

Коэффициент трансформации трансформатора равен:

$$k_{тр} \approx \frac{U_{тр. макс}}{E_d} = \frac{244,2}{48} = 5,09.$$

Таким образом, получаем:

$$I_{т} = k_{тр} I_{тр. макс} = 5,09 \cdot 10 = 50,9 \text{ А};$$

$$R^* = E_d / I_{т} = 48 / 50,9 = 0,944 \text{ Ом}.$$

Будем считать допустимым, что максимальный ток тиристора в интервале коммутации в 2 раза превышает наибольший коммутируемый ток, т. е. $I^*_{макс.к} = I_{т. макс.к} / I_{т. макс} = 2$, тогда в соответствии с рис. 5.13 получим:

$$L^*_к = 2 \text{ и } C^*_к = 2,4,$$

т. е.

$$L_к = L^*_к R^* t_{вос} = 2 \cdot 0,944 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 94,4 \text{ мкГн};$$

$$C_к = C^*_к t_{вос} / R^* = \frac{2,4 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{0,944} = 127 \text{ мкФ}.$$

Проверка затухания циркулирующего тока. Поскольку обратные диоды присоединены к ответвлениям от 5% витков обмотки трансформатора, демпфирующее напряжение равно:

$$U_{дем} = E_d 0,05 = 48 \cdot 0,05 = 2,4 \text{ В}.$$

Циркулирующий ток (см. задачу 5.16) равен:

$$I_{д}(0) = 50,9 \text{ А}.$$

Время затухания циркулирующего тока равно:

$$t_3 = \frac{L_к I_{д}(0)}{2U_{дем}} = \frac{94,4 \cdot 10^{-6} \cdot 50,9}{2 \cdot 2,4} = 1000 \cdot 10^{-6} = 1000 \text{ мкс},$$

т. е. $t_3 < T/2 = 10 \text{ мс}$.

Таким образом, можно считать, что циркулирующий ток затухает удовлетворительно.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЗАЩИТА СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

6.1. ПОДРОБНЫЙ ОБЗОР

Защита силовых полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров и т. д.) осуществляется дополнительными элементами, включенными в основную схему преобразователя. С помощью этих элементов нагрузка на полупроводниковый прибор удерживается в допустимых пределах.

Допустимые нагрузки обычно ограничиваются температурами слоев в силовых полупроводниковых приборах, т. е. рассеиваемой мощностью, которая определяется то-

ками, проходящими через полупроводниковый прибор в открытом состоянии, а также напряжением на приборе в закрытом состоянии. Соответственно различаются два типа защиты: защита от сверхтоков и защита от перенапряжений.

Защита от сверхтоков. Длительное протекание сверхтоков через полупроводниковый прибор вызывает перегрев полупроводникового кристалла во всем его объеме, в то время как кратковременное нарастание тока, вы-

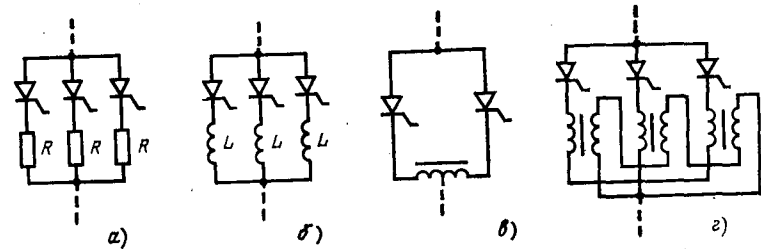


Рис. 6.1. Делители тока.

а) резисторный; б) индуктивный; в) магнитосвязанный индуктивный; г) трансформаторный.

званное включением (высокое значение di/dt), приводит к местному перегреву. Перегрузки по току могут быть постоянными и кратковременными.

В параллельно соединенных силовых полупроводниковых приборах постоянная перегрузка может, например, произойти из-за несимметричного распределения тока вследствие различий в характеристиках приборов. Чтобы избежать таких перегрузок по току, необходимо обеспечить равномерное распределение тока между приборами тока. Широко применяемые на практике схемы включают делители: резисторного типа (рис. 6.1,а), индуктивные (рис. 6.1,б), магнитосвязанные индуктивные (рис. 6.1,в) и трансформаторные (рис. 6.1,г). Резисторные делители — это достаточно простые приборы, но у них есть недостаток: они вызывают дополнительные потери. Индуктивные делители вызывают увеличение угла коммутации. У магнитосвязанных делителей и делителей, встроенных в трансформатор, эти недостатки значительно уменьшены, но эти делители требуют большего расхода материалов и затрат труда для изготовления и более дорогостоящи.

