

Андрей Кадуков

TVS-диоды — полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях

В реальных условиях эксплуатации электронного оборудования в его цепях могут возникать различные виды электрических перегрузок, наиболее опасными из которых являются перегрузки по напряжению (перенапряжения), создаваемые электромагнитными импульсами естественного происхождения (за счет мощных грозových разрядов), электромагнитными импульсами искусственного происхождения (за счет излучений радиопередающих устройств, высоковольтных линий передачи, сетей электрифицированных железных дорог и т. п.), а также за счет внутренних переходных процессов в оборудовании при ее функционировании (например, при переключениях индуктивных нагрузок) и электростатических разрядов (ЭСР).

Воздействие электромагнитного импульса (ЭМИ) естественного и искусственного происхождения на электронные компоненты приводит к изменению их параметров за счет как непосредственного поглощения ими энергии, так и воздействия на них наведенных в цепях импульсов токов и напряжений. По данным фирмы General Semiconductor, потери промышленности США от воздействий перенапряжений составляют более \$10 млрд в год. Учитывая сроки эксплуатации электронного оборудования в России, его износ и отсутствие жестких требований по защите от перенапряжений можно предположить, что эти потери в нашей стране сопоставимы с американскими.

Наиболее чувствительными к воздействию импульсных напряжений и токов, наведенных ЭМИ естественного и искусственного происхождения на проводах и кабелях, являются подключенные к ним выходные устройства, в первую очередь выполненные на ИМС и дискретных полупроводниковых приборах.

Минимальная энергия, вызывающая функциональные повреждения полупроводниковых приборов и ИМС, составляет 10^{-2} – 10^{-7} Дж.

Для защиты цепей оборудования от воздействия электрических перегрузок могут использоваться разнообразные методы, основными из которых являются: конструкционные, структурно-функциональные, схемотехнические.

Таблица 1. Сравнение элементов защиты от перенапряжений

Элемент защиты	Преимущество	Недостатки	Примеры использования
Разрядник	Высокое значение допустимого тока. Низкая емкость. Высокое сопротивление изоляции	Высокое напряжение возникновения разряда. Низкая долговечность и надежность. Значительное время срабатывания. Защищаемая	Первичная защита телекоммуникационных и силовых цепей. Первая ступень комбинированной защиты

		цепь шунтируется после прохождения импульса	
Варистор	Высокое значение допустимого тока. Низкая цена. Широкий диапазон рабочих токов и напряжений	Ограниченный срок службы. Высокое напряжение ограничения. Высокая собственная емкость. Затруднительность поверхностного крепления	Вторичная защита. Защита силовых цепей и автомобильной электроники. Защита электронных компонентов непосредственно на печатной плате. Первая и вторая ступень комбинированной защиты
TVS-диод	Низкие уровни напряжения ограничения. Высокая долговечность и надежность. Широкий диапазон рабочих напряжений. Высокое быстродействие. Низкая собственная емкость. Идеально подходит для поверхностного монтажа	Низкое значение номинального импульсного тока. Относительно высокая стоимость	Идеален для защиты полупроводниковых компонентов на печатной плате. Вторичная защита. Защита от ЭСР, БИН и электрических переходных процессов. Оконечная ступень в комбинированных защитных устройствах
TVS-тиристор	Не подвержен деградации. Высокое быстродействие. Высокий управляющий ток	Ограниченный диапазон рабочих напряжений. Защищаемая цепь шунтируется после прохождения импульса	Первичная и вторичная защита в телекоммуникационных цепях

Конструкционные способы защиты включают в себя: рациональное расположение и монтаж компонентов, экранирование, заземление и др.

Группа структурно-функциональных методов включает в себя: рациональный выбор принципа действия оборудования и выбор используемых стандартов передачи сигналов и др.

Схемотехнические методы включают в себя пассивную и активную защиту. Наиболее эффективным средством защиты оборудования от воздействия ЭМИ является активная защита. Основным элементом схем активной защиты являются разрядники, металлооксидные варисторы, TVS- (transient voltage supressor) тиристоры и TVS-диоды, называемые в отечественной литературе «супрессорами», «полупроводниковыми ограничителями напряжения (ПОН)» или «диодами для подавления переходных процессов (ППН)». Поскольку в данной статье описываются полупроводниковые приборы зарубежных производителей, будем использовать термин «TVS-диоды».

В табл. 1 приведено сравнение различных элементов активной защиты от перенапряжений.

За рубежом TVS-диоды известны под названиями (торговыми марками) Trans Zorb, Transil, Insel и т. д.

