

Принудительное выключение тиристорных выпрямителей

в преобразователях частоты для установок индукционного нагрева металлов

В статье рассмотрены варианты исполнения устройства принудительного выключения для управляемых выпрямителей тиристорных преобразователей частоты, применяемых в установках для индукционного нагрева металлов.

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Александр Белкин

bak18@mail.ru

Для исследований системы аварийного отключения тиристорного преобразователя повышенной частоты была создана обобщенная схематехническая модель тиристорного выпрямителя, тиристорно-конденсаторного выключателя и автономного инвертора. Анализ электромагнитных процессов схематехнической модели, выполненный в программе Micro-CAP, позволил определить параметры тиристорно-конденсаторного выключателя для применения в установках электротермического, индукционного нагрева.

Применение тиристорно-конденсаторных выключателей в преобразователях частоты с тиристорным выпрямителем

Применение тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) в качестве высокочастотных источников питания индукционных установок требует обеспечения высокой надежности работы силового оборудования. В частности, это обеспечивается с помощью бесконтактной системы аварийной защиты [1–7]. Обычно для тиристорных преобразователей частоты различают две группы аварий: внешние, вызванные короткими замыканиями в нагрузке или превышениями напряжения в питающей трехфазной сети, и внутренние, обусловленные срывами инвертирования, повреждением отдельных полупроводниковых приборов или вызванные нарушениями в системе управления преобразователями. Часто внешние аварии приводят к повреждению полупроводниковых силовых приборов и к развитию внутренних аварий.

Для защиты от развития аварийных процессов в тиристорных преобразователях частоты, выполненных на базе автономных последовательных инверторов с промежуточным звеном постоянного тока, используют принудительное выключение источника постоянного тока [8–14].

В мощных ТПЧ, которые подключаются непосредственно к промышленной сети переменного тока, используются управляемые выпрямители, обеспечивающие выпрямление переменного напряжения 3×50 Гц, 380 В до уровня однофазного выпрямленного напряжения 510 В. Этот уровень постоянного напряжения необходим для питания автономного инвертора повышенной частоты в установках индукционного нагрева металлов с единичной мощностью до 250 кВт и максимальным потреблением постоянного тока от выпрямителя до 500 А.

В полностью управляемых выпрямителях ТПЧ в основном применяются силовые низкочастотные тиристоры, которые в нормальном режиме эксплуатации включаются подачей импульсных сигналов в цепь управления. Чтобы выключить каждый тиристор из анодной и катодной группы выпрямителя, проводящий ток в данный момент времени, необходимы специальные устройства выключения постоянного тока. Бесконтактные устройства защиты обеспечивают принудительное быстрое действующее выключение выпрямителей ТПЧ и служат основным средством аварийной защиты, в дополнение к традиционным контактным средствам — предохранителям, рубильникам и электромагнитным контакторам, осуществляющим физическое разъединение электрической цепи.

В ТПЧ, разработанных Уфимской школой преобразователей, специализированных для высокочастотных установок индукционного нагрева металлов, как правило, используются тиристорные автономные инверторы тока, на входе которых применяется дроссель постоянного тока значительной величины. Указанный дроссель уменьшает амплитуду высокочастотных помех, передаваемых в питающую сеть от автономного инвертора, переводит выпрямитель ТПЧ в режим токовой нагрузки и определяет внешнюю характеристику автономного инвертора как источника тока. Эти особенности

определяют рабочие режимы ТПЧ, но при развитии аварийных процессов дроссель постоянного тока должен израсходовать запасенную в нем энергию, что увеличивает длительность периода устранения аварии и мощность, рассеиваемую в поврежденных элементах. В то же время дроссель постоянного тока и обратный диод на входных зажимах отделяют автономный инвертор от источника питания — выпрямителя ТПЧ — при его принудительном выключении.

На рис. 1 приведена функциональная схема тиристорного преобразователя частоты с устройством принудительного выключения (УПВ) выпрямителя, подключенного к промышленной трехфазной сети переменного тока. В составе ТПЧ показаны следующие функциональные узлы:

- Выпрямитель полупроводниковый — трехфазный выпрямитель Ларионова, на входе которого установлены датчики максимальной токовой защиты Д1, а на выходе выпрямителя на плюсовой и минусовой шине постоянного тока — дифференциальный токовый датчик Д2.
- ТКВ — тиристорно-конденсаторный выключатель, устройство принудительного выключения выпрямителя (УПВ), состоящее из тиристора защиты и предварительно заряженного конденсатора. В составе УПВ рассматриваем и вспомогательный неуправляемый трехфазный выпрямитель, обеспечивающий заряд конденсатора выключателя, обратный диод и дроссель постоянного тока — элементы, определяющие характер протекания тока в УПВ и ТПЧ.
- Автономный инвертор — тиристорный автономный инвертор тока, на выходе которого подключена высокочастотная нагрузка ТПЧ. В автономный инвертор входят датчики защиты Д3 от аварийных режимов.
- БУЗ — блок управления и защиты ТПЧ, к которому присоединены выходы всех датчиков защиты, блокировок неисправного состояния, а также каналы управления, подключенные к управляющим электродам тиристорных выпрямителя, тиристорам ав-

тономного инвертора и тиристоры быстродействующей защиты в устройстве принудительного выключения ТПЧ. БУЗ формирует импульсную последовательность сигналов управления тиристорами выпрямителя и тиристора устройства защиты.

Превышение максимального тока преобразователя регистрируется токовыми датчиками, расположенными на токопроводах автоматического выключателя ТПЧ. Датчики тока Д1 представляют собой ферритовые магнитопроводы со вторичной обмоткой, нагруженной резистором.

При срыве инвертирования происходит отключение преобразователя от питающей сети системой контроля аварийного состояния, входящей в состав БУЗ, в которой применяются варисторные датчики, контролирующие текущее состояние тиристорных силовых вентилях преобразователя. Конструкция основных датчиков защиты Д2 и Д3, регистрирующих наступление аварийного режима ТПЧ, рассмотрена в [13]. В случае возникновения аварийной ситуации, на управляющие выводы тиристора защиты от БУЗ поступают импульсы управления, при этом одновременно снимаются импульсы управления тиристорных выпрямителя.

В составе БУЗ тиристорных преобразователей частоты обычно имеются несколько отдельных каналов:

- канал максимальной токовой защиты (Д1) регистрирует превышение номинального тока на входе преобразователя;
- канал датчика Д2 — защита от короткого замыкания выпрямителя и других элементов ТПЧ на «землю»;
- канал датчика защиты инвертора Д3 при срывах инвертирования, вызванных их повреждением;
- канал датчиков защиты от превышения допустимого напряжения на силовых полупроводниковых элементах;
- канал датчика защиты от замыкания нагрузки инвертора на «землю»;
- канал защиты от превышения допустимой температуры охлаждаемых водой элементов;

- блокировка работы ТПЧ при неисправности системы водяного охлаждения.

К выходным зажимам тиристорного преобразователя подключается нагрузка, которая защищена отдельными датчиками и блокировками.

Включение ТПЧ производится подачей импульсов на управляющие электроды тиристорных трехфазного выпрямителя. Через некоторый интервал времени подаются импульсы на управляющие электроды тиристорных инвертора, и происходит пуск ТПЧ. Длительность интервала задержки пуска такая, что напряжение на конденсаторе ТКЗ (тиристорно-конденсаторная защита) достигает определенной величины, обеспечивающей надежное прерывание аварийного тока ТПЧ, т. е. выключение управляемого выпрямителя.

