



## 1.9. ДИОДЫ В ИП И ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

В источниках электропитания диоды используются для выпрямления переменного напряжения, обеспечения проводимости и блокировки транзисторных ключей в обратном направлении. Основными характеристиками диодов являются *обратное напряжение*, *время восстановления обратного напряжения* и *допустимый прямой ток*. При импульсном характере тока с большой скважностью проверяется соответствие максимального значения тока допустимому уровню для заданных значений длительности, частоты повторения или скважности импульсов.

Потери мощности  $P_{\text{пр.ст}}$  в диоде при прямом включении в статическом режиме работы определяются по формуле:

$$P_{\text{пр.ст}} = \Delta U_{\text{пр}} I_{\text{пр.ср}},$$

где  $\Delta U_{\text{пр}}$  – падение напряжение на диоде при среднем значении тока  $I_{\text{пр.ср}}$ .

При частоте коммутации, равной десяткам и сотням килогерц, диод должен иметь малое время перехода из открытого состояния в закрытое. Это время определяет *динамические потери* диода и максимальное значение *всплеска тока* ключевого транзистора инвертора, при отпирании которого происходит выключение диода.

В источниках электропитания с входным напряжением 380 В трехфазного тока частоты 50 Гц рабочее напряжение может достигать 600 В. В таких цепях используются диоды с допустимым рабочим напряжением не ниже 1000 В. Чтобы обеспечить указанное рабочее напряжение, кремний и-типа для изготовления диодов должен иметь удельное сопротивление  $\rho \approx 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , что соответствует концентрации донорной примеси  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . При работе в составе инвертора время восстановления обратного сопротивления диодов  $t_{\text{вос.обр}}$  должно быть в несколько раз меньше времени включения  $t_{\text{вкл}}$  транзисторов. Если время  $t_{\text{вкл}}$  составляет примерно 1 мкс, то время  $t_{\text{вос.обр}}$  не должно превышать 0,25...0,3 мкс. При этом время восстановления обратно пропорционально концентрации золота в кремнии. Увеличение концентрации золота приводит к улучшению частотных свойств, но в то же время повышается прямое напряжение диодов. Когда концентрация золота становится соизмеримой с концентрацией доноров удельное сопротивление крем-



ния резко возрастает. Для исходного кремния с сопротивлением  $\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и удельными концентрациями золота и доноров  $N_3=N_d=10^{14} \text{ см}^{-3}$  минимальное значение времени восстановления  $t_{\text{вос.обр min}}$  определяется зависимостью:

$$t_{\text{вос.обр min}} = 2,5 \cdot \frac{10^7}{N_3} = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Таким образом, время восстановления диодов с обратным напряжением  $U_{\text{обр}} \geq 1000 \text{ В}$  не может быть получено менее  $0,25 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$

Характеристики выпрямительных диодов со средним значением прямого тока менее  $10 \text{ А}$  приведены в табл. 1.9.1, а диодов со средним значением прямого тока более  $10 \text{ А}$  – в табл. 1.9.2.

Таблица 1.9.1.

Характеристики диодов со средним значением прямого тока не более  $10 \text{ А}$

Тип диода	Максимально допустимое постоянное (импульсное) обратное напряжение, В, не более	Максимально допустимый средний прямой ток, А, не более	Максимально допустимый импульсный прямой ток, А, не более	Предельная (рабочая) частота, кГц, не более	Время обратного восстановления, мкс, не более
2Д303А	420 (600)	10	100	1	–
2Д303Б	560 (800)				
2Д303В	560 (800)				
2Д303Г	700 (1000)				
2Д303Д	700 (1000)	0,4	0,8	50	1,5
2Д204А	400 (400)				
2Д204Б	200 (200)				
2Д204В	50 (50)	1	2	(1)	10
2Д206А	400	5	100		
2Д206Б	500				



2Д206В	600				
2Д210А	800				
2Д210Б	800	10	50	(1)	–
2Д210В	1000				
2Д210Г	1000				
2Д212А	200 (200)	1	50	100	0,3
2Д212Б	100 (100)				
2Д213А	200 (200)	10	100	100	0,3
2Д213Б	200 (200)				0,17
2Д213В	100 (100)				0,3
2Д213Г	100 (100)				0,17
2Д219А	15 (15)	10	250	(200)	–
2Д219Б	20 (20)				
2Д220А	400 (400)	3	60	(20)	1
2Д220Б	600 (600)				
2Д220В	800 (800)				
2Д220Г	1000 (1000)				
2Д220Д	400 (400)				
2Д220Е	600 (600)				
2Д220Ж	800 (800)				
2Д220И	1000 (1000)				
2Д222А С	20 (20)				
2Д222БС	30 (30)				
2Д222ВС	40 (40)				
2Д222ГС	20 (20)				
2Д222Д С	30 (30)				
2Д222ЕС	40 (40)				
2Д230А	400 (400)	3	60	(500)	0,5
2Д230Б	600 (600)				
2Д230В	800 (800)				
2Д230Г	1000 (1000)				
2Д230Д	400 (400)	3	60	20	1
2Д230Е	600 (600)				



