

Продолжение. Начало в №5'2009

Электронная компонентная база силовых устройств

Часть 2

Рассмотрены применяемые в настоящее время полупроводниковые силовые компоненты: тиристоры, оптотиристоры, симисторы и оптосимисторы — как в дискретном, так и в модульном исполнении. Особое внимание уделено запираемым тиристорам очень большой мощности. Обзор дается для компонентов отечественного и зарубежного производства.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

В работе [1] указывается, что, несмотря на очень широкую номенклатуру компонентов для современных силовых устройств (СУ), в рамках разумных ограничений для наиболее широко распространенных классов СУ возможно дать обзор компонентной базы, интересующей читателей. Прежде всего, это компоненты для импульсных источников питания, различных инверторов и преобразователей, регуляторов напряжения, устройств управления электроприводом, устройств «климат-контроль» (нагревательных и кондиционеров), переносных сварочных агрегатов, передвижного (ручного) электроинструмента и т. д. На основании существующей классификации СУ (например, [2–4]), были введены следующие ограничения. Предметом рассмотрения выбраны в основном силовые электронные компоненты для применения в импульсных ИВЭ с мощностью более 500 Вт, для электроприводов и других СУ с мощностью до 40 кВт, а в некоторых случаях — до 100 кВт. Более конкретно это означает, что главным образом мы рассматривали характеристики и анализировали особенности силовых электронных ключей на токи от 10–20 А до 200–250 А и более, с напряжениями от 100 В до 1200–4500 В и более, как отечественного, так и зарубежного производства. В то же время для иллюстрации возможностей силовых приборов более кратко будут также приведены параметры приборов на напряжения более 2000 В и токи более 1000 А. Непосредственно в статье [1] были рассмотрены различные диоды: низкочастотные и быстродействующие, включая диоды Шоттки.

Начиная с середины 90-х годов рынок силовой электроники в России все больше и больше заполнялся зарубежными компонентами, которые в своей массе были более современными (перспективными) и имели лучшие параметры и высокое качество изготовления. Свою отрицательную (и существенную) роль в отношении российских компонентов сыграла и проводимая в те годы политика реформ. Об этих тенденциях авторы неоднократно писали. Но в по-

следние годы российские фирмы — производители электронных компонентов, на основе использования передовых зарубежных технологий и внедрения современного высокопроизводительного оборудования, сделали заметные успехи по выпуску силовых компонентов [5, 6]. Отечественная электронная промышленность и ранее, и сейчас традиционно ориентирована в основном на рынок компонентов для промышленного и военного применения. Перейдем к рассмотрению структур, отличительных особенностей и основных параметров следующих классов современных силовых полупроводниковых приборов:

- тиристоры и оптотиристоры;
- запираемые тиристоры типа GTO, GCT и IGCT;
- симисторы и оптосимисторы.

Тиристоры

Тиристоры — это четырехслойные ($p-n-p-n$) кремниевые полупроводниковые приборы с внутренней положительной обратной связью (эффект «защелкивания», или триггерный эффект), имеющие два устойчивых состояния. В зависимости от характера вольт-амперной характеристики (ВАХ) и способа управления, вообще говоря, тиристоры принято разделять на следующие классы (группы) [7]:

- диодные (динисторы);
- триодные тиристоры, иногда называемые традиционными тиристорами или кремниевыми управляемыми выпрямителями — КУВ (Silicon Control Rectifier — SCR);
- запираемые тиристоры (Gate Turn Off — GTO и их улучшенные модификации GCT, IGCT);
- оптоэлектронные тиристоры (оптотиристоры);
- симметричные тиристоры (симисторы, или триаки);
- оптоэлектронные симисторы.

Триодные тиристоры (или просто тиристоры), в зависимости от расположения управляющего электрода (УЭ/Gate — G), делятся на тиристоры с катодным управлением и тиристоры с анодным управлением. В силовых тиристорах в основном ис-

пользуется катодное управление, при котором управляющее напряжение приложено между УЭ и катодом.

Эти приборы имеют ряд существенных особенностей. Во-первых, управление осуществляется только процессом включения приборов, то есть после включения УЭ теряет свои свойства в части запирания (за исключением запираемых тиристоров). Для выключения тиристора необходимо, чтобы несомненные носители, накопленные в базовых областях анода (А) и катода (К), рекомбинировали. В противном случае эти носители могут привести к появлению базового тока и повторному включению тиристора. При выключении существует условие ограничения скорости нарастания приложенного обратного напряжения, поскольку быстрое увеличение запирающего напряжения может привести к появлению достаточно большого для (повторного) переключения тиристора тока смещения, пропорционального емкости его *p-n*-переходов. Практически выключить тиристор можно только, понизив ток в силовой цепи (А–К) до значения, меньшего тока удержания (holding current), или сделав не положительным напряжение на аноде. При этом скорости изменения напряжения dU_D/dt и тока dI_T/dt в силовой цепи не должны превышать допустимых (критических) значений этих параметров с учетом максимальной рабочей температуры приборов. К достоинствам тиристоров, кроме простоты включения, можно отнести низкие потери проводимости, высокую перегрузочную способность и надежность. Они могут соединяться как параллельно, так и последовательно.

