

Продолжение. Начало в №3/2010

# Проектирование бесконтактного выключателя аварийных режимов

## в тиристорном преобразователе повышенной частоты для индукционного нагрева металлов

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Семен Шапиро, д. т. н.

svshap@ufacom.ru

Александр Белкин

bak18@mail.ru

### Исследование коммутирующей способности устройства защиты

Бесконтактный ключ — тиристор — отделяет источник питания ТПЧ от автономного инвертора повышенной частоты при возможности или факте возникновения аварийного процесса, а также «запрещает» подключение инвертора к источнику питания при неисправности или «неготовности» системы защиты. Эти и другие функции реализуются блоком управления и защиты (БУЗ), в котором осуществляется диагностика исправного состояния всех элементов ТПЧ, проверяется наличие блокировок по системе охлаждения, по соблюдению правил техники безопасности и реализуются другие сервисные и защитные функции.

Для эффективной защиты силовой части ТПЧ в случае аварии наиболее важной является коммутирующая способность бесконтактного устройства защиты в пределах ее селективности, т. е. надежное отключение входного тока автономного инвертора без приведения в действие контактных средств защиты ТПЧ. Наличие контактных устройств аварийной защиты, тем не менее, является обязательным в соответствии с правилами техники безопасности. Под коммутирующей способностью рассматриваемой схемы устройства отключения ТПЧ мы понимаем обеспечение необходимого времени восстановления управляемости проходному тиристорному быстродействующего тиристорно-конденсаторного выключателя (ТКВ) после приведения в действие системы аварийной защиты.

На рис. 14 показана схемотехническая модель ТКВ (слева) и характерные интервалы работы устройства защиты ТПЧ (справа). Защита готова к приведению в действие, когда отмеченный на рис. 14 конденсатор С3 зарядится до минимально необходимого напряжения от напряжения источника питания автономного инвертора. Выполнение этого условия необходимо для подачи импульсов на автономный инвертор и начала работы ТПЧ.

График заряда конденсатора устройства тиристорно-конденсаторного выключателя системы бесконтактной защиты ТПЧ соответствует параметрам, указанным на схемотехнической модели. Анимированная модель контактора ТПЧ включена, при этом на выходе мостовой схемы выпрямителя появляется напряжение 510 В. Тиристор Х5 включается импульсами генератора IMPULSE при включении кнопки «Пуск», затем конденсатор С3 заряжается через индуктивность L3 и резистор R2 от сетевого неуправляемого выпрямителя в соответствии с диаграммой интервала заряда конденсатора защиты. L3 в простейших вариантах отсутствует, иногда она выполняется в линейном виде, но индуктивность может быть с нелинейным сердечником, тогда ее функции расширяются.

Через некоторый интервал времени, когда конденсатор защиты зарядится до необходимого напряжения, бесконтактное устройство защиты готово к работе. Включение устройства бесконтактной защиты происходит при подаче импульсов управления от генератора PULSE2 на управляющий электрод тиристора Х6. Он включается в момент срабатывания ключа «Стоп» от сигнала датчиков бесконтактной защиты, поступающих на специальный блок управления и защиты (БУЗ).

При срабатывании ТКВ происходит выключение основного тиристора защиты Х5, которое обеспечивается включением вспомогательного тиристора Х6 и протеканием тока разряда конденсатора С3. Контур коммутации прерывателя постоянного тока, выполненного на указанных тиристорах, можно назвать бесконтактным ключом постоянного тока. С практической точки зрения работа такого ключа в режиме прерывателя имеет ряд особенностей. Тиристоры не могут отключаться по цепи управления. Необходимо уменьшить ток в цепи тиристора Х5 ниже уровня удерживающего тока, что и достигается при помощи вспомогательной цепи коммутации. Поэтому в прерывателе постоянного тока — устройстве тиристорно-конденсаторного выключателя — осуществляется принудительная