Одновременно с сигналом любого датчика канала аварийной защиты прекращается подача управляющих импульсов на тиристоры выпрямителя. В этот момент времени подаются импульсы на включение тиристора устройства защиты. ТКЗ создает цепь разряда предварительно заряженного конденсатора. Ток конденсатора ТКЗ протекает навстречу аварийному току выпрямителя, выключая его, с последующим отсечением коммутационной аппаратуры на входе тиристорного преобразователя. В этот момент происходит отключение коммутационной аппаратуры на входе тиристорного преобразователя.

Встречный ток УПВ протекает в направлении рабочего тока тиристорного инвертора, вызывая его кратковременное увеличение. Вследствие этого и происходит принудительное выключение аварийного тока проходного тиристора или тиристорных выпрямителя. Кратность увеличения тока УПВ относительно номинальной величины ограничивается индуктивностью дросселя постоянного тока тиристорного инвертора повышенной частоты.

Мы рассмотрели принцип работы базового устройства принудительного выключения выпрямителя переменного тока промышленной частоты, который называется тиристорно-конденсаторным выключателем. Для рассмотрения особенностей и выявления преимуществ различных УПВ выпрямителя, удовлетворяющих требованиям бесконтактных систем защиты тиристорных преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов, выполненных на основе автономного инвертора тока, рассмотрим варианты схемных решений УПВ и выпрямителей. Все рассматриваемые выпрямители работают в режиме с индуктивной нагрузкой, обусловленной использованием дросселя постоянного тока со значительной величиной индуктивности.

На рис. 2 приведена электрическая схема силовой части преобразователя частоты с полностью управляемым выпрямителем и тиристорно-конденсаторным выключателем УПВ. Устройство принудительного выключения выпрямителя выполнено в виде

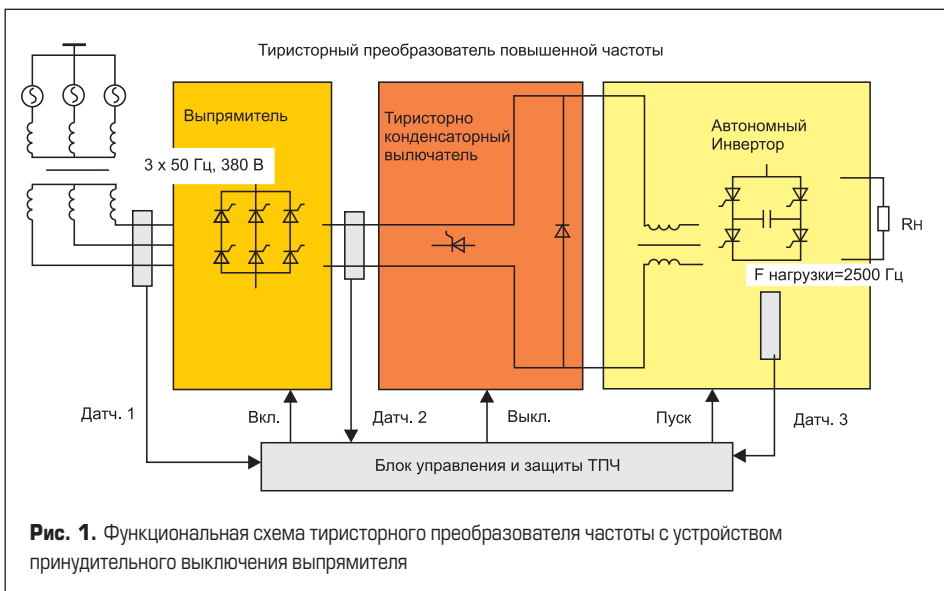


Рис. 1. Функциональная схема тиристорного преобразователя частоты с устройством принудительного выключения выпрямителя

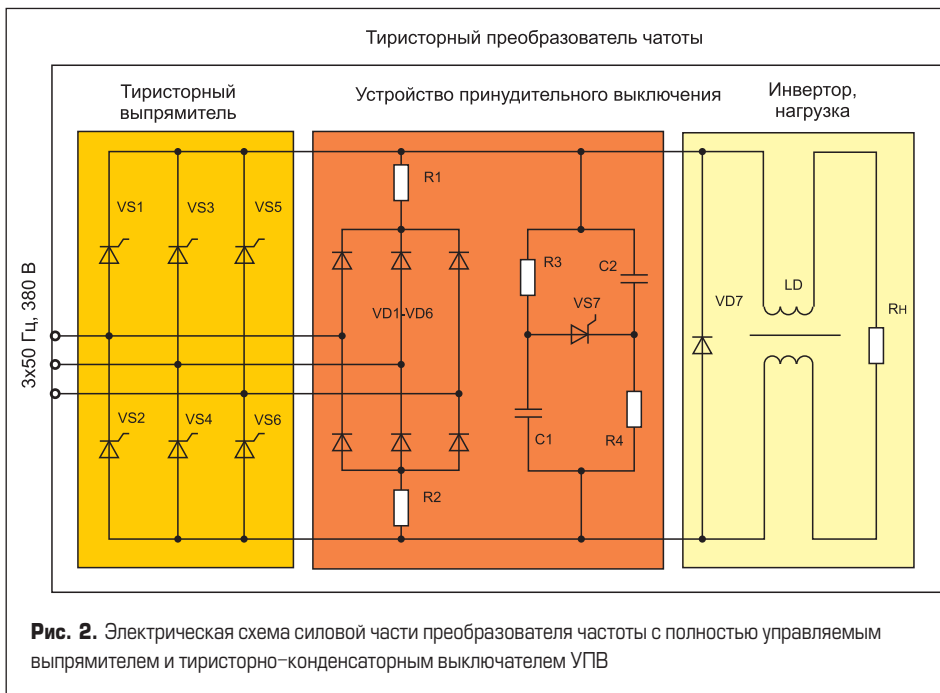


Рис. 2. Электрическая схема силовой части преобразователя частоты с полностью управляемым выпрямителем и тиристорно-конденсаторным выключателем УПВ

мостовой схемы тиристорно-конденсаторного выключателя [2].

В мостовой схеме УПВ противоположные плечи образованы резисторами R3, R4 и конденсаторами устройства защиты C1, C2. Мост подключен параллельно выпрямителю VS1–VS6 и встречному диоду инвертора VD7, в диагонали моста включен тиристор устройства защиты VS7. УПВ снабжено вспомогательным выпрямителем подзаряда на диодах VD1–VD6, подключенным через токоограничивающие резисторы R1, R2 параллельно мостовой схеме тиристорно-конденсаторного выключателя, силовому выпрямителю VS1–VS6 и автономному инвертору с дросселем постоянного тока и встречным диодом.

При внутренних или внешних коротких замыканиях в ТПЧ с его датчиков поступает сигнал в БУЗ на снятие управляющих импульсов с тиристоров выпрямителя VS1–VS6 и включение защитного тиристора VS7.

Допустим, в момент аварийной ситуации, возникшей в инверторе, проводили ток тиристоры силового выпрямителя VS4 и VS5. При включении защитного тиристора VS7 конденсаторы C1, C2 (предварительно заряженные от моста VD1–VD6 через резисторы R1–R4) начинают разряжаться по цепи: C2–VS5–сеть–VS4–C1–VS7–C2. Токи разряда конденсаторов C1, C2 направлены встречно аварийному току выпрямителя VS1–VS6, поэтому они выключаются, отсекая тем самым питающую сеть от места повреждения в инверторе. По мере перезаряда конденсаторов C1, C2 ток спадает и после перехода его через нуль защитный тиристор VS7 выключается. Основное назначение диода VD7 заключается в замыкании цепи тока входных дросселей LD автономного инвертора после отключения силового выпрямителя VS1–VS6.