Основными электрическими параметрами тиристоров являются согласно [7, 8]:

а) для силовой цепи:

- максимально допустимое обратное повторяющееся напряжение U_{RRM} или прямое напряжение U_{DRM} в закрытом состоянии;
- максимально допустимый средний выпрямленный / эффективный (среднеквадратичный) ток $I_{T(AV)}/I_{T(RMS)}$;

- максимально допустимый импульсный ток I_{TSM} — для повторяющихся или единичных импульсов (за время, мс);
 - максимальный ток удержания во включенном состоянии I_H ;
 - прямое падение напряжения на включенном тиристоре U_{TM} ;
 - максимально допустимая (критическая) скорость нарастания тока dI_T/dt во включенном состоянии;
 - максимально допустимая (критическая) скорость нарастания напряжения dU_D/dt (или dU_T/dt) в закрытом состоянии;
- б) для цепи управления:
- максимальное напряжение управления U_{GM} ;
 - максимальный ток управления I_{GM} ;
- в) параметры быстродействия:
- время задержки включения t_{d} ;
 - время выключения t_q .

О необходимости соблюдения безопасных режимов работы тиристоров указано во многих публикациях, в том числе в работе авторов [8]. В частности, обеспечение надежной работы тиристоров в случае возникновения экстремальных режимов требует, как и для быстродействующих диодов, учета предельной величины защитного показателя I^2t (A^2c). Обязательно применение специальных защитных цепей для ограничения скорости нарастания тока dI_T/dt и напряжения dU_D/dt . При этом индуктивный реактор (дроссель) для ограничения dI_T/dt при включении тиристора устанавливается последовательно с прибором (в анодной цепи). Цепи типа RC — демпфер или чаще RCD — снаббер, используемые для ограничения dU_D/dt , подключаются параллельно защищаемому прибору (выводы А–К). Кроме того, параллельно этим выводам иногда включается быстродействующий блокирующий диод, а также может устанавливаться варистор для ограничения возможных импульсных высокочастотных перенапряжений. В настоящее время, вследствие конкуренции с MOSFET и IGBT, нижняя граница области

промышленного применения тиристоров «сместилась» к диапазону мощностей в десятки киловатт. Прежде всего, это сверхмощные источники питания, регуляторы напряжения, электроприводы постоянного тока, сварочное оборудование, нагревательные установки и другие. Вместе с тем в изделиях бытового назначения (регуляторы переменного напряжения и т. д.) тиристоры продолжают успешно применяться вследствие их невысокой стоимости и высокой надежности.

Тиристоры выпускаются многими отечественными и зарубежными фирмами. Из зарубежных производителей крупнейшими являются [6]: American Microsemiconductor, Digi-Key, ON Semiconductor, Onlinecomponents, Infineon, Eupec, IXYS. Выпущенные в 2007 г. фирмой Eupec [9] тиристоры типа T281N65TOF и T571N65TOF предназначены для электроприводов с плавным стартом и выпрямителей на средние напряжения (таблица 1). Тиристор T281N65TOF монтируется в керамический прижимной таблеточный корпус (диаметр 58 мм), а T571N65TOF — в корпус диаметром 75 мм.

Компания Westcode [10] начала производство новых тиристоров на импульсное обратное напряжение 600 В и ток от 2155 до 6975 А в малогабаритных корпусах серии Wespack (высота 14 мм, диаметр от 32 до 68 мм) [6]. Для таких приборов достигнуто максимальное отношение мощности к массо-габаритному показателю без ухудшения их качества и надежности. Тиристоры этой серии характеризуются максимальным током $I_{T(AV)}$ для приборов с аналогичными габаритами и массой и минимальным тепловым сопротивлением кристалл-корпус ($R_{thJC} = 0,018–0,009$ °C/Вт). Можно также указать на новые быстродействующие тиристоры компании Westcode, которые выдерживают средний ток 4000 А при температуре +55 °C. Они имеют герметичный капсульный корпус прижимной конструкции диаметром 100 мм с высотой 36 мм (модель R3968FC28x — для 2800 В)