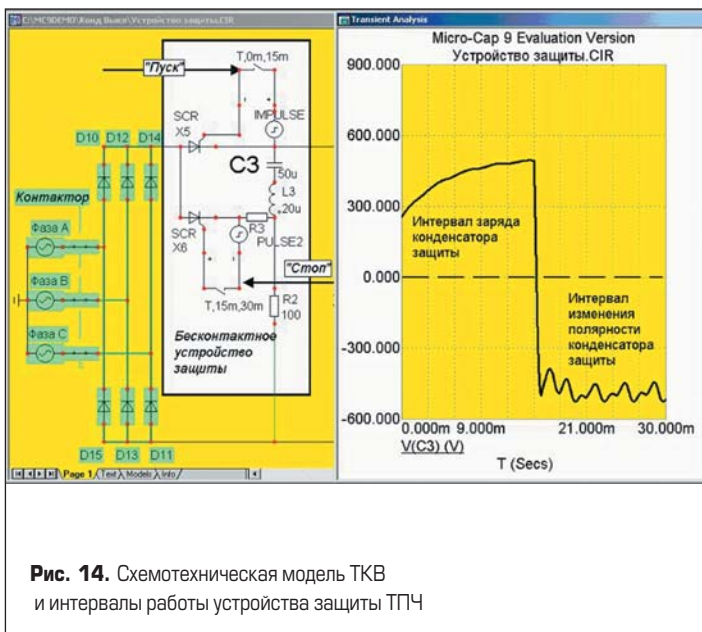


Рис. 14. Схематехническая модель ТКВ и интервалы работы устройства защиты ТПЧ

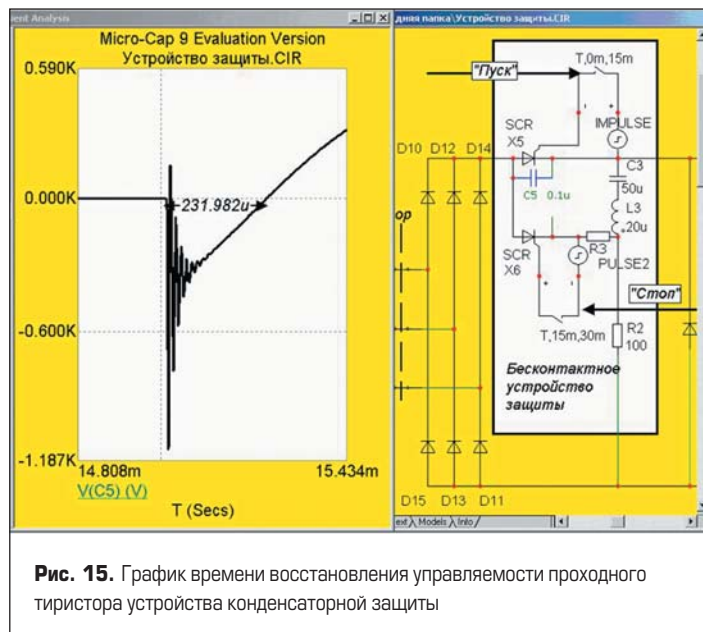


Рис. 15. График времени восстановления управляемости проходного тиристора устройства конденсаторной защиты

коммутация проходного тиристора предварительно заряженным конденсатором.

В устройстве ТКВ реализуется рассмотренный процесс предварительного заряда конденсатора, который начинается при включении проходного тиристора выпрямителя. График заряда конденсатора изображен на рис. 14 справа. Интервал обратной полярности напряжения конденсатора защиты начинается с момента включения ТКВ (сигнал «Стоп») и поддерживается входным током тиристорного инвертора.

Определяющей величиной для временных параметров ТКВ является время, предоставляемое схемой для восстановления управляемости проходного тиристора. На рис. 15 приведен полученный нами из исследований схематехнической модели график напряжения на тиристоре X5, показывающий интервал времени восстановления управляемости тиристора устройства ТКВ. Полученный интервал времени, равный 231 мкс, следует рассматривать совместно со скоростью нарастания прямого восстанавливающегося напряжения. Иначе

возможно несанкционированное повторное включение этого тиристора без подачи на него сигнала управления. Далее эта особенность тиристора рассмотрена подробнее.

На основную кривую выключения тиристорov ТКВ накладываются высокочастотные колебания, причиной которых служат переходные процессы в реактивных элементах контура коммутации C3 и L3, демпфируемые последовательным резистором R3. Аналитический расчет влияния этих автоколебаний, пренебрегать которыми не следует, очень сложен и затрудняется отсутствием априорной информации о параметрах элементов, в том числе и паразитных. Схематехническое моделирование позволяет получить более точный результат: нелинейности PSpice-моделей полупроводников учитываются полностью, учет паразитных параметров элементов несложен и не затрудняет анализа схематехнической модели.