Как видно из описания работы тиристорно-конденсаторного выключателя, токи разряда и перезаряда конденсаторов защиты C1, C2 протекают, минуя вспомогательный выпря-

митель VD1–VD6. Он выполняет одну функцию — перед пуском ТПЧ обеспечить заряд защитных конденсаторов C1, C2 через резисторы R1–R4, а поэтому при проектировании тиристорно-конденсаторного выключателя диоды вспомогательного выпрямителя могут быть применены на небольшой ток.

На рис. 3 приведена электрическая схема тиристорного преобразователя с конденсаторным выключателем для катодной группы тиристоров выпрямителя.

При подаче силового питания 3×50 Гц, 380 В на вход выпрямителя VS1–VS6 начинается заряд конденсатора C1 по цепи через выпрямитель подзаряда VD1–VD6. Таким образом, перед включением преобразователя конденсатор C1 заряжен, и защита готова к работе. Затем подаются импульсы управления на включение тиристоров выпрямителя

VS1–VS6, далее — импульсы управления на включение тиристоров автономного инвертора, с включением которых заканчивается процесс пуска преобразователя.

При внутренних или внешних коротких замыканиях с датчиков защиты поступает сигнал в БУЗ, который снимает импульсы управления с тиристоров выпрямителя VS1–VS6 и подает импульсы управления на включение тиристора VS7. Пусть в момент аварийной ситуации работали тиристоры VS4, VS5 выпрямителя VS1–VS6. В результате включения тиристора VS7 начинается разряд конденсатора C1 по цепи: C1–VS5–VD5–VS7–C1. Так как ток разряда конденсатора C1 направлен встречно аварийному току, то тиристор VS5 выпрямителя выключается, прекращая работу выпрямителя VS1–VS6, отделяя тем самым питающую сеть от короткозамкнутых элементов. Отключение катодной группы силового выпрямителя обеспечивает прерывание входного тока ТПЧ в аварийном режиме.

На рис. 4 приведена силовая схема ТПЧ с тиристорно-конденсаторным выключателем катодной и анодной группы управляемого выпрямителя, защитные конденсаторы которого могут разряжаться поочередно или одновременно [2, 4]. Конденсаторы защиты разряжаются одновременно, если в схеме отсутствуют датчики напряжения TV1 и TV2, и поочередно — в случае наличия датчиков.

При подаче силового питания 3×50 Гц, 380 В на вход выпрямителя VS1–VS6 начинается заряд конденсатора C1 и C2 по цепи через выпрямитель подзаряда VD1–VD6. Таким образом, перед включением преобразователя конденсаторы C1, C2 заряжаются, подготавливая защиту к работе. Затем подаются импульсы управления на включение тиристоров выпрямителя VS1–VS6, а далее — импульсы управления на включение тиристоров автономного инвертора, на этом заканчивается процесс включения преобразователя.

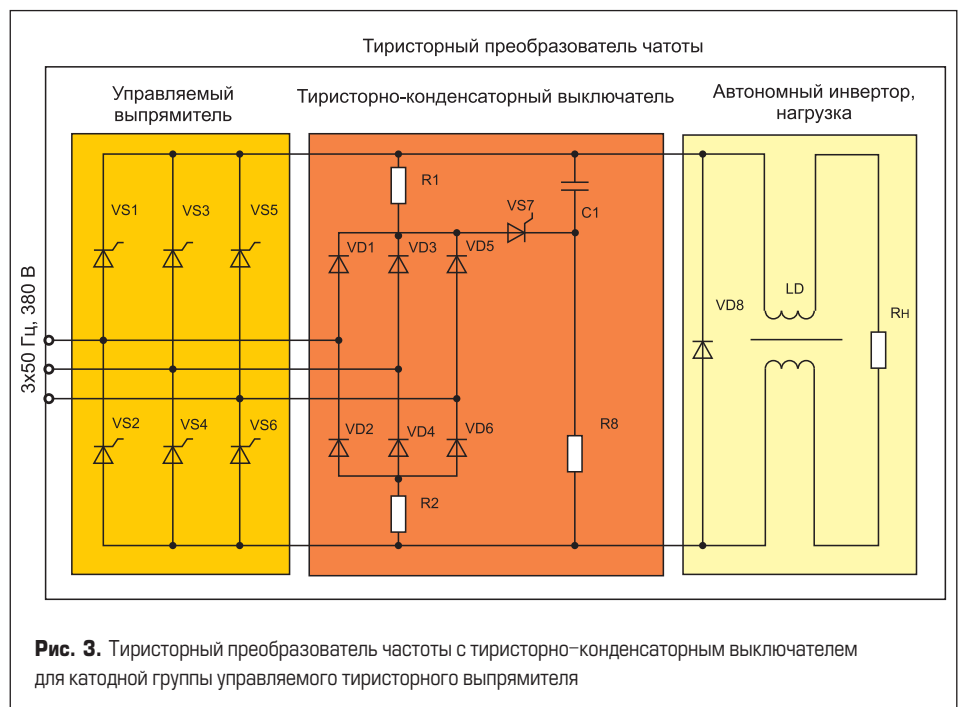


Рис. 3. Тиристорный преобразователь частоты с тиристорно-конденсаторным выключателем для катодной группы управляемого тиристорного выпрямителя

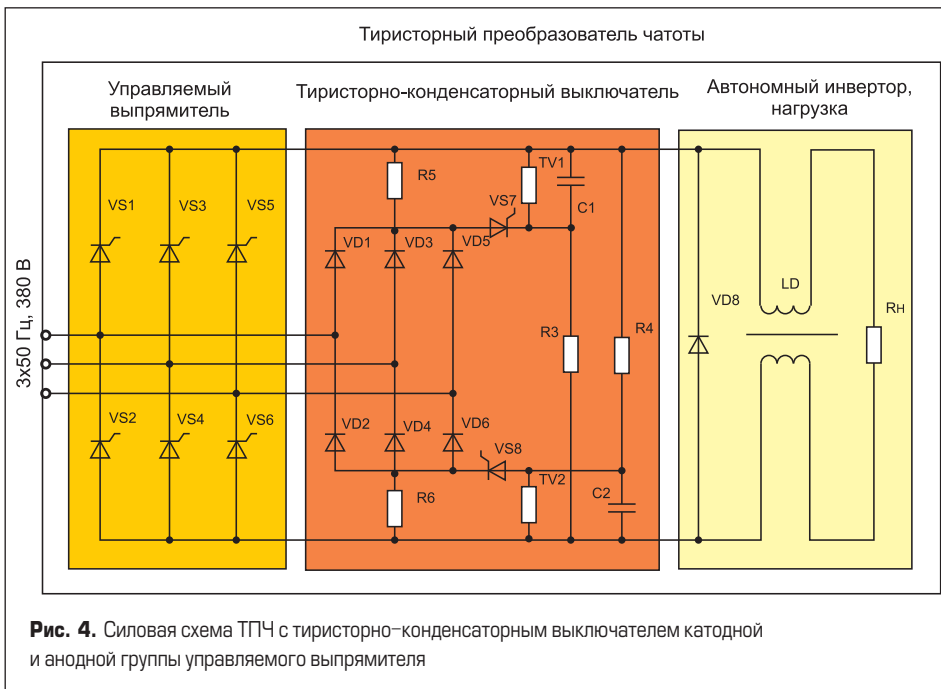


Рис. 4. Силовая схема ТТЧ с тиристорно-конденсаторным выключателем катодной и анодной группы управляемого выпрямителя

Рассмотрим рис. 4 с конденсаторным выключателем, защитные конденсаторы которого разряжаются поочередно. При подаче силового питания на вход выпрямителя VS1-VS6 начинается заряд конденсатора C1 по цепи выпрямителя подзаряда и конденсатора C2 по аналогичной цепи. Таким образом, перед включением преобразователя конденсаторы C1, C2 заряжаются и готовы к работе аварийной защиты. Далее подаются импульсы управления на включение тиристоров выпрямителя VS1-VS6, а затем — импульсы управления на включение тиристоров автономного инвертора, с включением которых заканчивается процесс включения преобразователя.

