, Fairchild, Westcode [1, 13–18]. Отечественные диоды и сборки представлены продукцией АОТ «Воронежский завод полупроводниковых приборов — С» (АОТ «ВЗПП-С») [19]. В частности, диоды КД644 А(АС)–Ж(ЖС) на напряжения 200–700 В, токи 25 А (2×25 А) и с временем восстановления  $t_{rr} = 50–75$  нс. Большим шагом вперед АОТ «ВЗПП-С» и отечественной силовой электроники в целом является выпуск силовых быстродействующих модулей типа МДЧЧ-XX-XXX на напряжения 400–700 В, токи от 60 А (2×60 А)

до 100 А (2×100 А) и с быстродействием ( $t_{rr}$ ) порядка 100 нс. Модули реализованы в корпусах ТО-244 (модификации 2 и 3) с тепловым сопротивлением  $R_{thC} = 0,35–0,5$  °С/Вт.

### Диоды Шоттки

Диоды Шоттки развиваются быстрыми темпами благодаря отмеченным выше достоинствам. Так, компания ON Semiconductor выпустила ДШ на напряжение 200–250 В, превосходящие традиционные диоды с тонкой базой по величине  $t_{rr}$  (<35 нс) при  $I_F=1$  А,  $di/dt=50$  А/мкс, прямому падению напряжения ( $V_F=0,86$  В) и плавному переключению ( $t_b/t_a > 1$ ) [6]. Основные характеристики диодов Шоттки также приведены в таблице 3.

В таблице 3 представлены некоторые диоды Шоттки из номенклатуры отечественных фирм, в частности: КД272XX, КД273XX производства АОТ «ВЗПП-С» [19] на напряжение 60–300 В и ток 15 (2×15 А)–60 А. Зарубежные диоды представлены моделями фирм IR, IXYS, APT [1, 13, 14, 18]. Эти модели обеспечивают напряжение 80–200 В и токи 40–100 А в стандартных корпусах ТО-220AB, ТО-247AC, SOT-227B (Isotop) и др.

Диоды Шоттки на основе карбида кремния (SiC) названы вторым поколением ДШ. Предварительно дадим некоторую информацию по новым разработкам [6, 20]. В последние годы ведутся широкие исследования новых материалов для приборов силовой электроники — арсенида галлия, карбида кремния, III-нитридов. Для силовых устройств очень перспективен карбид кремния (SiC). Пробивная напряженность электрического поля SiC более чем на порядок превышает соответствующие показатели у кремния (Si) и арсенида галлия (GaAs). Это обстоятельство приводит к снижению сопротивления прибора в открытом состоянии ( $R_{on}$ ). Малое удельное сопротивление материала в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока и большой величиной теплопроводности позволяет использовать очень маленькие по разме-

Таблица 2. Основные характеристики быстродействующих диодов и сборок

| Наименование (фирма)   | Особенности                      | $U_{RRM}$ , В     | $I_{F(AV)}$ , А | $I_{FSM}$ , А ( $t_{rr}$ , мс) | $U_{FM}$ , В | $t_{rr}$ , нс ( $I_{F(AV)}$ , А) | Корпус [ $R_{thC}$ , °С/Вт]       |
|------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|--------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Отечественные          |                                  |                   |                 |                                |              |                                  |                                   |
| КД641 А(АС)–Д(ДС)      | 1 диод<br>(2 диода, общий катод) | 400–800           | 15 (2×15)       | –                              | 1,7          | 60                               | КТ-28-1 (КТ-28-2/ТО-220AB)        |
| КД644 А(АС)–Ж(ЖС)      |                                  | 200–700           | 25 (2×25)       | –                              | 1,5–1,7      | 50–75                            | КТ-28-2/ТО-220AB (КТ-43В/ ТО-218) |
| МДЧ4-140-6-А6          |                                  | 600               | 70 (2×70)       | –                              | 1,4          | 100                              | ТО-244 (мод. 2) [0,45]            |
| МДЧ1-100-6-А6          | 1 диод                           | 600               | 100             | –                              | 1,6          | 100                              | D-67 [0,5]                        |
| Зарубежные             |                                  |                   |                 |                                |              |                                  |                                   |
| 15ETH06S (IR)          | 1 диод                           | 600               | 15,0            | –                              | 1,8–2,2      | 22 (1,0), 35 (15,0)              | D2-Pak (SMD-220)                  |
| DSEI 2×30-06C (IXYS)   | 2 свободных диода                | 600               | 30,0            | –                              | 1,6          | 50 (1,0)                         | SOT-227B                          |
| DSEI 60-06A (IXYS)     | 1 диод                           | 600               | 60,0            | –                              | 1,8          | 50 (1,0)                         | ТО-247AD                          |
| FFH60UP60S (Fairchild) |                                  | 600               | 60,0            | 600 [8,3]                      | 1,7          | 80                               | ТО-247 (-2L, -3L)                 |
| DSEI 30-10A (IXYS)     |                                  | 1000              | 30,0            | –                              | 2,4          | 50(1,0)                          | ТО-247AD                          |
| HFA30PB120 (IR)        |                                  | 1200              | 30,0            | –                              | 3            | 37(1,0)                          | ТО-247AC                          |
| APT2x61D120J (APT)     |                                  | 2 свободных диода | 1200            | 53                             | –            | 2,5                              | 38 (1,0); 400 (60,0)              |
| MO790YC200 (Westcode)  | 1 диод                           | 2500              | 790             | 9000 (10)                      | 1,6–2,2      | 4000                             | [0,05]                            |
| MO588LC400 (Westcode)  |                                  | 4500              | 588             | 3955 (10)                      | 2,32         | 3500                             | [0, 033]                          |