На рис. 16 приведены временные диаграммы тока в индуктивности и напряжения на конденсаторе защиты. Максимум тока в контуре

ТКВ сопровождается сменой полярности напряжения на конденсаторе, который соответствует интервалу времени примерно 300 мкс. Скачок тока в линейной индуктивности соответствует величине установившегося входного тока автономного инвертора, непосредственно перед включением ТКВ.

На рис. 17 приведена временная диаграмма тока, протекающего в контуре коммутации ТКВ, при изменении линейной индуктивности бесконтактного устройства защиты. Семейство кривых, полученное при изменении величины индуктивности от 10 до 70 мкс, практически совпадает на всех участках полученных кривых, что позволяет сделать вывод об отсутствии влияния этой индуктивности на временные параметры бесконтактного устройства защиты. Индуктивность L3 и резистор R3 ограничивают сквозной ток контура коммутации ТКВ.

На рис. 18 приведены временные диаграммы напряжения на конденсаторе ТКВ при изменении емкости конденсатора бесконтактного устройства защиты. Величина конденсатора

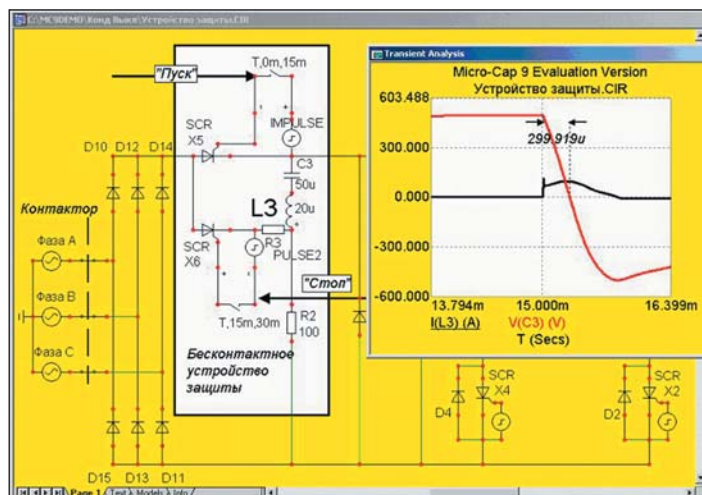


Рис. 16. Диаграмма тока в индуктивности и напряжения на конденсаторе защиты

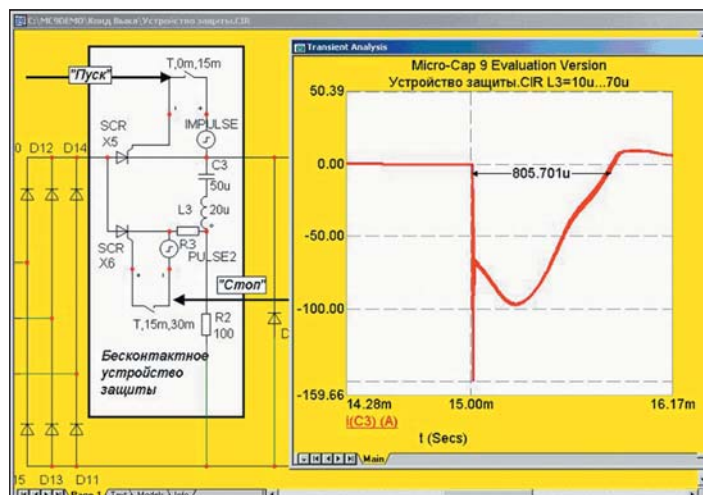


Рис. 17. Временная диаграмма тока, протекающего в контуре коммутации ТКВ, при изменении параметров защитной индуктивности