2Д230Ж	800 (800)				
2Д230И	1000 (1000)				
2Д230К	200 (200)			50	0,05
2Д120Л	100 (100)				0,5
2Д231А	150 (150)	10	15I <sub>пр. ср.</sub>	(200)	0,05
2Д231Б	200 (200)				0,05
2Д231В	150 (150)				0,1
2Д231Г	200 (200)				0,1
2Д234А	100 (100)	3	30	–	0,04
2Д234Б	200 (200)				
2Д234В	(400)				
2Д236А	600 (600)	1	30	(100)	0,115
2Д236Б	800 (800)				0,15
2Д237А	100 (100)	1	3	(300)	0,05
2Д237Б	200 (200)				
2Д238А	25 (25)	7,5	15	(200)	–
С					
2Д238БС	35 (35)				
2Д238ВС	45 (45)				
2Д245А	400 (400)	10	100	(200)	0,07
2Д245Б	200 (200)				
2Д251А	(50)				
2Д251Б	(70)				0,05
2Д251В	(100)				
2Д251Г	(50)	10	15I <sub>пр. ср.</sub>	(200)	
2Д251Д	(70)				0,1
2Д251Е	(100)				
2Д253А	800 (800)	3	10		
2Д253Б	800 (800)	1	3		
2Д253В	600 (600)	3	10	100	0,22
2Д253Г	600 (600)	1	3		
2Д253Д	400 (400)	3	10		
2Д253Е	400 (400)	1	10		
2Д254А	1000 (1000)	1	3	150	0,5-0,2
2Д254Б	800 (800)				
2Д254В	600 (600)				



2Д254Г	400 (400)				
2Д510А	50 (70)	0,2	1,5	–	0,004
2Д522Б	50 (75)	0,1	1,5	–	0,004
2Д255А-5	60 (60)	3	6	(1000)	–
2Д255Б-5	80 (80)				
2Д255В-5	100 (100)				

По мере увеличения рабочей частоты преобразователей повышаются требования к частотным свойствам диодов выпрямителей. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют *диоды Шоттки*. При выпрямлении токов до 30 А в цепях электропитания с напряжением 5 В широкое применение находят диоды типа 2Д2998 (см. табл. 1.9.2). Они отличаются малым падением напряжения при прямом токе ( $U_{пр} \leq 0,68$  В) и сравнительно широким диапазоном рабочих частот (до 200 кГц). Эти диоды допускают параллельную работу, поэтому выпрямленный ток может быть увеличен параллельным включением любого числа диодов без применения выравнивающих компонентов. При этом суммарный средний прямой ток через диоды не должен превышать 0,7 от суммы максимально допустимых значений средних прямых токов для соответствующей температуры корпуса [17].



Таблица 1.9.2.

Характеристики диодов со средним значением прямого тока более  
10 А

Тип диода	Максимально допустимое постоянное (импульсное) обратное напряжение, В, не более	Максимально допустимый средний прямой ток, А, не более	Максимально допустимый импульсный прямой ток, А, не более	Предельная (рабочая) частота, кГц, не более	Время обратного восстановления, мкс, не более
2Д239А	100 (100)	15	80	500	0,05
2Д239Б	150 (150)				
2Д239В	200 (200)				
2Д990А	600 (600)	20	100	(200)	0,15
2Д2990Б	400 (400)				
2Д2990В	200 (200)				
2Д2997А	200 (250)	30	100	(100)	0,2
2Д2997Б	100 (200)				
2Д2997В	50 (100)				
2Д2999А	200 (250)	20	100	(100)	0,2
2Д2999Б	100 (200)				
2Д2999В	50 (100)				
2Д252А	80 (80)	30	60	(10-200)	–
2Д252Б	100 (100)	30	60		
2Д252В	120 (120)	20	40		
2Д299А	50 (50)	25	–	(20-200)	0,05
2Д2995Б	70 (70)				
2Д299В	100 (100)				
2Д2995Г	150 (150)				
2Д299Д	200 (200)				
2Д2995Е	100 (100)				
2Д288Ж	150 (150)			30	600
2Д299И	200 (200)				
2Д299А	15				
2Д2998Б	25				



2Д299В	23				
2ДЧ103-100	(20...150)	100	–	–	0,05
2ДЧ103-125		125			0,1
2ДШ11-32Х	(20;30;40)	40	–	–	0,032
2ДШ11-40Х		40			
2ДШ11-50Х		50			
2ДШ11-63Х		63			

Диоды 2Д2995 применяются при обратном напряжении от 50 до 200 В в зависимости от исполнения при токе до 25 А. Предельная рабочая частота составляет 200 кГц. Таким образом, диоды 2Д2995 и 2Д2998 можно использовать в схемах выходных выпрямителей при рабочей частоте инвертора до 100 кГц.

В табл. 1.9.2 приведены также характеристики диодов типа 2ДЧ103. Зарубежные аналоги этих диодов в литературе называют High efficiency fast или Low-loss, т.е. высокоэффективными сверхбыстродействующими или с низкими потерями. При токах 100 и 125 А импульсное прямое напряжение нормируется значением 1,2 В (фактически это напряжение не превышает 0,9 В).