При внутренних или внешних коротких замыканиях с датчиков защиты поступает сигнал в БУЗ, который снимает импульсы управления с тиристоров выпрямителя VS1-VS6 и подает импульсы управления на включение тиристора VS7. Пусть в момент аварийной ситуации работали тиристоры VS4, VS5 выпрямителя VS1-VS6. Тиристор VS7, включаясь, образует цепь разряда конденсатора C1: C1-VS5-VD5-VS7-C1. При выключении тиристора VS5 катодной группы выпрямителя VS1-VS6 напряжение на конденсаторе C1 приближается к нулю. Датчик напряжения TV1 включает в БУЗе канал управления тиристором VS8, который образует цепь разряда конденсатора C2 (C2-VS8-VD4-VS4-C2). Ток разряда C2 выключает тиристор VS4 анодной группы выпрямителя VS1-VS6. Таким образом, поочередно выключаясь, тиристоры анодной и катодной групп выпрямителя VS1-VS6 отключают его, отделяя тем самым питающую сеть от короткозамкнутых элементов. При этом напряжение на выходе выпрямителя при срабатывании защиты не превышает двойной величины выпрямленного напряжения силового выпрямителя VS1-VS6, тогда как при одновременном разряде двух конденсаторов C1, C2 при срабатывании защиты напряжение на выходе выпрямителя

достигает трехкратной величины относительно номинального напряжения.

На рис. 5 приведена электрическая схема ТТЧ с тиристорно-конденсаторным выключателем анодной группы тиристоров, в которой выпрямитель выполнен по трехфазной мостовой схеме Ларионова, катодная группа полупроводниковых приборов которого образована диодами VD1-VD3, а анодная — тиристорами VS1-VS3 [5]. Цепь подзаряда конденсатора C1 конденсаторного выключателя составлена катодной группой диодов VD1-VD3 силового выпрямителя и дополнительной группой диодов VD4-VD6, которые совместно образуют выпрямитель подзаряда VD1-VD6.

При подаче силового питания на вход выпрямителя VD1-VD3, VS1-VS3 начинается заряд конденсатора C1 по цепи: выпрямитель

подзаряда VD1-VD6-R2-C1-R1-выпрямитель подзаряда VD1-VD6. Таким образом, перед включением преобразователя конденсатор C1 заряжен, то есть система готова к работе. Далее подаются импульсы управления на включение тиристоров VS1-VS3 силового выпрямителя, а затем — импульсы управления на включение тиристоров автономного инвертора, чем и заканчивается процесс включения преобразователя.

При внутренних или внешних коротких замыканиях с датчиков защиты поступает сигнал в БУЗ, который снимает импульсы управления с тиристоров выпрямителя VS1-VS3 и подает импульсы управления на включение тиристора VS4. Пусть в момент аварийной ситуации работали диод VD3 и тиристор VS2 силового выпрямителя. Тиристор VS4, включаясь, образует цепь разряда конденсатора C1: C1-VS4-VD5-VS2-C1. Так как ток разряда конденсатора C1 направлен встречно аварийному току, то тиристор VS2 выключается, выключая выпрямитель VD1-VD3, VS1-VS3, отделяя тем самым питающую сеть от короткозамкнутых элементов.

Таким образом, из рассмотрения работы электрических схем тиристорных выпрямителей видно, что тиристоры выпрямителя могут быть заменены мостовой схемой Ларионова на неуправляемых диодах, с одним последовательным тиристором в цепи постоянного тока и конденсаторным выключателем. В этом случае при подаче силового питания на вход силового выпрямителя начинается зарядка конденсатора защиты по цепи силового выпрямителя. Если перед включением преобразователя конденсатор защиты заряжен, то защита готова к работе. При внутренних или внешних коротких замыканиях с датчиков защиты поступает сигнал в БУЗ, который снимает импульсы управления с проходного тиристора и подает импульсы управления на включение защитного тиристора защиты. Этот тиристор, включаясь, образует цепь разряда конденса-

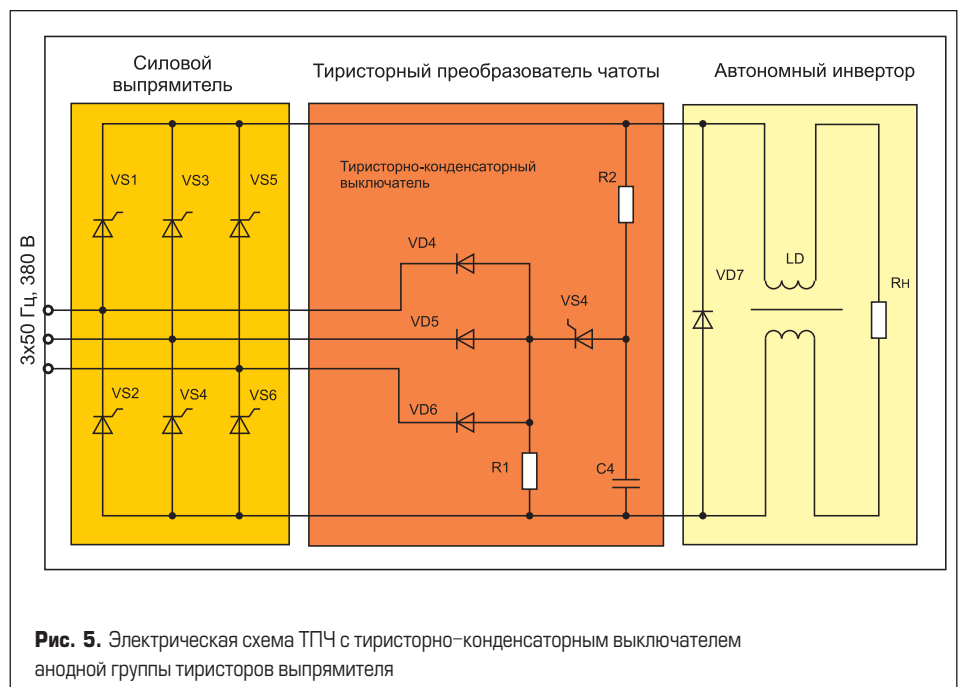


Рис. 5. Электрическая схема ТТЧ с тиристорно-конденсаторным выключателем анодной группы тиристоров выпрямителя

тора защиты навстречу основному току выпрямителя. Так как ток разряда конденсатора защиты направлен встречно аварийному току, то тиристор в цепи постоянного тока выпрямителя выключается, отделяя тем самым питающую сеть от короткозамкнутых элементов. Описанная схема объединяет все рассмотренные схемы тиристорных выпрямителей ТПЧ, что дает основание представить их одной эквивалентной схемой замещения для исследования электромагнитных процессов при включении аварийной защиты ТПЧ.