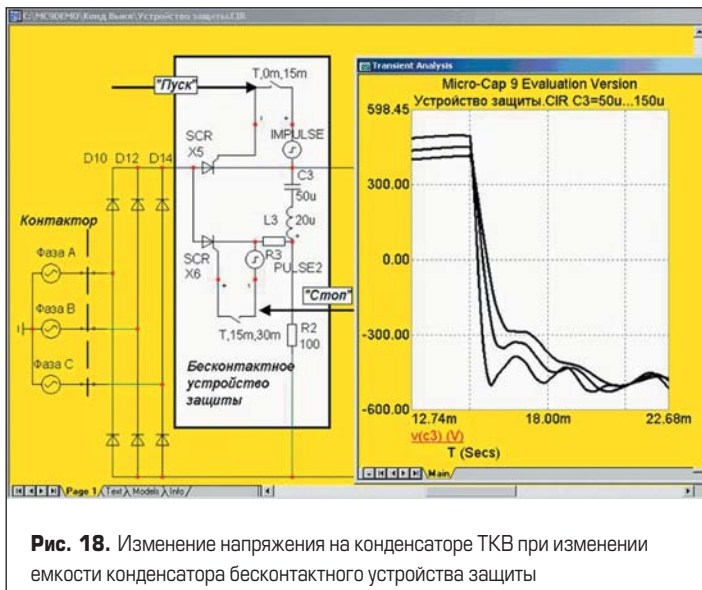


Рис. 18. Изменение напряжения на конденсаторе ТКВ при изменении емкости конденсатора бесконтактного устройства защиты

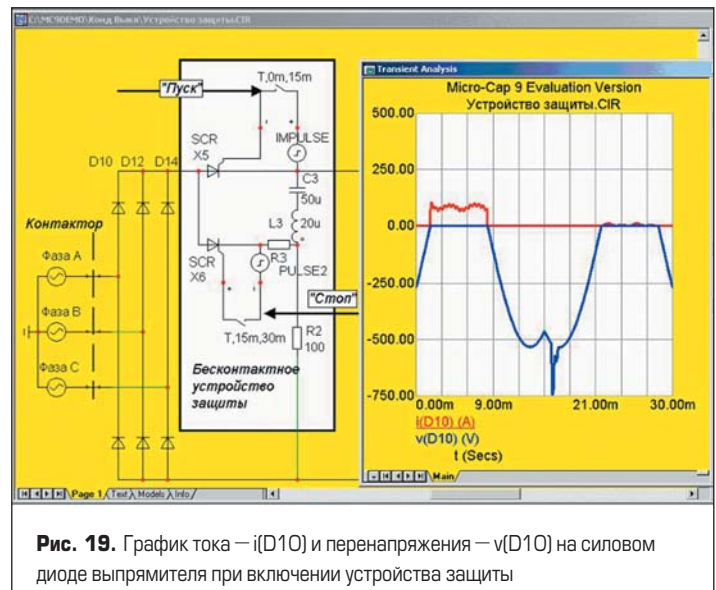


Рис. 19. График тока — i(D10) и перенапряжения — v(D10) на силовом диоде выпрямителя при включении устройства защиты

менялась в пределах 50–150 мкФ. Характер полученных кривых аналогичен в расширенном интервале времени действия устройства тиристорно-конденсаторного выключателя кривым на рис. 17.

Было бы неправильным считать рассмотренную схему защиты свободной от недостатков. Приведем пример отрицательных последствий применения ТКВ в ТПЧ. На рис. 19 показан график тока —  $i(D10)$  и перенапряжения —  $v(D10)$  на силовом диоде выпрямителя при срабатывании устройства защиты. Моделировалась работа ТПЧ в течение полутора периодов частоты питания 50 Гц/0,03 с, при этом максимальная величина обратного напряжения на диодах выпрямителя составляет 510 В при амплитуде напряжения питания одной фазы сети 50 Гц/310 В и действующем значении 220 В. График демонстрирует существенное увеличение амплитуды обратного напряжения, прикладываемого к диоду неуправляемого выпрямителя, при срабатывании ТКВ, что вызывает необходимость применения в выпрямителе полупроводников высокого класса. Амплитуда импульса перенапряжения составляет 750 В, длительность импульса 50 мкс.