Другой причиной появления постоянной перегрузки управляемых полупроводниковых приборов, соединенных параллельно, может служить разброс времен включения элементов или моментов поступления управляющих сигналов. Асимметрия времен включения может быть уменьшена при использовании управляющих импульсов с крутыми фронтами и большими амплитудами. Одновременность приложения управляющих сигналов может быть обеспечена, например, применением общего генератора управляющих импульсов.

Остающаяся асимметрия времен включения не вызывает вредного перегрева, если скорость нарастания тока di/dt в полупроводниковом приборе, который включается первым, ограничивается так, что при максимальном разбросе времен включения она остается ниже определенного предела. Это могут обеспечивать делители тока, показанные на рис. 6.1,б — 2.

Появление кратковременного сверхтока обычно вызывается КЗ на стороне нагрузки или преобразователе. КЗ внутри преобразователя может быть вызвано также в результате пробоя или пропуска включения полупроводникового вентиля. Нарастание тока в цепи КЗ ограничивается демпфирующими реакторами, а ток КЗ отключается при помощи быстродействующих выключателей постоянного тока и предохранителей до того момента, когда может произойти повреждение силовых полупроводниковых приборов.

Включение управляемых силовых полупроводниковых приборов (тиристоров, симметричных полупроводниковых тиристоров и т. д.) может привести к быстрому нарастанию тока (высокому значению di/dt), особенно если момент включения совпадает с большим значением прямого напряжения. Поскольку скорость увеличения проводящего поперечного сечения тиристора во включаемом полупроводниковом приборе ограничена, местная плотность тока и сопутствующий ей местный нагрев могут сохраняться в допустимых пределах только благодаря ограничению скорости нарастания тока до значений, нормированных изготовителем. Поэтому индуктивность контура, замыкаемого полупроводниковым прибором, который начинает проводить ток (т. е. индуктивность контура коммутации в преобразователях с естественной или принудительной коммутацией или индуктивность цепи, через которую включается нагрузка на пре-

образователе), не должна снижаться ниже предела, определенного этим условием. У большинства преобразователей требуемая индуктивность обеспечивается в первую очередь элементами главной схемы (индуктивностью рассеяния трансформаторов и индуктивностью реакторов, ограничивающих ток КЗ), так что никакой другой индуктивности не требуется.

В соответствии с предписаниями стандарта DIN в каталогах на полупроводниковые приборы указывается критическая скорость нарастания тока $\left(\frac{di}{dt}\right)_{кр}$ при следующих условиях:

температура кристалла — максимально допустимая; амплитуда нарастающего тока не превышает трехкратного номинального тока;

прямое напряжение вентиля $U_{пр}$ непосредственно перед включением не превышает 67% повторяющегося прямого напряжения;

частота повторения включений 50 Гц; управляющий импульс удовлетворяет условиям по скорости нарастания тока, амплитуды и длительности, указанным для данного вентиля в каталоге.

Если скорость нарастания тока не превышает критического значения, то до какого-то данного уровня напряжения повреждение полупроводникового прибора произойти не может. Однако если непосредственно перед включением тиристора приложенное к нему прямое напряжение превышает этот уровень (обычно он устанавливается равным 600 В), то допустимое в эксплуатации значение di/dt должно быть ниже критического значения. Связь этого напряжения с коэффициентом снижения di/dt дается в каталогах; для тиристорov, о которых идет речь в рассматриваемых ниже задачах, она показана графически на рис. 6.2 [39].

Защита от перенапряжений. В оборудовании силовой электроники правильная работа и защита элементов требуют, чтобы повышения напряжения на силовых полупроводниковых приборах (амплитуды напряжения) и скорости нарастания прямого напряжения (du/dt) поддерживались в нормируемых пределах. Защита по напряжению, таким образом, может быть подразделена на защиту от перенапряжений и на защиту от чрезмерных скоростей нарастания прямого напряжения. Некоторые перенапряжения повторяются периодически, на-

пример коммутационные перенапряжения, обусловленные накоплением зарядов в полупроводниковых элементах или неравномерностью распределения напряжений по элементам на последовательно соединенных силовых полупроводниковых приборах. Другие перенапряжения