Анализ электромагнитных процессов в схмотехнической модели ТКВ

На рис. 6 приведена схмотехническая модель рассмотренного варианта устройства принудительного выключения управляемого выпрямителя для индукционных установок высокочастотного нагрева металлов. Эквивалентные схемы замещения рассмотренных выше устройств для принудительного выключения тиристорных выпрямителей отличаются только цепями протекания обратного, выключающего тока через тиристоры управляемого выпрямителя.

В схмотехнической модели тиристоры VS1 и VS2 представляются макромоделью на языке PSpice кремниевого управляемого вентиля (SCR), условное графическое изображение которой показано на рис. 6. Макромодель VS и модель диода D1 представляется списком параметров моделей из обширной библиотеки [14]. Импульсное управление тиристорами выпрямителя осуществляется одинаковыми генераторами импульсных сигналов (S1 и S2), частотой 5 кГц, амплитудой 20 В и длительностью 20 мкс. Модели временных реле (T, 0m, 4m и T, 4m, 8m) осуществляют последовательное переключение тиристоров схмотехнической модели в момент времени включения тиристорно-конденсаторного выключателя. V1 — модель источника выпрямленного напряжения питающей сети в виде идеального источника напряжения.

Автономный инвертор в схмотехнической модели представлен индуктивно-активной нагрузкой выпрямителя с дросселем постоянного тока и эквивалентным сопротивлением (R1), определяющим ток нагрузки выпрямителя и постоянную времени его затухания. Остальные компоненты схмотехнической модели ТКВ соответствуют элементам схемы принудительного выключения. Цветные маски функциональных узлов схмотехнической модели (выпрямитель — оранжевая, ТКВ — красная, нагрузка — желтая) защищают ее от непреднамеренных изменений установленных параметров. В режиме расчета переходных процессов программа моделирования позволяет изменять параметры компонентов с заданным шагом. Далее приведены временные диаграммы, полученные при исследовании схмотехнической модели ТКВ. Изменяются эквивалентные параметры автономного инвертора L2 и R1 в пределах, характерных для использования управляемого выпрямителя в ТПЧ мощностью 20–250 кВт.

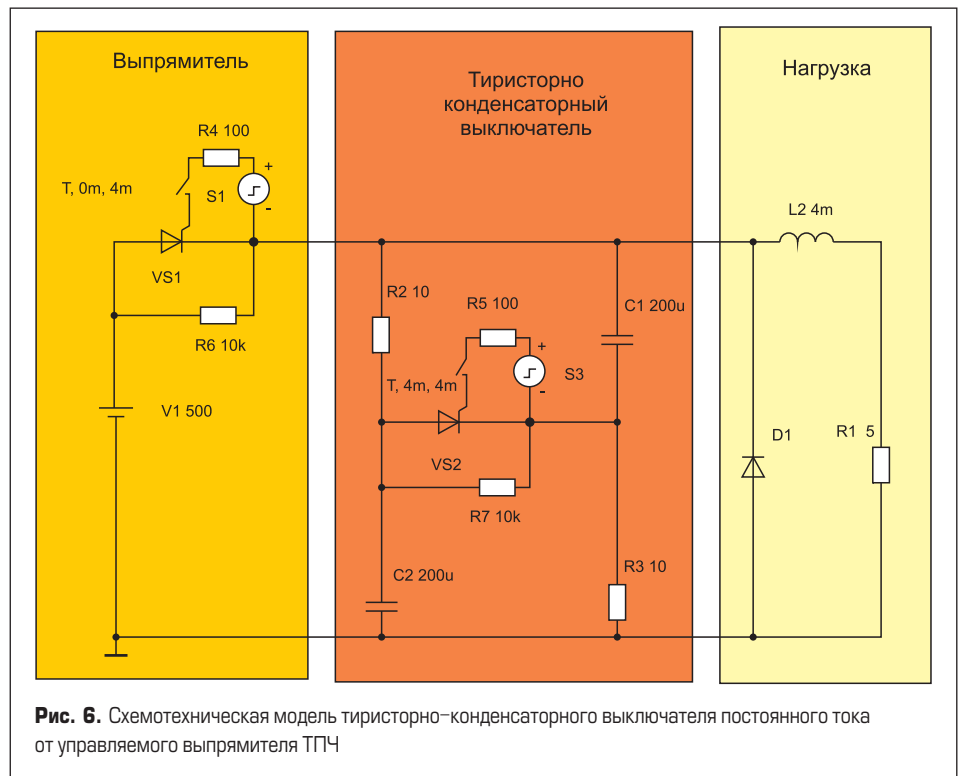


Рис. 6. Схмотехническая модель тиристорно-конденсаторного выключателя постоянного тока от управляемого выпрямителя ТПЧ

На рис. 7 приведена временная диаграмма напряжения на резисторе R6, отражающая изменение напряжения на проходном тиристоре VS1 тиристорно-конденсаторного выключателя при изменении активного сопротивления нагрузки R1 автономного инвертора. График показывает изменение времени восстановления управляемости тиристора при изменении сопротивления R1 от 2 до 5 Ом. Это основной параметр конденсаторного выключателя, характеризующий необходимую емкость конденсатора защиты для надежного отключения выпрямителя от нагрузки. Искомый параметр является функцией $C = C(R1, L2, t_{откл}, U_d)$.

График этой зависимости в интересующем нас диапазоне практически линейный.

На рис. 8 сверху показано семейство графиков времени выключения тиристора выпрямителя при изменении индуктивности автономного инвертора. Данное семейство располагается в интересующей нас области обратной полярности напряжения на тиристоре достаточно плотно и показывает, что изменение индуктивности дросселя постоянного тока практически не влияет на время выключения тиристора защиты, поэтому его можно не учитывать. Такой практически важный вывод затруднительно получить другими методами исследования, кроме схмотехниче-

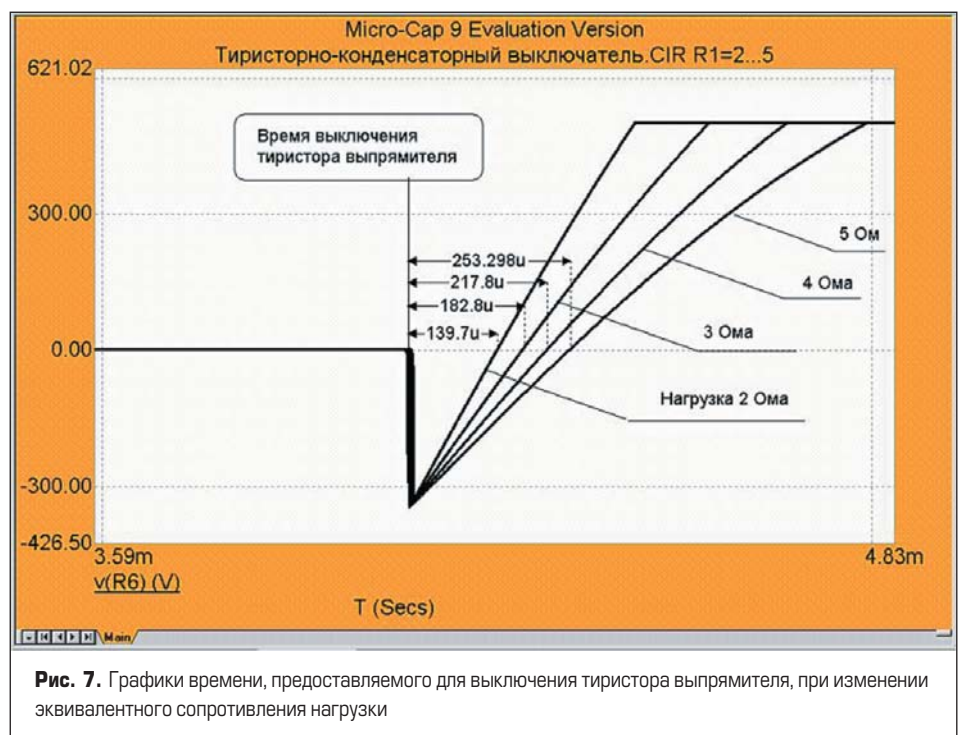


Рис. 7. Графики времени, предоставляемого для выключения тиристора выпрямителя, при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки

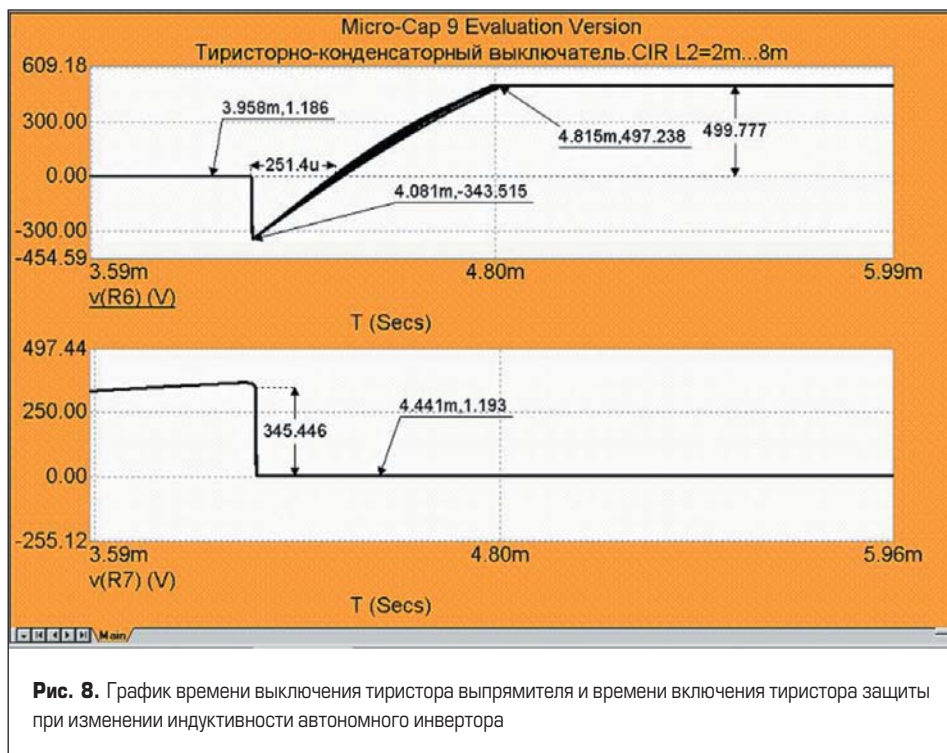


Рис. 8. График времени выключения тиристора выпрямителя и времени включения тиристора защиты при изменении индуктивности автономного инвертора

ского моделирования, представляющего результат, зависящий от многих переменных, каждая из которых влияет в малой степени. При проектировании ТПЧ, различных по частоте и мощности, индуктивность дросселя постоянного тока автономного инвертора также различна: небольшая у ТПЧ повышенной частоты (1,5–2,5 мГц, свыше 10 кГц) и больше (3–4 мГц) у низкочастотных (1–8 кГц) ТПЧ. Следовательно, при проектировании рассматриваемых УПВ для ТПЧ различной частоты индуктивность дросселя постоянного тока также можно не принимать во внимание.

Для снижения габаритов и стоимости системы аварийной защиты необходимо применять тиристоры с собственным временем

восстановления управляемости не более 60 мкс. Критерием надежности системы защиты можно считать кратность превышения паспортного времени восстановления управляемости тиристора защиты.

На верхней диаграмме рис. 8 показаны мгновенные значения напряжений на тиристоре выпрямителя и величина падения напряжения на нем в открытом состоянии при импульсном управлении и прямом токе величиной 100 А, равная 1,186 В. На нижнем графике рис. 8 кривая напряжения на тиристоре ТКВ показывает зависимость включения этого тиристора от начального напряжения 345 В на конденсаторе при резисторах защиты $R1 = R3 = 10 \text{ Ом}$. Величина прямого

падения напряжения на включенном тиристоре равна 1,193 В и он остается включенным, пока на него подаются импульсы управления от БУЗ.

На рис. 9 приведены временные графики затухания тока в индуктивности дросселя (вверху) и тока диода (внизу) автономного инвертора при отключении выпрямителя тиристорно-конденсаторным выключателем. Верхний график показывает незначительное увеличение тока дросселя в момент включения конденсаторной защиты, а совмещенный с верхним по времени нижний график показывает момент включения обратного диода, после которого ток в дросселе и нагрузке затухает в течение нескольких миллисекунд. Рассмотренные процессы протекают независимо от электромагнитных процессов в контуре тиристорно-конденсаторного выключателя, который отделяется включенным диодом, выполняющим функции бесконтактного короткозамыкателя.

На рис. 10 приведены временные графики тока выпрямителя для момента обрыва обратного тока управляемого тиристора при выключении его тиристорно-конденсаторной защитой. Слева внизу показаны исходные кривые постоянного тока выпрямителя, полученные при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки автономного инвертора. Графики иллюстрируют возможности моделирования достаточно сложных процессов в полупроводниковых компонентах схмотехнической PSpice-модели и высокую точность моделирования. В частности, показанный на рис. 10 процесс обрыва обратного тока тиристора амплитудой 56 А, длительностью 2,7 мкс, обычно определяющий амплитуду коммутационных перенапряжений, не приводит к их появлению в этой схмотехнической модели. Это объясняется отсутствием в контуре коммутации сосредоточенных индуктивностей, которые всегда присутствуют в реальных силовых схемах. В эквивалентной схеме не присутствуют паразитные, распределенные индуктивности, а отключаемый тиристор VS1 блокирован идеализированным источником ЭДС и конденсаторами защиты через включенный тиристор ТКВ.