В настоящий момент рядом производителей разработаны TVS-диоды, с помощью которых защита РЭА решена полностью. Более того, с января 1996 года Европейским комитетом по стандартизации (CENELEC) введены стандарты, запрещающие продажу на рынке ЕС аппаратуры без защиты, в состав которой входят TVS-диоды.

Полупроводниковые TVS-диоды — полупроводниковые приборы с резко выраженной нелинейной вольт-амперной характеристикой, подавляющие импульсные электрические перенапряжения, амплитуда которых превышает напряжения лавинного пробоя диода.

В нормальном рабочем режиме TVS-диод должен быть «невидим», то есть не влиять на работу защищаемой цепи до момента возникновения импульса перенапряжения. Электрические характеристики TVS-диода не должны оказывать никакого влияния на нормальное функционирование цепи.

Во время действия импульса перенапряжения TVS-диод ограничивает выброс напряжения до безопасного, в то время как опасный ток протекает через диод на землю, минуя защищаемую цепь. Принцип работы TVS-диода показан на *рис. 1*.

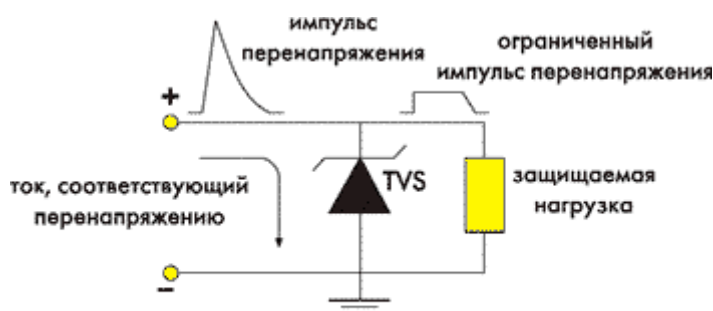


Рис. 1. Принцип работы TVS-диода

TVS-диоды часто путают с кремниевыми стабилитронами (диодами Зенера). TVS-диоды разработаны и предназначены для защиты от мощных импульсов перенапряжения, в то время как кремниевые стабилитроны предназначены для регулирования напряжения и не рассчитаны на работу при значительных импульсных нагрузках.

TVS-диод обладает высоким быстродействием в отличие от газоразрядных ограничителей (разрядников), которые из-за значительного времени срабатывания (более 0,15 мкс) не решают проблемы защиты многих полупроводниковых приборов и микросхем, поскольку для них недопустимы начальные выбросы напряжения, пропускаемые разрядниками.

Преимуществом TVS-диодов перед разрядниками является еще то, что напряжение пробоя у них ниже напряжения ограничения (у разрядников оно значительно выше напряжения поддержания разряда), поэтому при их применении защищаемые ими цепи не шунтируются после прохождения импульса тока переходного процесса, как это имеет место у разрядников.

Время срабатывания у несимметричных TVS-диодов менее 10–12 нс, а у симметричных — менее 5×10^{-9} с. Это позволяет использовать их для защиты различных радиочастотных цепей, в состав которых входят чувствительные к переходным процессам полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы.

Другой важной характеристикой TVS-диодов является барьерная емкость р–п-перехода. Малоемкостные TVS-диоды ($C=90\text{--}100$ пФ) применяются для защиты линий связи переменного тока с частотой до 100 МГц от выбросов напряжения.

Вольтамперные характеристики TVS-диодов и их схематические символы приведены на *рис. 1–3*.