рам кристаллы для встраивания в силовые приборы.

Большая ширина запрещенной энергетической зоны SiC является результатом более высокого, по сравнению с Si и GaAs, барьера Шоттки. В результате очень малая величина тока утечки при повышенной температуре кристалла (менее 70 мкА при 200 °С) снижает термоэлектронную эмиссию за пределами барьера. Высокая теплопроводность карбида кремния уменьшает тепловое сопротивление кристалла по сравнению с кремниевыми диодами почти в два раза. Электронные параметры диодов и других SiC-приборов стабильны и слабо зависят от температуры, что способствует высокой надежности изделий. Карбид кремния устойчив к жесткой радиации, поэтому ее воздействие не приводит к деградации электронных свойств кристалла. Высокая рабочая температура кристалла (более 600 °С) позволяет создавать высоконадежные приборы для жестких условий эксплуатации и специальных применений. В ближайшем будущем с высокой вероятностью ожидается появление и широкое применение быстродействующих диодов (Шоттки) на базе SiC с блокирующим напряжением 4900 В и других приборов силовой электроники.

По сравнению с традиционными ДШ, SiC-диоды Шоттки имеют гораздо более высокое значение  $U_{RRM}$  (600–1200 В), меньшее время восстановления (примерно до 20–35 нс) и более высокую надежность. Ведущей фирмой в этом направлении является Cree [21], хотя Infineon, IXYS, IR, APT и другие зарубежные фирмы также имеют технологии производ-

ства SiC-приборов. Основные параметры диодов Шоттки на основе карбида кремния также приведены в таблице 3.

К сожалению, констатируется в [6], серийные отечественные технологии в области SiC-полупроводников в ближайшие годы из-за недостаточных инвестиций вряд ли появятся. Впрочем, исследования и разработки приборов на новых материалах проводятся, например, в НПП «ТЭЗ» [22]. Здесь начато производство маломощных выпрямительных столбов на карбиде кремния. В качестве исходного материала использовались пластины и структуры фирмы Cree. Проведенные испытания по программе «Климат-7» подтвердили рекордную радиационную стойкость приборов: поглощенная доза 50000 крад не привела к изменению характеристик приборов. Параметры диодов на SiC, разработанных в НПП «ТЭЗ»: постоянное обратное напряжение 300–500 В, время восстановления обратного сопротивления порядка 35 нс [6].

Продолжение следует

### Литература

1. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
2. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силовая электроника. 2007. № 4. 2008 № 1.