Мы привели некоторые результаты исследования схмотехнической модели в демонстрационной версии программы Micro-CAP. Вывод о том, что модель, тем не менее, верно отражает характер протекающих электромагнитных процессов, сделан на основе многолетнего использования программы и по результатам испытаний промышленных ТПЧ, в которых использовались приведенные технические решения. Аналитические расчеты, распространенные ранее, не давали возможности быстро и точно получить необходимые результаты. Проектирование параметров ТКВ возможно осуществить, моделируя схему аварийной защиты без упрощений, но для этого необходима профессиональная версия программы Micro-CAP, не имеющая ограничений на количество использованных компонентов, описанных на языке PSpice [15]. PSpice-моделирование в демо-версии этой

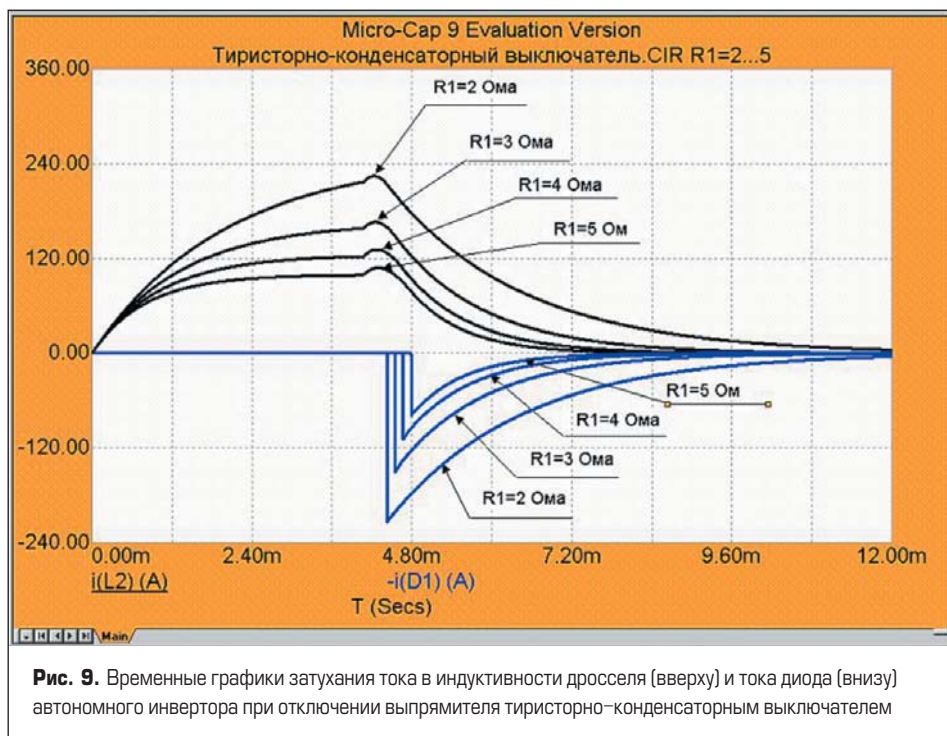


Рис. 9. Временные графики затухания тока в индуктивности дросселя (вверху) и тока диода (внизу) автономного инвертора при отключении выпрямителя тиристорно-конденсаторным выключателем

программы позволяет определить требуемые параметры силовых тиристоров для использования в устройствах бесконтактной защиты и выявить диапазон ее надежной работы.

Особенности проектирования системы бесконтактной защиты ТПЧ

Защита современных ТПЧ сегодня не может быть полностью выполнена на контактных элементах, хотя их защитные характеристики постоянно совершенствуются и еще не достигли предельных величин. Применение бесконтактного быстродействующего тиристорно-конденсаторного выключателя решает задачу повышения быстродействия защиты эффективным способом, но требует согласования защитных характеристик (селективности защиты) всех устройств, обеспечивающих повышение надежности ТПЧ. Так, например, срабатывание многочисленных блокировок, при которых требуется отключение ТПЧ, не требует применения аварийной защиты. В то же время повреждение силовых полупроводниковых элементов ТПЧ, независимо от причины, должно немедленно приводить в действие аварийную быстродействующую защиту, которая должна быть готовой к действию. При проектировании защиты не нужно считать, что если она сложнее и учитывается больше причинно-следственных связей, тем она эффективней. Нами эмпирически выяснено, что надежность системы защиты достаточна, если количество отказов в ней на порядок меньше отказов ТПЧ за одинаковый календарный период. Иначе технико-экономическая эффективность расходов на обеспечение защиты не будет достаточной.

Далее рассмотрим некоторые технические аспекты проектирования ТПЧ и системы его бесконтактной защиты [16, 17]. Выпрямитель ТПЧ обычно выполняется по схеме Ларионова. Эта схема лучше других использует установленную мощность трехфазной сети питания переменного тока, а заземление нейтрали обеспечивает симметрирование напряжений шин постоянного тока выпрямителя относительно «земли». Это является хорошим диагностическим признаком для датчиков замыканий силовых элементов ТПЧ на «землю».

Каждый силовой диод выпрямителя проводит ток один раз за период сетевого напряжения, когда к нему прикладывается максимальное положительное либо отрицательное мгновенное значение напряжения. Однако в течение одного периода входного напряжения 50 Гц на выходе выпрямителя имеет место шесть периодов прохождения тока через диоды. Таким образом, на выходе этого выпрямителя получаем пульсирующее напряжение постоянного тока с частотой пульсаций 300 Гц и действующим значением напряжения 510 В, которое мало отличается от средней величины.

При замыкании силовых контактов выключателя и контакторов на выходе выпрямителя появляется постоянное напряжение, которое заряжает конденсатор защиты. После подачи

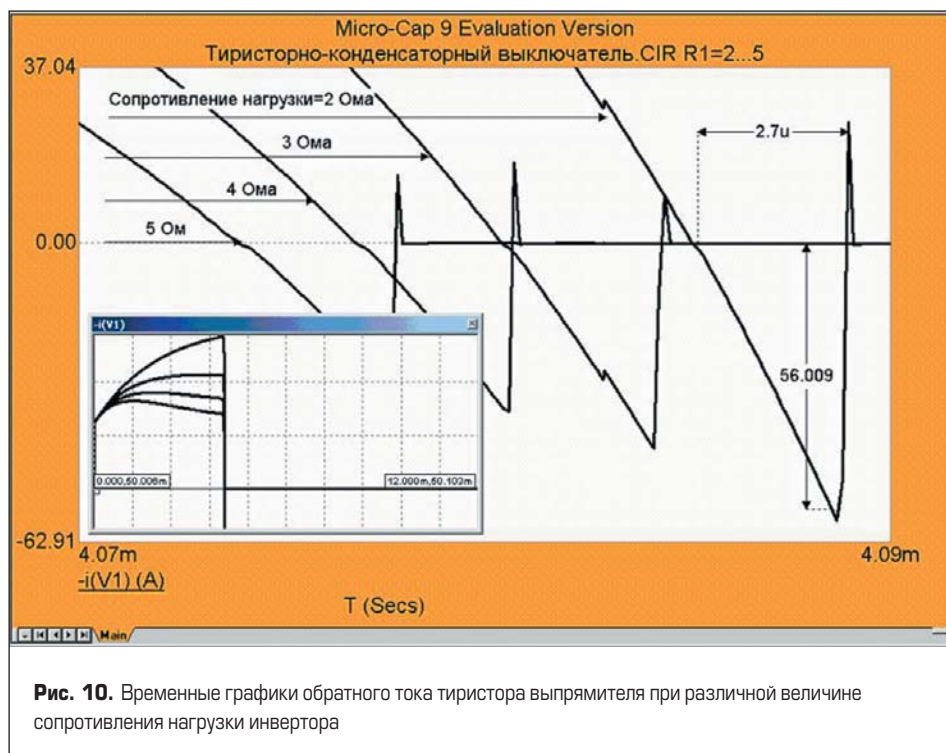


Рис. 10. Временные графики обратного тока тиристора выпрямителя при различной величине сопротивления нагрузки инвертора

импульсов тока управления включается проходной тиристор конденсаторного выключателя. Проходной тиристор выполняет функции бесконтактного ключа между выпрямителем и автономным инвертором ТПЧ, а тиристор защиты служит для выключения инвертора посредством конденсатора защиты.