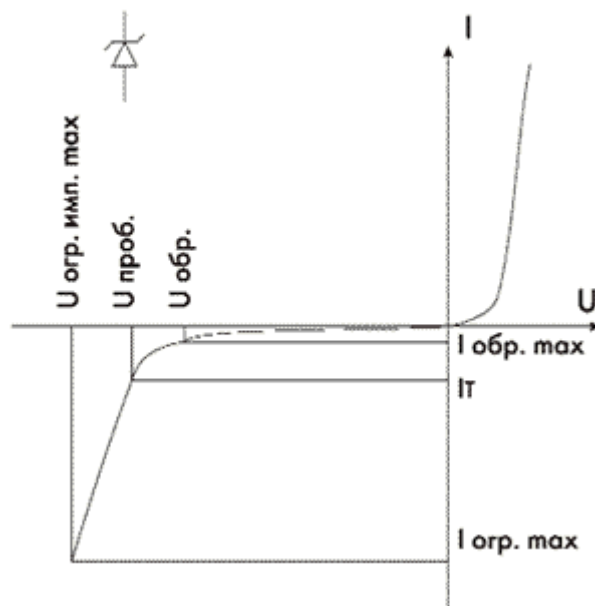


Рис. 2. ВАХ несимметричного TVS-диода

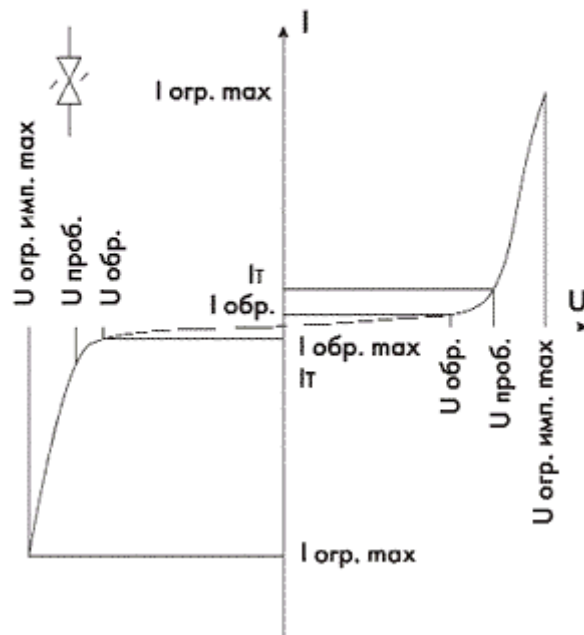


Рис. 3. ВАХ симметричного TVS-диода

Основные электрические параметры TVS-диодов

$U_{\text{проб. при } I_T} (V_{\text{BR}})$, В — значение напряжения пробоя при заданном тестовом токе пробоя I_T ;

$I_{\text{обр.}} (I_R)$, мка — значение постоянного обратного тока, протекающего через прибор в обратном направлении при напряжении, равном $V_{\text{обр.}}$;

$V_{обр. (VWM)}$, В — постоянное обратное напряжение (в соответствии с этим параметром выбирается тип ограничителя);

$V_{огр. имп. max. (V_C)}$, В — максимальное импульсное напряжение ограничения при максимальном импульсном токе при заданных длительности, скважности, форме импульса и температуре окружающей среды;

$P_{имп. max. (P_{ppm})}$, Вт — максимально допустимая импульсная мощность, рассеиваемая прибором, при заданных форме, скважности, длительности импульса и температуре окружающей среды.

Таблица 2. Предельные эксплуатационные характеристики

Параметр	Обозначение	Значение параметра	Единица измерения
Макс. имп. Мощность (имп.-10/1000 мкс) ⁽¹⁾	P_{ppm}	мин. 1500	Вт
Макс. имп. Ток (имп. -10/1000 мкс) ⁽¹⁾	I_{ppm}	см. следующую таблицу	А
Постоянна рассеиваемая мощность при $T=75^{\circ}$, длине выводов 9,5мм	$P_{m(av)}$	6,5	Вт
Макс. прямой ток, только для несимметричных диодов ⁽²⁾	I_{FSM}	200	А
Макс. имп. прямое напряжение при 100 А, только для несимметричных диодов ⁽²⁾	V_F	3,5/5,0	В
Температура окружающей среды	T	-55...+175	$^{\circ}C$

Примечание.

1. При одиночном импульсе тока и при температуре $25^{\circ}C$.
2. Измеряется при воздействии одиночного импульса в виде синусоидальной полуволны длительностью 8,3 мс или эквивалентного прямоугольного импульса, с максимальной частотой следования импульсов - 4 имп/мин (метод JEDEC)
3. $V_F = 3,5$ В для диодов с $V_{(BR)} < 220$ В, и $V_F = 5,0$ В макс. для диодов с $V_{(BR)} > 220$ В.

Таблица 3. Электрические параметры

Тип (JEDEC)	Тип (General Semiconductor)	Напряжение пробоя $V_{(BR)}$ (В)		Тест. ток пробоя I_T (мА)	Постоянное обратное напряжение V_{WM} (В)	Макс. обр. ток при V_{WM}	Макс. имп. ток ограничения I_{ppm} (А)	Макс. напряжение ограничения при I_{ppm} V_c (В)	Темпер. коэф. напряжения пробоя (%/°C)
		Макс.	Мин.						
1N6267-	1.5KE6.8-	6,12	7,48	10	5,5	1000	139	10,8	0,057
1N6303A	1.5KE200A*-	190	210	1	171	1,0	5,5	274	0,108
—	1.5KE440A	418	462	1	376	1,0	2,5	602	0,110

Примечание. В таблице указаны только параметры диодов с минимальными и максимальными значениями $V_{(BR)}$.

Тип TVS-диода для конкретного применения выбирается, исходя из рассчитанного значения $P_{имп. макс.}$ с учетом длительности импульса и его формы. При этом $V_{обр.}$ должно быть равно напряжению, действующему в цепи или превышать его с учетом максимального допуска.