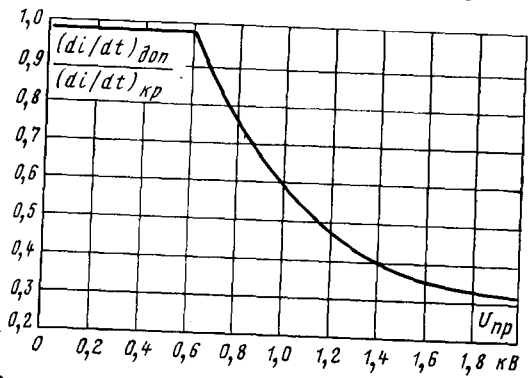


Рис. 6.2. Зависимость максимально допустимого отношения скорости нарастания тока тиристора di/dt к критическому значению di/dt от прямого напряжения на тиристоре непосредственно перед включением.

возникают случайно: грозовые или коммутационные перенапряжения в сетях, перенапряжения вследствие отключения тока намагничивания при отключении трансформатора, перенапряжения, вызванные срабатыванием предохранителей или отключением выключателей, внут-

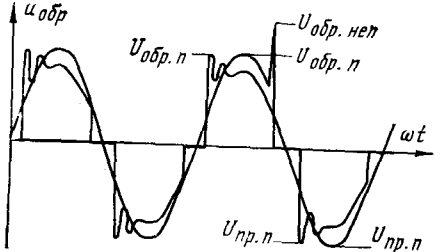


Рис. 6.3. Определение параметров силовых полупроводниковых приборов по напряжению.

ренним КЗ или перегрузкой преобразователя. Перенапряжения в диоде могут возникнуть только в обратном направлении, в то время как в управляемом полупроводниковом приборе они могут возникнуть в обоих направлениях. В каталогах номинальные напряжения нормируются следующим образом [39, 40]: обратное повторяющееся напряжение $U_{обр.п}$ — это максимально допу-

стимое мгновенное значение напряжения, периодически прикладываемого к тиристору или диоду в обратном направлении; прямое повторяющееся напряжение $U_{пр.п}$ — это максимально допустимое мгновенное значение напряжения, периодически прикладываемого к тиристору в прямом направлении; неповторяющиеся напряжения $U_{обр.нп}$ и $U_{пр.нп}$ — это максимально допустимые мгновенные значения любого напряжения, нерегулярно прикладываемого к полупроводниковому прибору соответственно в обратном и прямом направлениях.

Перечисленные параметры пояснены на рис. 6.3. Скорость нарастания прямого напряжения на тиристоре также не должна превышать значений, нормированных изготовителем, так как в противном случае емкостные токи, появляющиеся в $p-n$ -переходах, могут при-

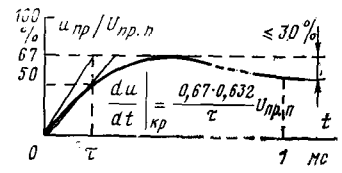


Рис. 6.4. Диаграмма прямого напряжения при определении критического значения du/dt .

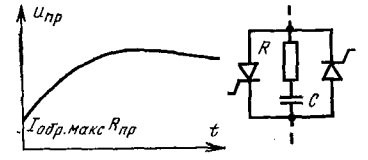


Рис. 6.5. Форма кривой напряжения встречно-параллельно соединенных тиристорov.

вести к самопроизвольному включению тиристора. Сравнительно медленное включение может привести к большим потерям при включении и повреждению вентиля. Поэтому в каталогах приводится также максимально допустимая скорость нарастания прямого напряжения $(\frac{du}{dt})_{кр}$.

Критическое значение du/dt обычно дается для экспоненциально-нарастающей волны напряжения, показанной на рис. 6.4. На рисунке видно, что начальная, максимальная скорость нарастания напряжения может быть больше в $1/0,632$ раза критического значения du/dt при условии, что наибольшее мгновенное значение прямого запирающего напряжения $u_{пр}$ на вентиле не превышает в конце нарастания $0,67 U_{пр.п}$. На практике оговаривается, что начальная скорость нарастания du/dt должна быть ниже критического значения. Опыт показал, что в этом случае не возникает случайных включе-

ний, даже если прямое напряжение на вентиле находится в пределах между $0,67 U_{пр.п}$ и $1,0 U_{пр.п}$.