В данном устройстве защиты предполагается применение рассмотренных в [12] дифференциальных датчиков быстродействующей защиты и схем их включения для мостовой схемы тиристорного автономного инвертора частотой 2000 Гц и более, мощностью до 250 кВт и выше. Эти датчики широко применяются в уфимских ТПЧ для высокочастотных электротермических установок индукционного нагрева металлов, проектируемых и изготавливаемых в настоящее время. С применением PSpice-моделирования появилась наконец возможность совместного проектирования силовых устройств с элементами защиты от аварийных режимов. Эмпирические методы проектирования, на основе накопленного опыта, не потеряли своей важности, а дополняются результатами PSpice-моделирования — современным методом исследования устройств силовой электроники.

Частой причиной аварийного отключения в ТПЧ является рассмотренный выше «срыв» инвертирования тиристорного инвертора, вызванный превышением допустимых параметров силовых полупроводниковых приборов — тиристоров и диодов. Мы не рассматриваем всех случаев возникновения неисправности в ТПЧ, их может быть очень много, нам важнее предотвратить их последствия. Укажем, что рациональным решением является использование датчиков защиты, которые интегрированы в силовую схему тиристорного преобразователя частоты.

Сигналы быстродействующих датчиков приводят в действие систему быстродействующей бесконтактной защиты, что предотвращает повреждение элементов схемы тиристорного инвертора. Эффективность применения быстродействующей системы защиты основывается на том, что полупроводниковые элементы ТПЧ — тиристоры и диоды — способны выдержать без повреждения одиночный импульс тока, значительно превышающий номинальную величину. При этом срабатывания контактных средств защиты, как правило, не происходит.

### Особенности применения силовых тиристоров и диодов в ТПЧ и ТКВ

В тиристорном преобразователе повышенной частоты и тиристорно-конденсаторном выключателе используются высокочастотные, быстродействующие силовые тиристоры штыревого и таблеточного исполнения.

Диаграмма на рис. 20 позволяет определить допустимую скорость нарастания прямого напряжения на тиристоре защиты, которая не должна превышать значений, нормированных изготовителем, так как в противном случае емкостные токи, появляющиеся в  $p-n$ -переходах, могут привести к самопроизвольному повторному включению тиристора. Поэтому в каталогах приводится также максимально допустимая скорость нарастания прямого напряжения  $(du/dt)_{кр}$ . Критическое значение  $du/dt$  обычно указывается для экс-

поненциально нарастающего напряжения либо для линейно изменяющегося прямого напряжения [14].

Из приведенной диаграммы следует, что максимальная скорость нарастания напряжения может быть в  $1/0,632$  раза больше критического значения  $du/dt$ , при условии, что наибольшее мгновенное значение прямого запирающего напряжения  $u_{пр}$  на тиристоре не превышает в конце интервала нарастания  $0,67U_{пр.п.}$  Из практики эксплуатации ТПЧ выявлено, что если начальная скорость нарастания  $du/dt$  ниже критического значения, то случайных включений тиристора не наблюдается, даже если прямое напряжение на тиристоре находится в пределах  $0,67U_{пр.п.}$  и  $1,0U_{пр.п.}$

В прерывателях тока на тиристорах резкое прекращение обратного тока одного тиристора приводит к росту напряжения в прямом направлении на другом тиристоре со скоростью, превышающей критическое значение. Однако этот процесс не вызывает самопроизвольного включения, если возрастающее напряжение не превышает определенной величины, которая нормируется в более подробных каталогах или справочниках некоторых фирм-изготовителей.

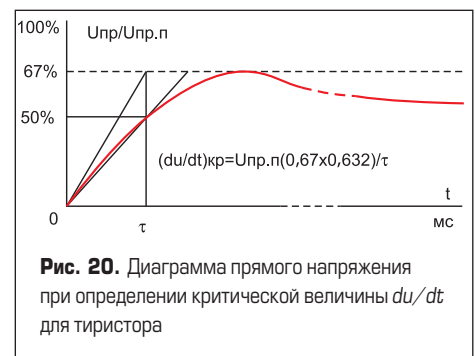


Рис. 20. Диаграмма прямого напряжения при определении критической величины  $du/dt$  для тиристора

На рис. 21 приведена эквивалентная схема высокочастотного тиристора с конденсатором, отражающим емкость структуры обратного смещенного  $p-n$ -перехода. При высокой скорости изменения анодного напряжения  $(du/dt)$  возрастает вероятность самопроизвольного

включения тиристора без подачи тока в цепь управления. Это связано с тем, что полупроводниковый переход П2 имеет паразитную емкость  $C_{\text{пар}}$ , через которую при больших значениях скорости нарастания напряжения ток  $I = C(dU/dt)$  действует подобно току управления.