Обычно $P_{имп. макс.}$ рассчитывается с учетом воздействия импульса — 10/1000 мкс ($t_f=10$ мкс, $t_i=1000$ мкс) показанного на *рис. 4*.

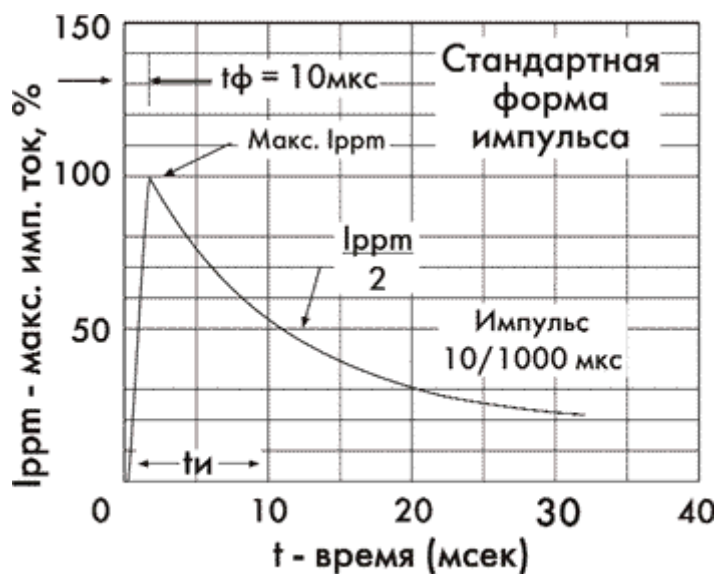


Рис. 4

Но в реальных условиях эксплуатации в зависимости от характера перенапряжения параметры импульса могут иметь другие значения. Поэтому во многих международных и национальных стандартах указаны иные параметры импульса. Например, в стандарте МЭК 801-5 для линий передачи данных описан импульс перенапряжения с формой 1,2/50 мс.

Рисунок 5 иллюстрирует зависимость максимально допустимой импульсной мощности от длительности импульса перенапряжения для TVS-диода TRANSZORB® типа SMBJ12A с $P_{имп. макс.} = 600$ Вт. Обычно производители приводят подобные графики в спецификациях на все типы и серии TVS-диодов. На этом графике видно, что при увеличении длительности импульса перенапряжения мощность, которую может выдержать диод, уменьшается. TVS-диоды — полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях

сти импульса перенапряжения свыше 1000 мкс снижается значение максимально допустимой импульсной мощности TVS-диода, и наоборот, при снижении длительности максимально допустимая мощность увеличивается. При воздействиях более коротких импульсов TVS-диод выдержит более высокий импульсный ток (I_P). При длительности импульса 50 мс TVS-диод SMBJ12A выдержит импульсный ток, превышающий номинальный в 3,5 раза.

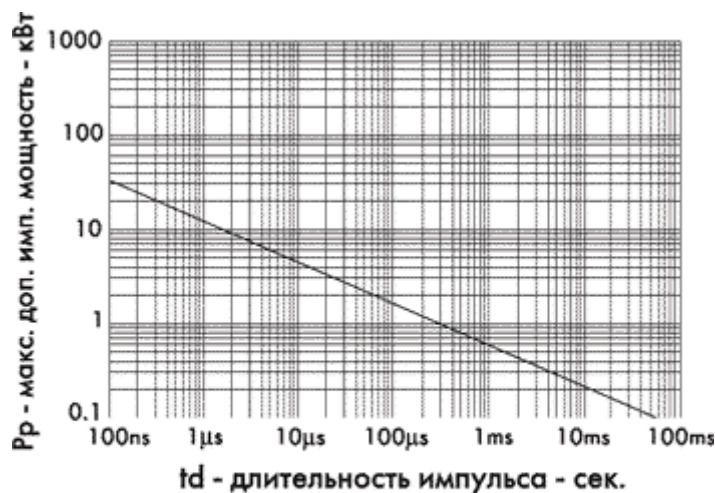


Рис. 5. Зависимость максимально допустимой импульсной мощности от длительности импульса перенапряжения

Этот метод может применяться для расчета значений максимально допустимой мощности и импульсного тока TVS-диодов с любыми номинальными значениями $P_{\text{имп. макс.}}$ (400 Вт, 500 Вт, 1,5 кВт, 5 кВт).

Если мощность одного TVS-диода не удовлетворяет заданным требованиям по $P_{\text{имп. макс.}}$, их соединяют последовательно. При двух последовательно соединенных TVS-диодах мощность удваивается и т.д. Допускается последовательное соединение любого числа TVS-диодов. При этом разброс по $V_{\text{проб.}}$ каждого прибора не должен превышать 5%, что гарантирует равную нагрузку на последовательно соединенных приборах. Если невозможно достичь нужной мощности при последовательном соединении, допускается параллельное соединение. Для гарантированной загруженности приборов по мощности необходимо точное их согласование по $V_{\text{огр.}}$ (не более 20 мВ). Допускается также смешанное соединение TVS-диодов.