В некоторых схемах (например, в прерывателях переменного тока на тиристорах) резкое прекращение обратного тока одного тиристора приводит к росту напряжения в прямом направлении на другом тиристоре со скоростью, превышающей критическое значение (рис. 6.5). Однако это явление не вызывает самопроизвольного включения, если возрастающее напряжение не превышает

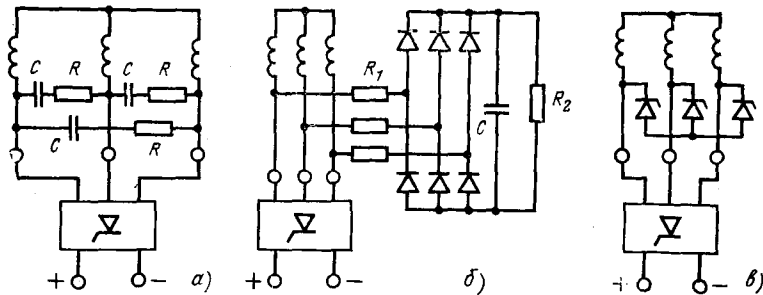


Рис. 6.6. Типичные схемы защиты преобразователей от сетевых перенапряжений и перенапряжений при отключении трансформатора. а) RC-цепочки, соединенные в треугольники; б) RC-цепочки со вспомогательным выпрямителем; в) селеновые ограничители перенапряжений, соединенные в звезду.

ет определенного значения. Это значение нормируется в более подробных каталогах или справочниках некоторых фирм изготовителей (например, фирм Siemens и ВВС) [41]. Если такое значение не указывается, оно может быть принято между 20 и 50 В.

В качестве защиты от перенапряжений, возникающих в сетях, и перенапряжений, возникающих вследствие отключения преобразовательного трансформатора, обычно используют RC-контуры, присоединенные на вентильной стороне трансформатора (рис. 6.6,а), RC-контуры, присоединенные через вспомогательный выпрямитель (рис. 6.6,б) или селеновый ограничитель перенапряжения (рис. 6.6,в). Если преобразователь присоединен непосредственно к сети, без трансформатора, эти защитные элементы должны быть присоединены к главной схеме через дополнительную индуктивность [5, 8].

Из-за наличия емкостных связей между обмотками почти все междуфазное напряжение может появиться на вторичных выводах питающего трансформатора, присоеди-

единяемого к сети. Если трансформатор имеет большой коэффициент трансформации, это может привести к опасным перенапряжениям. Этого можно избежать при помощи шунтирования вторичных выводов трансформатора конденсаторами с емкостями, превышающими емкости обмоток (рис. 6.7), а также введения заземленного экрана между сетевой и вентильной обмотками трансформатора [2].

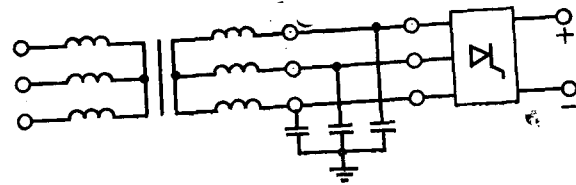


Рис. 6.7. Схема защиты от перенапряжений при отключении трансформатора с высоким коэффициентом трансформации.

В качестве защиты от коммутационных перенапряжений, возникающих вследствие накопления зарядов в полупроводниковых приборах, используются RC-цепочки, соединенные параллельно с полупроводниковыми приборами (рис. 6.8). При включении управляемого полу-

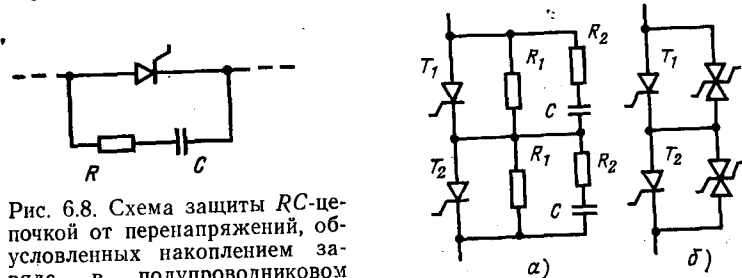


Рис. 6.8. Схема защиты RC-цепочкой от перенапряжений, обусловленных накоплением заряда в полупроводниковом приборе.

Рис. 6.9. Схемы защиты от перенапряжений последовательно соединенных силовых полупроводниковых приборов. а) делительная RC-цепочка; б) делительная цепочка из селеновых ограничителей перенапряжений.