Ограничение скорости нарастания напряжения на тиристорах производится буферными (снабберными, демпфирующими) RC-цепочками, в которых рассеивается мощность, значительно снижающая КПД ТПЧ на повышенных частотах. Скорость изменения прямого напряжения на тиристорах мостовой схемы тиристорного инвертора максимальна в режимах «короткого замыкания» нагрузки и при неисправности внешних, по отношению к тиристорам, RC-элементов, демпфирующих коммутационные перенапряжения. Влияние параметра  $(du/dt)$  на условия работы тиристора рассмотрено нами выше, отметим здесь также важность соблюдения параметров импульсов управления тиристорами. В частности, сравнительно медленное включение тиристора может привести к большим потерям в нем и даже повреждению.

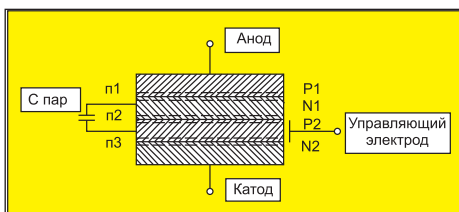


Рис. 21. Эквивалентная схема силового тиристора на высокой частоте

Опишем влияние еще одного важного параметра, ограничивающего рабочую частоту тиристорных в рассмотренной схеме автономного инвертора с колебательной формой протекающего тока, — скорость нарастания прямого тока  $di/dt$ .

На рис. 22 показана зависимость максимального допустимого отношения скорости нарастания тока тиристора  $(di/dt)_{\text{доп}}$  к критической величине  $(di/dt)_{\text{кр}}$  от величины прямого напряжения непосредственно перед включением ( $U_{\text{пр}}$ ). В соответствии с действующими стандартами в каталогах на полупроводниковые приборы указывается критическая скорость нарастания тока  $(di/dt)_{\text{кр}}$  при следующих условиях: температура кристалла — максимально допустимая; амплитуда нарастающего тока не превышает трехкратного номинального

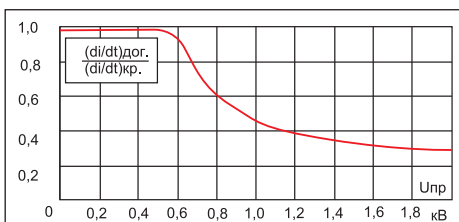


Рис. 22. Зависимость коэффициента снижения  $di/dt$  от величины прямого напряжения на тиристоре

тока; прямое напряжение тиристора непосредственно перед включением не превышает 67% повторяющегося прямого напряжения; частота повторения включений — 50 Гц; управляющий импульс удовлетворяет условиям по скорости нарастания тока, амплитуде и длительности, указанным для данного вентиля в каталоге.

Если скорость нарастания тока тиристора не превышает критического значения, то до определенного уровня прямого напряжения его повреждение не произойдет. Однако если непосредственно перед включением тиристора приложенное к нему прямое напряжение превышает этот уровень (обычно он устанавливается равным 600 В), то допустимое значение  $di/dt$  должно быть ниже критического значения. Связь этого напряжения с коэффициентом снижения  $di/dt$  приводится в каталогах на тиристоры и показана на рис. 22. При величине прямого напряжения 1,4 кВ относительная величина  $(di/dt)_{\text{доп}}/(di/dt)_{\text{кр}}$  уменьшается на 67%.

При превышении паспортной величины параметра  $(di/dt)_{\text{доп}}$  происходит локальное повреждение (прожог) полупроводниковой структуры тиристора. Это связано с тем, что при включении силового тиристора зона проводимости распространяется с небольшой скоростью (равной 0,1 мм/мкс), в течение времени включения ток тиристора протекает по области, имеющей малую площадь. В ТПЧ повышенной частоты, применяемых для индукционного нагрева ТВЧ, используются, в основном, быстродействующие и импульсные тиристоры таблеточной конструкции. Особенности этих тиристорных: малые потери при переключении; высокая нагрузочная способность; малый заряд обратного восстановления; разветвленный управляющий электрод, обеспечивающий высокие значения критической скорости нарастания тока в открытом состоянии.