TVS-диоды наряду с основным назначением могут использоваться как стабилитроны (диоды Зенера). При этом необходимы дополнительные данные по значениям максимально допустимой постоянной рассеиваемой мощности и динамическим сопротивлениям при минимальном и максимальном токах.

За рубежом TVS-диоды впервые были разработаны в 1968 году фирмой GSI (General Semiconductor Industries) для защиты устройств связи от грозových разрядов. В дальнейшем этой фирмой были созданы TVS-диоды с напряжением пробоя от 6,8 до 200 В с импульсной мощностью 1,5 кВт для защиты авиационного оборудования, аппаратуры связи от воздействия ЭМИ искусственного происхождения, для защиты микросхем от внутренних электрических нагрузок по напряжению, от статического электричества, а также TVS-диоды с малой индуктивностью и емкостью. В настоящее время в мире выпускается около

3000 типономиналов TVS-диодов с импульсной мощностью от 0,15 до 60 кВт на напряжение пробоя от 6,0 до 3000 В.

TVS-диоды TRANSZORB® фирмы General Semiconductor

TVS-диоды TRANSZORB® фирмы General Semiconductor выпускаются в различных исполнениях, с учетом условий эксплуатации и области применения. Дискретные диоды в пластиковом корпусе с гибкими выводами, предназначенными для монтажа в сквозные отверстия, выпускаются со значениями максимальной допустимой импульсной мощности 400 Вт, 500 Вт, 600 Вт, 1,5 кВт и 5 кВт. Диоды с наибольшими значениями максимальной допустимой импульсной мощности обычно используются для установки в цепях питания. При более низких значениях мощности в приложениях с высокой плотностью расположения компонентов используются диоды и диодные сборки, которые выпускаются как в DIP-корпусах, так и в корпусах для поверхностного монтажа. Они выпускаются со значениями максимальной допустимой импульсной мощности 400 Вт, 500 Вт, 600 Вт, 1, кВт и 5 кВт. Диодные сборки обычно используются на линиях передачи данных для защиты портов ввода/вывода от электростатических разрядов. Кроме того, выпускаются специализированные низкеемкостные TVS-диоды, применяемые в цепях с высокой скоростью передачи данных с целью предотвращения затухания полезных сигналов. TVS-диоды TRANSZORB® выпускаются для работы в цепях с рабочими напряжениями от 5 до 376 В. Ввиду широкого диапазона возможных рабочих напряжений и допустимых номинальных мощностей (так же, как и перенапряжений) TVS-диоды TRANSZORB® используются в различных электронных схемах и приложениях.