В случае возникновения аварийных ситуаций на управляющий электрод тиристора защиты поступает импульс управления, одновременно импульсы управления снимаются с проходного тиристора. Тиристор защиты включается, и в результате перезаряда конденсатора защиты прямой ток в проходном тиристоре обрывается и он выключается. Восстановление управляемости тиристора происходит до момента полного разряда конденсатора. При наличии тока во входной цепи инвертора происходит перезаряд конденсатора защиты до напряжения обратной полярности, после чего входной ток инвертора переходит в цепь обратного диода, уменьшаясь до нуля. Обратный диод выпрямителя обеспечивает непрерывное протекание тока дросселя инвертора при отключении выпрямителя быстродействующей защитой.

В различных схемах ТКВ используется различное число конденсаторов защиты, но для того, чтобы сравнивать возможные варианты по эффективности, эквивалентная емкость конденсаторов в цепи перезаряда защиты должна быть одинакова [18]. Для отключения тиристорного преобразователя в аварийных режимах конденсатор защиты должен быть заряжен до уровня, обеспечивающего гарантированное прерывание тока инвертора. Этот уровень определяется во втором этапе схемотехнического моделирования, когда в модели устанавливаются необходимые параметры тиристоров.

Датчик конденсатора защиты (ДКЗ) регистрирует величину заряда конденсатора.

Он формирует сигнал пуска при достижении необходимого уровня напряжения на конденсаторе и подает сигнал остановки при уровне заряда конденсатора защиты меньше номинального. Датчик контроля заряда конденсатора — электромагнитное реле, шунтированное стабилитроном, с нормально разомкнутым контактом. Обмотка реле подключается к выводам конденсатора защиты через токоограничивающие резисторы.

В заключение для конкретизации полученных результатов укажем тип и номинальные величины полупроводниковых компонентов, использованных при проектировании источника питания и ТКВ, для наиболее распространенных ТПЧ мощностью до 250 кВт. В составе блока выпрямителя, применяются следующие элементы: тиристоры Т143–500–13, ТУ16–729.221–79, диоды Д151–400–13, ТУ16–729.104–81, проходной тиристор типа ТБИ 343–630–13, ТУ16–99 ИЕАЛ 432000.040ТУ; обратный диод выпрямителя Д151–160–13–4, ТУ16–729.104–81. В тиристорно-конденсаторном выключателе ТПЧ применяются: штыревой тиристор защиты ТБ171–200–12–433, ТУ16–729.230–79; варисторы СН2–2А–910±10% В, ОЖО.468.205ТУ; конденсатор защиты МБГВ–1000В–200 мкФ, ОЖО.462.098ТУ.

Цепи демпфирующие, располагаемые непосредственно на плате выпрямителя, применяются для предохранения тиристоров выпрямителя и тиристора устройства защиты от перенапряжений, они ограничивают скорость нарастания напряжения и амплитуду коммутационных перенапряжений. Варисторы, включенные параллельно тиристорам защиты, ограничивают амплитуду неповторяющихся перенапряжений на выходе выпрямителя. Датчиком перенапряжений служит трансформатор, на его выходе, через

однофазный выпрямитель, формируется сигнал варисторной защиты выпрямителя.

При работе автономного инвертора на все тиристоры выпрямителя одновременно подаются сигналы управления с частотой около 20 кГц и поэтому они находятся во включенном состоянии, без задержки тока при фазных коммутациях, обеспечивая на выходе выпрямленное напряжение. Тиристор защиты включается последовательностью импульсных сигналов напряжением 25 В, длительностью 20 мкс, частотой 20 кГц. Трансформаторы высокочастотные, расположенные непосредственно на плате выпрямителя, передают сигналы управления на тиристоры выпрямителя и тиристора защиты.

Заключение

1. Рассмотренные тиристорно-конденсаторные выключатели применяются в установках для индукционного нагрева металлов, если выпрямитель ТПЧ выполнен с использованием не полностью управляемых силовых тириستоров, а на входе автономного инвертора имеется дроссель постоянного тока.

2. Рассмотрение особенностей протекания тока в ТКВ позволило создать обобщенную схемотехническую модель отключения аварийного процесса в ТПЧ различной мощности и частоты, при этом питающая трехфазная сеть и выпрямитель представлены источником постоянного напряжения и одним управляемым тиристором, а автономный инвертор представлен эквивалентной индуктивно-активной нагрузкой.

3. PSpice-моделирование позволяет определить требуемые параметры силовых тиристоров выпрямителя и быстродействующего тиристора защиты для использования в устройствах бесконтактного отключения.

При проектировании УПВ бесконтактной защиты изменение величины индуктивности дросселя постоянного тока автономного инвертора у ТПЧ различной мощности можно не принимать во внимание.

Литература

1. Глух Е. М., Зеленов В. Е. Защита полупроводниковых преобразователей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат. 1982 г.
2. А.с. № 907675 (СССР). Статический преобразователь с защитой / В. Э. Дель, Ф. Ш. Абсалямов, А. К. Белкин, В. Б. Миков, А. Н. Сухарев // Бюл. 1982. №7.
3. А.с. № 801176 (СССР). Устройство для защиты полупроводникового инвертора. / А.В. Иванов, П. С. Ройзман, А. М. Уржумсков, Ю. М. Зинин // Бюл. 1981. №4.
4. А.с. № 1089695 (СССР). Устройство для защиты вентиляного преобразователя / А. К. Белкин, Ю. В. Воробьев, Г. Е. Иванов, П. С. Ройзман // Бюл. 1984. №16.
5. А.с. № 1081763 (СССР). Преобразователь переменного напряжения в постоянное / А. К. Белкин, Ю. В. Воробьев, Г. Е. Иванов, Н. П. Попов // Бюл. 1984. №16.
6. А.с. № 481964 (СССР). Устройство защиты источника питания. / С. М. Кацнельсон, Ю. М. Зинин, А. М. Иванов, А. М. Уржумсков, П. С. Ройзман // Бюл. 1975. №31.
7. А.с. № 513440 (СССР). Способ защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя / Ю. М. Зинин, А. В. Иванов, В. А. Пацкевич, А. М. Уржумсков // Бюл. 1976. №17.
8. Аитов И.Л. Защита тиристорного преобразователя частоты при аварийных режимах: Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. Уфа: 1972. Вып. 2.
9. 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.
10. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Анализ аварийного процесса при срыве режима инвертирования в многомостовых резонансных инверторах с индуктивным входом // Электромеханика. Известия вузов. 1984. №5.
11. Зинин Ю. М., Васюра В. В., Дубов С. А. Устройство защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя. Академия наук РБ. 1981. НТД № 81–5.
12. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электро-технологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
13. Зинин Ю., Шапиро С. Дифференциальные датчики систем аварийной защиты в тиристорных преобразователях повышенной частоты для индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. №5.
14. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования с помощью Micro-CAP V. М.: СОЛОН. 1997.
15. <http://www.spectrum-soft.com/manual.shtml>.
16. Белкин А. К., Гутин Л. И., Таназлы И. Н., Шуляк А. А. Элементы индукционных установок. М.: Энергоатомиздат. 2007.
17. Абсалямов Ф. Ш., Белкин А. К., Гутин Л. И., Закиров Р. А., Шуляк А. А. Индукционные установки. М.: Энергоатомиздат. 2009.
18. Зинин Ю. М., Терешкин В. М. Выявление критерия надежности системы бесконтактной защиты электроэнергетического оборудования. Межвуз. научн. сб. «Электротехнические комплексы и системы». Уфа: УГАТУ. 2001.