проводникового прибора разрядный ток заряженного конденсатора C вызывает местные потери в полупроводниковом приборе. Изготовители обычно указывают либо минимальное значение R , необходимое для поддержания разрядного тока в допустимых пределах, либо макси-

мально допустимое значение броска разрядного тока [41, 42].

Если эти данные не нормированы, допускается выбирать сопротивление R в омах численно равным от 0,02 до 0,1 наибольшего прямого напряжения на вентиле в вольтах и максимальное значение разрядного тока конденсатора от 10 до 50 А для коммутационных конденсаторов обычного типа, присоединенных к тиристорам с допустимым средним значением тока не менее 50 А. Нижние значения сопротивлений и верхние значения бросков тока относятся к высокочастотным тиристорам.

В установившемся режиме различия в вольт-амперных характеристиках приводят к неравномерному делению напряжения по последовательно соединенным силовым полупроводниковым приборам. В переходном состоянии деление напряжения может быть неравномерным даже при одинаковых вольт-амперных характеристиках. Асимметрия вызывается разницей в запасенных зарядах при выключении полупроводниковых вентилей и разбросом времени включения при включении управляемых вентилей. Защита от перенапряжений последовательно соединенных вентилей может осуществляться с помощью RC -цепочек, как показано на рис. 6.9,а, или селеновых ограничителей перенапряжений, как показано на рис. 6.9,б [5, 8]. В схеме, показанной на рис. 6.9,а, омический делитель работает в установившемся режиме, а делитель с RC -цепочкой осуществляет деление напряжения во время переходных процессов (поскольку схема коммутации содержит и индуктивность). RC -цепочки одновременно служат для ограничения скорости нарастания прямого напряжения. Селеновый ограничитель перенапряжений, показанный на рис. 6.9,б, ограничивает перенапряжения как в установившемся режиме, так и при переходных процессах.

В преобразователях с естественной коммутацией, работающих в режиме прерывистой проводимости, RC -цепочки, присоединенные параллельно полупроводниковым приборам, недостаточно демпфируют перенапряжения, так как после окончания интервала проводимости в цепь переходного процесса оказывается включенным высокоиндуктивный сглаживающий реактор. Возникающие вследствие этого перенапряжения могут быть снижены, например, при помощи RC -цепочки, присоединенной к выводам преобразователя и образующей вместе со

сглаживающим реактором цепь с хорошим демпфированием (рис. 6.10).

Определение параметров элементов R и C аналитическим способом в принципе не представляет трудностей, но требует довольно сложных вычислений. Поэтому, для того чтобы упростить вычисление параметров, были подготовлены графики, максимально облегчающие расчеты [2, 5, 8]. Эти графики приведены ниже.

Графики, представленные на рис. 6.11, помогают определить параметры RC -цепочки, показанной на рис. 6.8 и служащей для демп-

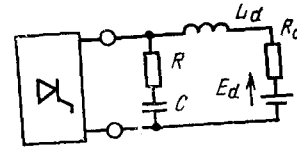


Рис. 6.10. Присоединение RC -цепочки к выводам постоянного тока преобразователя с естественной коммутацией с целью защиты от перенапряжений в режиме прерывистой проводимости.

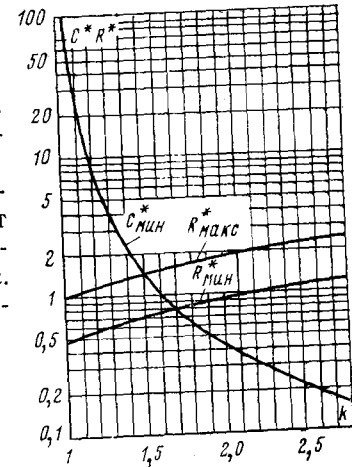


Рис. 6.11. Диаграммы для расчета RC -цепочек, защищающих от коммутационных перенапряжений. Зависимости минимальной относительной емкости и допустимого диапазона относительных сопротивлений от коэффициента перенапряжений.

фирования коммутационных перенапряжений. С использованием этих графиков параметры могут быть определены следующим образом.

Зная номинальное обратное повторяющееся напряжение вентилей и коэффициент запаса b , можно определить допустимое обратное напряжение:

$$U_{обр.доп} = \frac{U_{обр.п}}{b} \quad (6.1)$$

Зная максимальное мгновенное значение обратного напряжения $U_{обр}$ без учета перенапряжения, можно определить коэффициент перенапряжения:

$$k = \frac{U_{обр.доп}}{U_{обр}} \quad (6.2)$$

На рис. 6.11 в зависимости от этого коэффициента даются в относительных единицах наименьшее значение емкости C^*_{\min} и наименьшее R^*_{\min} и наибольшее R^*_{\max} значения сопротивления. Для значений di/dt при коммутации и тока, протекавшего до коммутации, по характеристике полупроводникового прибора (взятой из каталога) можно определить накопленный заряд Q .