В схемах выпрямления ИЭП на базе инверторов часто применяется электрическое объединение диодов со стороны катодов, поэтому в качестве выходных выпрямителей используются диодные сборки.

Последовательно соединенные диоды конструктивно и электрически образуют *высоковольтные столбы*, особенностью которых является различное время жизни неосновных носителей. Этим определяется различие времени восстановления обратного сопротивления  $t_{\text{вос.обр}}$  при изменении полярности напряжения с прямой на обратную. Напряжение на диодах, имеющих меньшее время восстановления, достигает пробивного значения  $U_{\text{проб}}$  в первую очередь. Восстановившиеся диоды переходят в режим лавинного пробоя и находятся в этом режиме до восстановления остальных диодов. Таким образом, время, в течение которого в диодах выделяется повышенная мощность, определяется разностью промежутков времени восстановления  $\Delta t_{\text{вос.обр}}$ . В отдельных образцах. В реальных образцах высоковольтных диодов (например, 2Д226, 2Д230) эта разность может быть значительной.

Мощность тепловых потерь в диоде определяется выражением:



$$P = iU_{л},$$

где  $i$  – ток через  $p$ - $n$ -переход;  $U_{л}$  – напряжение лавинного пробоя.

Изменение тока через диод зависит от длительности фронта импульса обратного напряжения:

$$i(t) = I_{пр.и}(t/t_{\phi}),$$

где  $I_{пр.и}$  – значение импульса прямого тока, проходящего через диод в момент подачи на него обратного напряжения.

Средняя мощность  $P_{ср}$  тепловых потерь за промежуток времени  $\Delta t_{вос.обр}$  определяется из уравнения:

$$P_{ср} = \frac{1}{T} I_{пр.и} U_{л} \int_{t_{в\ min}}^{t_{в\ max}} (t/t_{\phi}) dt = I_{пр.и} U_{л} f \frac{t_{вос.обр\ max}^2 - t_{вос.обр\ min}^2}{2t_{\phi}},$$

где  $T$  – период следования импульсов тока через диод.

Число диодов, перешедших в режим лавинного пробоя, определяется напряжением  $U$ , приложенным к высоковольтному столбу. При  $U=U_{л}$  мощность тепловых потерь последовательно соединенных диодов:

$$P_{ср} = I_{пр.и} U f \frac{t_{вос.обр\ max}^2 - t_{вос.обр\ min}^2}{2t_{\phi}}.$$

С учетом зависимостей:

$$t_{вос.обр\ max} - t_{вос.обр\ min} = \Delta t_{вос.обр};$$

$$(t_{вос.обр\ max} - t_{вос.обр\ min})/2 = t_{вос.обр,ср},$$

где  $t_{вос.обр,ср}$  – среднее время восстановления, получим:

$$P_{ср} = I_{пр.и} U f \frac{t_{вос.обр,ср} \Delta t_{вос.обр}}{t_{\phi}}.$$

После окончания первой фазы восстановления при переключении диода из прямого направления на обратное он переходит в режим лавинного пробоя, поэтому максимальное значение времени восстановления  $t_{вос.обр\ max}$  можно принять равным длительности его первой фазы:

$$t_{вос.обр1} = [0,5 - 0,33 \exp(-t_{\phi,д}/\tau_{эф})] \tau_{эф},$$



где  $t_{\text{ф.д.}}$  – длительность фронта, отнесенная к одному диоду;  $\tau_{\text{эф}}$  – эффективное значение времени жизни неосновных носителей.

С учетом уравнения  $t_{\text{вос.обр1}}$  зависимость  $P_{\text{ср}}$  принимает вид:

$$P_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{пр.и}} U f}{t_{\text{ф}}} [0,5 - 0,33 \exp(-t_{\text{ф.д.}}/\tau_{\text{эф max}}) \tau_{\text{эф max}] \tau_{\text{эф}} \times \\ \times \{0,5 \Delta \tau_{\text{эф}} - 0,33 [-\tau_{\text{эф max}} \exp(-t_{\text{ф.д.}}/\tau_{\text{эф max}}) - \\ - \tau_{\text{эф min}} \exp(-t_{\text{ф.д.}}/\tau_{\text{эф min}})]\}.$$

В режиме переключения номинального тока значение  $\tau_{\text{эф}}$  можно принять равным значению  $t_{\text{вос.обр}}$ . В этом случае при длительности фронта  $t_{\text{ф}} \approx \tau_{\text{эф}} = 0,3$  мкс (характерной для диодов типа 2Д226) выделяемая в столбе мощность:

$$P_{\text{ср}} = 5 \cdot 10^{-3} I_{\text{пр.и}} U f \Delta t_{\text{вос.обр}}$$

Таким образом, по известной разности промежутков времени восстановления можно определить мощность тепловых потерь. Выражение  $P_{\text{ср}}$  позволяет также решить обратную задачу: по заданному значению  $P_{\text{ср}}$  определить  $\Delta t_{\text{вос.обр}}$  и выбрать тип диодов [1].