3. Машурян Э. Современная ситуация в силовой электронике // Электронные компоненты. 2005. № 6.
4. Колпаков А. Перспективы развития электропривода // Силовая электроника. 2004. № 1.
5. Кокорева И. Отечественная силовая электроника. Фирмы-производители // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 3.
6. Шурьгина М. Дискретные силовые приборы. Расширение применения и специализация // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 3.
7. Прянишников В. Электроника: Курс лекций. СПб.: КОРОНА принт. 1998.
8. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2009. № 1.
9. [www.elvpr.ru](http://www.elvpr.ru)
10. [www.esa-energo.ru](http://www.esa-energo.ru)
11. [www.infineon.com](http://www.infineon.com)
12. [www.eupec.com](http://www.eupec.com)
13. [www.irf.com](http://www.irf.com)
14. [www.ixys.com](http://www.ixys.com)
15. [www.westcode.com](http://www.westcode.com)
16. Лебедев А. Сборки компании Westcode // Силовая электроника. 2007. № 1.
17. [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)
18. [www.advancedpower.com](http://www.advancedpower.com)
19. [www.vzpp.vrn.ru](http://www.vzpp.vrn.ru)
20. Полищук А. Полупроводниковые материалы и приборы для жестких условий эксплуатации. // Современная электроника. 2006. № 4.
21. [www.creepower.com](http://www.creepower.com)
22. [www.nppte.ru](http://www.nppte.ru)

Таблица 3. Основные характеристики мощных диодов Шоттки

| Наименование (фирма) | Особенности                         | $U_{RRM}$ , В | $I_{F(AV)}$ , А | $U_{FM}$ , В | $t_{rr}$ , нс ( $Q_{R1}$ нКл) | Корпус                          |
|----------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------|--------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Отечественные диоды  |                                     |               |                 |              |                               |                                 |
| КД2998Д              | 1 диод                              | 40            | 20              | 0,7          | $f_{max} < 200$ кГц           | КТ11-штыревой металлостеклянный |
| КД272 А(АС)-И(ИС)    | 1<br>(2 диода, общий катод)         | 25–300        | 15(2×15)        | 0,7–1,2      |                               | КТ-28-1 (КТ-28-2/ТО-220АВ)      |
| КД273 А(АС)-Е(ЕС)    |                                     | 25–00         | 20(2×20)        | 0,7–1,15     |                               | КТ-28-2/ТО-220АВ                |
| КД273 Л (ЛС)         | 2 диода, общий катод                | 100           | 30(2×30)        | 0,9          |                               | КТ-28-2/ТО-220АВ                |
| КД273 МСЗ-РСЗ        |                                     | 45–200        | 2×40            | 0,77–0,95    |                               | КТ-43В (ТО-218)                 |
| Зарубежные диоды     |                                     |               |                 |              |                               |                                 |
| 40CPQ080 (IR)        | 2 диода, общий катод                | 80            | 40              | 0,77         | –                             | ТО-247АС                        |
| 83CNQ80А (IR)        |                                     | 80            | 80              | 0,67         | –                             | D61-8                           |
| 63CPQ100А (IR)       |                                     | 100           | 60              | 0,64         | –                             | ТО-247АС                        |
| DSS2×160-01А (IXYS)  | 2 диода, общий катод<br>(основание) | 100           | 160             | 0,92         | –                             | SOT-227В                        |
| 60CTQ150S (IR)       |                                     | 150           | 20              | 0,83         | –                             | D2-Pak                          |
| 40STQ150 (IR)        |                                     | 150           | 40              | 0,93         | –                             | ТО220-АВ                        |
| 80CPQ150 (IR)        |                                     | 150           | 80              | 0,86         | –                             | ТО-247АС                        |
| DSS2×101-015А (IXYS) | 2 свободных диода                   | 150           | 100             | 0,9          | –                             | SOT-227В                        |
| APT60S20В (APT)      | 1 диод                              | 200           | 75              | 0,8–0,9      | 55 (80 А)                     | ISOTOP (SOT-227В)               |
| DSS2×101-02А (IXYS)  | 2 свободных диода                   | 200           | 100             | 0,94         |                               | SOT-227В                        |
| SiC-диоды Шоттки     |                                     |               |                 |              |                               |                                 |
| CSD10060А (CREE)     | 1 диод                              | 600           | 10              | 1,8          | (28)                          | ТО-220-2                        |
| CSD20060D            | 2 диода, общий катод                | 600           | 20 (2×10)       | 1,8          | (28)                          | ТО-247-3                        |
| CSD10120А            | 1 диод                              | 1200          | 10              | 1,8          | (61)                          | ТО-220-2                        |
| CSD20120D            | 2 диода, общий катод                | 1200          | 20 (2×10)       | 1,8          | (61)                          | ТО-247-3                        |