В мощных ТПЧ, как правило, применяются силовые тиристоры ТБ.133.400.12.А2.В4. УХЛ2. Расшифровка кода тиристорных: Т, ТБ, ТБИ — тиристор, быстродействующий, импульсный; 133 — конструктивное исполнение; 400 — средний ток в открытом состоянии, А; 12 — класс напряжения; А2 — критическая скорость нарастания напряжения в открытом состоянии; В4 — группа по времени выключения; УХЛ2 — климатическое исполнение (УХЛ2 — умеренное, для средних широт, Т — тропическое).

Согласно ГОСТ 20859-79 обозначение достаточно широко применяемых сегодня силовых тиристорных ТБ143-400-11-433 расшифровывается следующим образом: «1» — модификация; «4» — условное обозначение размера таблеточного тиристора, диаметр которого равен 34 мм; «3» — таблеточное исполнение; «400» — средний ток тиристора в открытом состоянии; «11» — класс тиристора, который определяется допустимым повторяющимся импульсным напряжением в закрытом состоянии, поделенным на 100; «4» — допустимая скорость нарастания прямого напряжения,

равная 200 В/мкс; «3» — группа по времени выключения, не более 40 мкс; «3» — группа по времени включения, равная 2,5 мкс.

Вскрыв тиристор, поврежденный при эксплуатации ТПЧ, по внешнему виду кремниевой пластины можно определить причину повреждения. На фотографии (рис. 23) показана кремниевая пластина тиристора таблеточной конструкции.



Рис. 23. Кремниевая пластина быстродействующего тиристора таблеточной конструкции

То, что этот тиристор быстродействующий, а не низкочастотный, видно по характерной форме области управляющего перехода в виде эвольвенты, это может быть и сетка из прямоугольных областей. Прожог кремниевой структуры в области управляющего перехода свидетельствует о превышении допустимой скорости нарастания тока через тиристор. Локальные прожоги в произвольном месте (отдельные пятна) свидетельствуют о повреждении тиристора, причинами которого являются превышение скорости нарастания прямого напряжения или его амплитуды. Выгорание отдельных участков — следствие термического разрушения структуры при протекании предельного тока. В случае необходимости в ТПЧ для ограничения скорости нарастания тока используются небольшие нелинейные дроссели, ограничивающие  $di/dt$  тиристорных, включенные последовательно с тиристорами.

Нагрев тиристора при протекании номинального тока требует его интенсивного охлаждения через контактные поверхности. В процессе пуско-наладочных и ремонтных работ ТПЧ, когда изменяются условия охлаждения или рабочая частота тиристорного инвертора, необходимо контролировать паспортное время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристорам, и амплитуду предельного напряжения на тиристорах (включая импульсы перенапряжений).

В зависимости от мощности ТПЧ в нем применяются диоды таблеточной и штыревой конструкции. Маркировка диодов типа ДЧ151-100Х-12-2 расшифровывается следующим образом: «Д» — диод; «Ч» — высокочастотный; «1» — конструктивное исполнение; «5» — раз-

мер «под ключ», равный 27 мм; «1» — штыревое исполнение с гибким выводом; «100» — номинальный ток 100 А; «Х» — полярность обратная; «12» — класс диода (допускаемое напряжение 1200 В); «2» — время восстановления обратного сопротивления. Остальные обозначения соответствуют приведенным данным на тиристоры. Вместо трех цифр, определяющих динамические параметры, применяется одна, определяющая группу по времени восстановления («2» — не более 5,0; «3» — 3,2; «4» — 2,5; «5» — 2,0; «6» — 1,0 мкс.).

Следует учитывать, что в ТПЧ могут использоваться одинаковые по внешнему виду диоды штыревой конструкции различной полярности (отличаются только буквой «Х» в маркировке, которая обозначает, что катодом является основание). Заметим, что все сказанное справедливо при условии ограничения предельной температуры кремниевой структуры силовых полупроводниковых элементов. В технических данных изготовители тиристоров и диодов указывают величину теплового сопротивления полупроводниковой структуры, которая определяет превышение ее температуры над температурой охлаждающихся поверхностей.