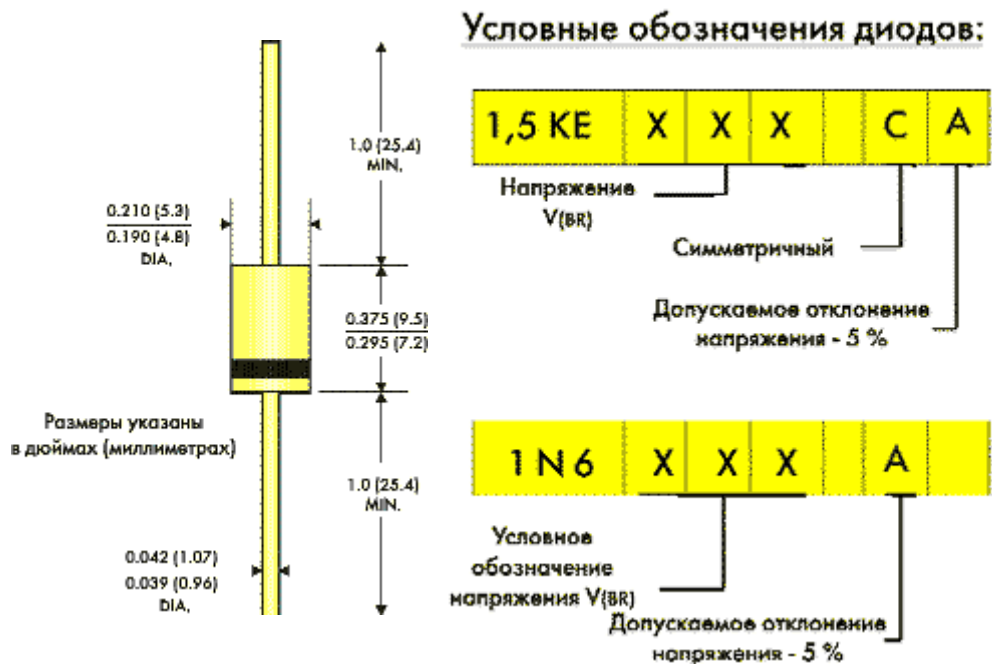
Дискретные TVS-диоды TRANSZORB®

Дискретные TVS-диоды TRANSZORB® предназначены для защиты чувствительных электронных компонентов от импульсных перенапряжений, вызываемых электростатическими, коммуникационными и грозовыми разрядами. Все серии дискретных TVS-диодов выпускаются с гибкими выводами для монтажа в сквозные отверстия, в пластиковом корпусе с защитой полупроводникового перехода пассивирующим слоем стекла. Рекомендуемая температура пайки диодов — 265°C/10 с.

Они характеризуются широким диапазоном рабочих напряжений (от 5,0 до 376 В) и напряжениями ограничения (от 6,0 до 440 В), малым временем срабатывания (для симметричных диодов — 1×10^{-9} с), способностью подавлять импульсы перенапряжений высокой мощности (до 1500 Вт при форме импульса 10/1000 мкс). Это позволяет использовать их для защиты телекоммуникационного оборудования, цифровых интерфейсов и др. в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки.

TVS-диоды TRANSZORB® серии 1.5KE6.8–1.5KE440CA (1N6267–1N6303A)

Диоды серии 1,5KE6,8–1,5KE440CA выпускаются в симметричном и несимметричном исполнении. В обозначении симметричного диода добавляется суффикс С или СА. Например, 1,5KE6,8С, 1,5KE440СА. Серия 1N6267–1N6303A выпускается только в несимметричном исполнении.



Габаритный чертеж

Условные обозначения диодов

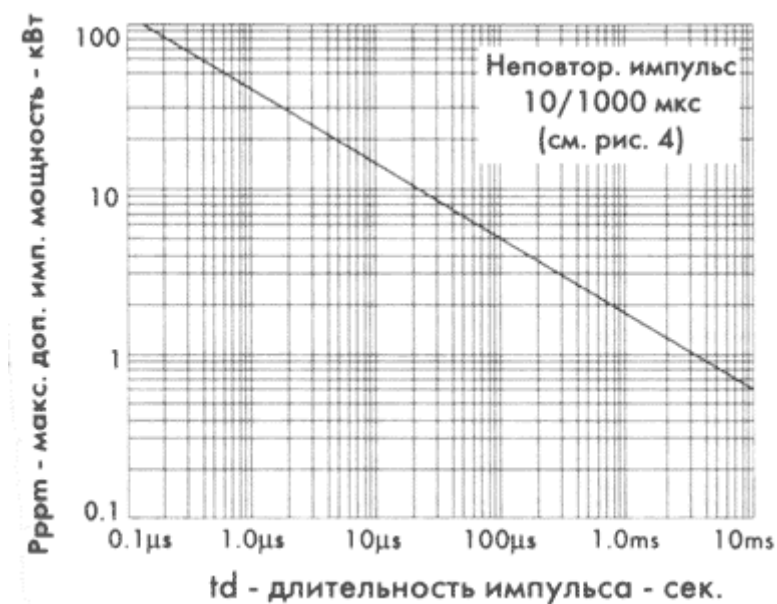


Рис. 6. Зависимость P_{rpm} от t_d для серий дискретных TVS-диодов серии 1.5KE6.8-1.5KE440CA (1N6267-1N6303A)

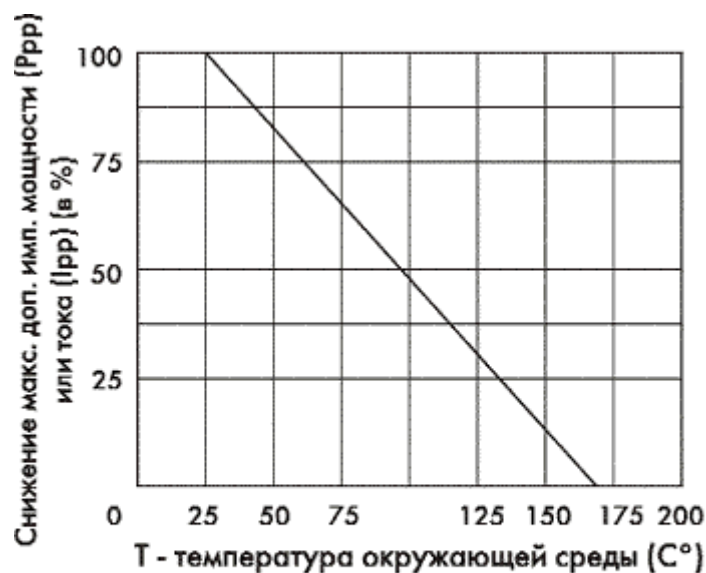


Рис. 7. Зависимость P_{pp} или I_{pp} от T для серий дискретных TVS-диодов серии 1.5KE6.8 - 1.5KE440CA (1N6267 - 1N6303A)