Для расчетного значения индуктивности контура коммутации L' расчетные значения емкости C' и сопротивления R' можно выразить следующим образом:

$$C'_{\min} = C^*_{\min} \frac{2Q}{U_{\text{обр}}}; \quad (6.3)$$

$$R^*_{\min} \sqrt{\frac{L'U_{\text{обр}}}{2Q}} \leq R' \leq R^*_{\max} \sqrt{\frac{L'U_{\text{обр}}}{2Q}}. \quad (6.4)$$

Соотношения между индуктивностью L на фазу, сопротивлением резистора R , емкостью C конденсатора и расчетными значениями L' , R' , C' для различных преобразователей приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Соотношения между фактическими (L , R , C) и расчетными (L' , R' , C') значениями индуктивности коммутации, сопротивления и емкости демпфирующей цепи

Тип преобразователя			
1Ф1Н2П	1Ф2Н2П	3Ф1Н3П	3Ф2Н6П
$L' = 2L$	$L' = L$	$L' = 2L$	$L' = 2L$
$R' = R$	$R' = \frac{R}{2}$	$R' = R$	$R' = \frac{3}{5} R$
$C' = C$	$C' = 2C$	$C' = C$	$C' = \frac{5}{3} C$

При определении численного значения R сопротивления резистора следует помнить, что при включении тиристором ток разряда конденсатора ограничивается этим резистором.

На рис. 6.12 показаны графики для определения параметров RC -контура, обеспечивающих защиту от перенапряжений при отключении ненагруженного трансформатора (см. рис. 6.6).

Отключение трансформатора — процесс не периодический, поэтому допустимое напряжение на полупровод-

никовых приборах определяется номинальным неповторяющимся напряжением. Коэффициент перенапряжения при коэффициенте запаса

$$b = \frac{U_{\text{неп}}}{U_{\text{доп}}} \quad (6.5)$$

будет равен:

$$k = \frac{U_{\text{доп}}}{U}. \quad (6.6)$$

По значению k с помощью диаграмм на рис. 6.12 определяются в относительных единицах емкость, а также максимальное и минимальное значения сопротивления. Максимальная энергия магнитного поля, запасенная в трансформаторе, может быть вычислена с помощью уравнения (6.7а) для однофазных трансформаторов и уравнения (6.7б) — для трехфазных:

$$W_{\mu \text{ макс}} = \frac{1}{2} L_{\mu} I_{\mu \text{ макс}}^2 = \frac{I_{\mu \text{ макс}} S_p}{\sqrt{2} I_p \omega}; \quad (6.7a)$$

$$W_{\mu \text{ макс}} = \frac{3}{4} L_{\mu} I_{\mu \text{ макс}}^2 = \frac{I_{\mu \text{ макс}} S_p}{\sqrt{2} I_p 2\omega}. \quad (6.7b)$$

Минимальная емкость демпфирующего конденсатора для однофазной схемы равна:

$$C_{\min} = \frac{2W_{\mu \text{ макс}}}{U_{\text{с макс}}^2} C^*. \quad (6.8)$$

Допустимый диапазон сопротивления для однофазной схемы

$$R^*_{\min} \frac{U_{\text{с макс}}}{I_{\text{с макс}}} \leq R \leq R^*_{\max} \frac{U_{\text{с макс}}}{I_{\text{с макс}}}. \quad (6.9)$$

В трехфазных преобразователях емкость каждого конденсатора при соединении демпфирующих элементов в треугольник равна 0,67 значения, полученного по формуле (6.8), а активное сопротивление должно быть увеличено в полтора раза по сравнению со значением, полученным по формуле (6.9).

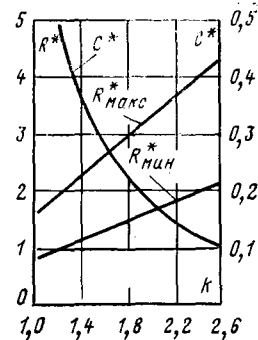


Рис. 6.12. Диаграммы для расчета RC -цепочек, защищающих от перенапряжений при отключении трансформатора.