Факторами, определяющими надежность ТПЧ, являются надежность элементной базы, уровень технологического процесса и условий производства, а также использование конструктивно отработанных ранее и, по возможности, унифицированных узлов, обеспечивающих снижение температурных режимов силовых элементов. Устройства тиристорно-конденсаторной защиты могут быть унифицированы [15–17].

Мощные тиристорные преобразователи повышенной частоты для установок индукционного нагрева металлов выполняются с водяным охлаждением силовых элементов — электротермических конденсаторов, катушек индуктивности, дросселей постоянного и переменного тока, силовых шин, а также тиристоров и диодов. Эксплуатация первых промышленных ТПЧ с воздушным охлаждением (70–80-х годов) выявила их существенные недостатки. До настоящего времени в отечественных ТПЧ повышенной частоты (до 20 кГц) для индукционного нагрева металлов в основном используются силовые тиристоры с системой водяного охлаждения — оборотной или проточной [18–20]. Промышленный рынок различных преобразователей для индукционного нагрева иностранного производства предлагает применение IGBT-модулей с обратными диодами — более дорогих, но перспективных силовых приборов.

### Заключение

- Для систем аварийной защиты мощных ТПЧ с неуправляемым выпрямителем целесообразно комплексное проектирование быстродействующих тиристорно-конденсаторных выключателей, выполняющих функции бесконтактного ключа постоянного тока. В этом случае обеспечивается повышенное быстродействие ТКВ относительно традиционных контактных средств защиты ТПЧ, что уменьшает последствия наступления аварийных режимов.
- Созданные схемотехнические модели силовой трехфазной сети, выпрямителя, тиристорно-конденсаторного выключателя и мостового тиристорного инвертора позволяют моделировать переходные процессы в единой схемотехнической модели ТПЧ. Расчетные графики схемотехнической модели ТПЧ адекватно отражают характер протекания электромагнитных процессов в функциональных узлах с учетом их взаимного влияния.

### Литература

1. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
2. Глух Е. М., Зеленев В. Е. Защита полупроводниковых преобразователей. М.: Энергоиздат. 1982.
3. Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П. Тиристорный преобразователь для индукционного нагрева металлов. Академия наук Республики Башкортостан. 1995. НТД № 95-4.
4. Зинин Ю. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
5. Зинин Ю., Белкин А. Принудительное выключение тиристорных выпрямителей в преобразователях частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2010. № 1.

6. Валиуллина З., Есаулов А., Егоров А., Зинин Ю. Особенности проектирования силовых выпрямителей в качестве источников постоянного тока для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 3.
7. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование схемотехнической модели тиристорного преобразователя частоты с вакуумной индукционной плавильной печью // Силовая электроника. 2008. № 1.
8. Зинин Ю. Проектирование регулируемых тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 4.
9. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
10. Валиуллина З., Есаулов А., Егоров А., Зинин Ю. Исследование средствами схемотехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
11. Зинин Ю., Рахимова И. Мостовая схема тиристорного инвертора тока для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. № 3.
12. Зинин Ю., Шапиро С. Дифференциальные датчики систем аварийной защиты в тиристорных преобразователях повышенной частоты для индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. № 5.
13. Златин И. Новые возможности программы схемотехнического моделирования Micro-Cap // Компоненты и технологии. 2007. № 10.
14. Чаки Ф., Герман И., Ипшич И. и др. Силовая электроника. Примеры и расчеты / Пер. с англ. М.: Энергоиздат. 1982.
15. Зинин Ю. М., Васюра В. В., Дубов С. А. Устройство защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя. Академия наук РБ. 1981. НТД № 81-5.
16. А. с. № 481964 (СССР) Устройство защиты источника питания / С. М. Кацнельсон, Ю. М. Зинин, А. М. Иванов, А. М. Уржумсков, П. С. Ройзман // Бюлл. 1975. № 31.
17. А. с. № 513440 (СССР) Способ защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя / Ю. М. Зинин, А. В. Иванов, В. А. Пацкевич, А. М. Уржумсков // Бюлл. 1976. № 17.
18. Зинин Ю. М., Терешкин В. В. Выявление критерия надежности системы бесконтактной защиты электроэнергетического оборудования. Уфа: УГАТУ. 2001.
19. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
20. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полирезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.