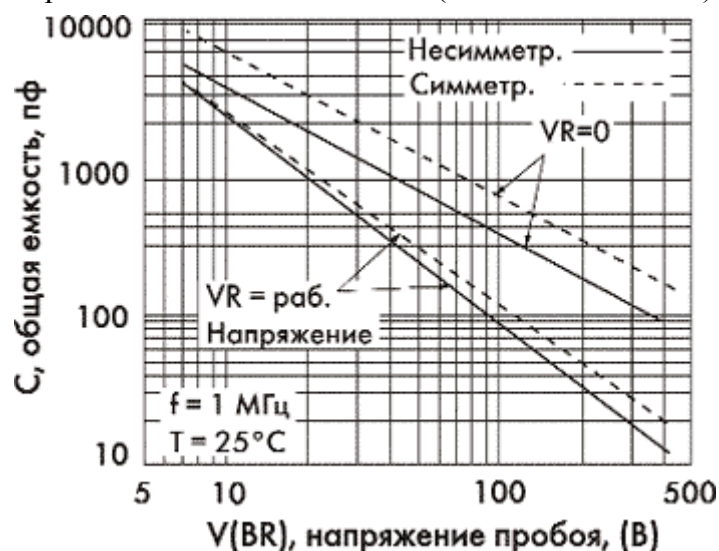


Рис. 8. Зависимость C от $V_{(BR)}$ для серий дискретных TVS-диодов серии 1.5KE6.8 - 1.5KE440CA (1N6267 - 1N6303A)

TVS-диоды TRANSZORB® серии ICTE 5.0–ICTE 15C (1N6273–1N6377 и 1N6382–1N6385)

Диоды выпускаются в симметричном и несимметричном исполнении. Электрические параметры несимметричных и симметричных диодов этой серии указаны в табл. 4 и 5.

Таблица 4. Электрические параметры несимметричных диодов

Тип (JEDEC)	Тип (General Semiconductor)	Постоянное обратное напряжение V_{WM} (В)	Мин. ⁽³⁾ напряжение пробоя при токе 1 мА $V_{(BR)}$ (В)	Макс. обр. ток при V_{WM} I_D (мкА)	Макс. напряжение ограничения при $I_{PPM}=1,0$ А V_C (В)	Макс. напряжение ограничения при $I_{PPM}=10$ А V_C (В)	Макс. имп. ток ограничения I_{PPM} (А)
1N6373(2)	ICTE-5(2)	5,0	6,0	300	7,1	7,5	160
1N6374	ICTE-8	8,0	9,4	25,0	11,3	11,5	100
1N6375	ICTE-10	10,0	11,7	2,0	13,7	14,1	90
1N6376	ICTE-12	12,0	14,1	2,0	16,1	16,5	70
1N6377	ICTE-15	15,0	17,6	2,0	20,1	20,6	60

Таблица 5. Электрические параметры несимметричных диодов

Тип (JEDEC)	Тип (General Semiconductor)	Постоянное обратное напряжение V_{WM} (В)	Мин. ⁽³⁾ напряжение пробоя при токе 1 мА $V_{(BR)}$ (В)	Макс. обр. ток при V_{WM} I_D (мкА)	Макс. напряжение ограничения при $I_{PPM}=1,0$ А V_C (В)	Макс. напряжение ограничения при $I_{PPM}=10$ А V_C (В)	Макс. имп. ток ограничения I_{PPM} (А)
1N6382	ICTE-8C	8,0	9,4	50,0	11,4	11,6	100
1N6383	ICTE-10C	10,0	11,7	2,0	14,1	14,5	90
1N6384	ICTE-12C	12,0	14,1	2,0	16,7	17,1	70
1N6385	ICTE-15C	15,0	17,6	2,0	20,8	21,4	60

Таблица 6. Электрические параметры симметричных диодов

Параметр	Обозначение	Значение параметра	Единица измерения
Макс. имп. Мощность (имп.-10/1000 мкс) ⁽¹⁾	P_{ppm}	мин. 1500	Вт
Макс. имп. Ток (имп. -10/1000 мкс) ⁽¹⁾	I_{ppm}	см. следующую таблицу	А
Постоянна рассеиваемая мощность при $T=75^\circ$, длине выводов 9,5 мм	$P_{m(av)}$	6,5	Вт
Макс. прямой ток, только для несимметричных диодов ⁽²⁾	I_{FSM}	200	А
Макс. имп. прямое напряжение при 100 А, только для несимметричных диодов ⁽²⁾	V_F	3,5/5,0	В
Температура окружающей среды	T	-55...+175	$^\circ\text{C}$

Примечание.

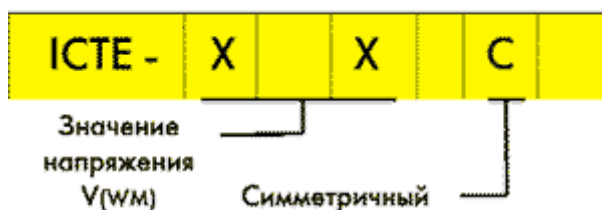
1. Симметричные диоды в обозначении имеют суффикс "С".
2. Диоды ICTE-5 и 1N6373 выпускаются только в несимметричном исполнении.
3. Указанное минимальное напряжение пробоя имеет допуск ± 1 Вольт.

4. Коэффициент ограничения ($K_{огр.}$): не превышает 1,33 при мощности равной $P_{имп.макс}$ и не превышает 1,2 при $0,5 P_{имп.макс}$. $K_{огр.}$ - отношение V_C/V_{BR} .

Габаритный чертеж, предельные эксплуатационные характеристики аналогичны описанным для серии 1.5KE6.8–1.5KE440CA (1N6267–1N6303A).

Условные обозначения диодов 1N6273–1N6377 и 1N6382–1N6385 соответствуют обозначению серии 1Nxx.

Условное обозначение диодов серии ICTE-5.0 - ICTE 15C:



Условное обозначение диодов серии ICTE-5.0 - ICTE-15C

Графики, показывающие зависимость максимальной допустимой импульсной мощности (P_{ppm}) от длительности импульса (t_d) и зависимость P_{ppm} (I_{pp}) от температуры окружающей среды (T), аналогичны приведенным для диодов серии 1.5KE6.8–1.5KE440CA (1N6267–1N6303A).

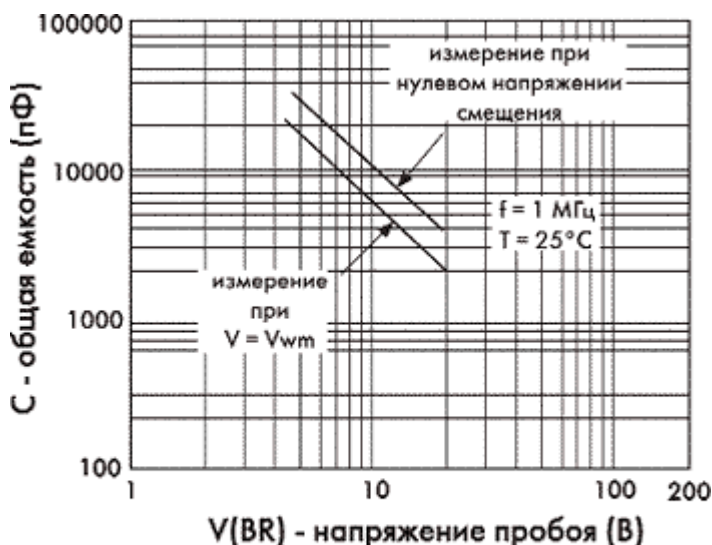


Рис. 9. Зависимость C от $V(BR)$ для несимметричных дискретных TVS-диодов серии ICTE5.0 - ICTE15 (1N6273 - 1N6377)

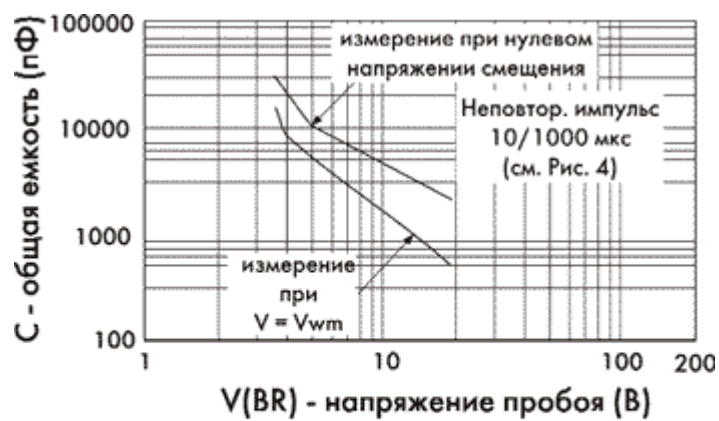


Рис. 10. Зависимость C от $V(BR)$ для симметричных дискретных TVS-диодов серии ICTE8.0C - ICTE15C (1N6282 - 1N6385)