Таблица 1. Основные характеристики некоторых силовых тиристоров отечественного и зарубежного производства

| Наименование (фирма) | U_{RRM} , В | $I_{T(AV)}$, А [T, °C] | $I_{T(RMS)}$, А | I_{TSM} , А (время, мс) | U_{TM} , В | dI_T/dt , А/мкс | dU_D/dt , В/мкс | Корпус [R_{thJC} , °C/Вт] |
|---------------------------|---------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| Отечественные | | | | | | | | |
| T112-16-X | 1200 | 16 [85] | 25,2 | 200 (10) | 1,8 | 125 | 1000 | Штыревой [1,5] |
| T122-25-X | 400–1200 | 25 [85] | 39,2 | 350 (10) | 1,75 | 125 | 1000 | Штыревой [0,8] |
| T242-25 | 100–1200 | 25 [70] | 40 | 600 | 1,85 | 40 | 20–1000 | Штыревой [0,7] |
| T132-50-X | 400–1200 | 50 [85] | 78,5 | 800 (10) | 1,75 | 125 | 1000 | Штыревой [0,5] |
| T242-50 | 100–1200 | 50 [70] | 79 | 800 | 1,85 | 40 | 20–1000 | Штыревой [0,36] |
| T142-80-X | 600–1200 | 80 [85] | 125,6 | 1500 (10) | 1,63 | 125 | 1000 | Штыревой [0,3] |
| T242-80 | 100–1200 | 80 [70] | 125 | 1350 | 1,75 | 40 | 20–1000 | Штыревой [0,24] |
| Зарубежные | | | | | | | | |
| BT152-600R/800R (Philips) | 600/800 | 13 | 20 | 200 (10) | 1,75 | 200 | 300 | ТО-220AB |
| CS23-12L02 (IXYS) | 1200 | 25 [85] | 50 | 480 (10) | 1,2 | – | 1000 | ТО-208AA [1,0] |
| CLA80E1200HF (IXYS) | 1200 | 80 [115] | 126 | 900 (10) | 1,37 | – | 1000 | Plus247 [0,247] |
| R0809LS06X (Westcode) | 600 | 809 [55] | – | 8000 | 2,1 | 40 | 200 | Таблеточный [0,03] |
| R0472YS12X (Westcode) | 1200 | 472 [55] | – | 4300 | 1,65 | 40 | 200 | Таблеточный [0,05] |
| T281N65TOF (Eupec) | 6500 | 280 [85] | 600 | 4800 (10) | 2,75 | 150 | 1000 | Модуль [0,04] |
| T571N65TOF (Eupec) | 6500 | 540 [85] | 1150 | 9400 (10) | 2,75 | 150 | 1000 | Модуль [0,02] |

и 26 мм (модель R3968FD28x — для 2800 В). Высокоэффективная вертикальная структура кремния и широко распределенный управляющий электрод предлагают непревзойденные (по мнению компании) характеристики по быстродействию переключения при минимальных потерях проводимости. Все типы новых тиристоры могут иметь один из четырех вариантов времени выключения (t_q): 60, 65, 70 и 100 мкс — для индексов К, L, М и N. Если необходимо заказчику, то тиристоры могут быть более тщательно отобраны по обратным характеристикам восстановления или изготовлены во взрывобезопасном исполнении. Большое значение номинального тока тиристора R3968FXXX дает возможность построить намного более высокую по мощности (более 10000 кВт) резонансную систему с частотой переключения до 8 кГц для индукционных нагревающих печей и силовых импульсных источников питания, без потребности в более дорогостоящем параллельном соединении нескольких тиристоров, как это делалось ранее.

Отечественные тиристоры в начале развития имели достаточно высокие характеристики, находились на уровне зарубежных аналогов и поставлялись на экспорт [11]. К сожалению, в дальнейшем тиристоры, как, впрочем, и большинство отечественных электронных компонентов (особенно с приемкой «1»), сдали свои позиции. В настоящее время российские фирмы — производители силовых компонентов, например [12], выпускают новое поколение тиристоров на современном по всем показателям уровне. Это стало возможным благодаря использованию передовых зарубежных технологий и внедрению современного высокопроизводительного оборудования. В таблице 1 представлены основные характеристики некоторых тиристоров отечественного [12, 13] и зарубежного [6, 9, 14] производства.

Оптотиристоры

В традиционных оптотиристорах силовая цепь (анод-катод) аналогична такой же цепи обычного триодного тиристора, но цепь управления гальванически развязана от силовой цепи с помощью встроенного оптоизлучателя. Авторам неизвестны силовые оптотиристоры производства зарубежных фирм развитых стран Запада. В СССР оптотиристоры, а затем и оптосимисторы появились в начале 80-х годов. Они получили достаточно широкое распространение, в том числе в регуляторах переменного и выпрямленного напряжения сетевой частоты, в нагревательных

установках, в защитных устройствах и т. д. Наличие гальванической развязки силовой цепи от управления (за счет оптического канала) очень удобно и позволяет управлять силовой цепью непосредственно от низковольтного устройства управления (УУ). Важным параметром развязки является электрическая прочность изоляции между основанием и силовыми выводами, а также между силовыми выводами и выводами управления. Одним из основных производителей оптотиристоров и оптотиристорных модулей в СССР, а затем в России является ОАО «Оптон-Ставрополь» (г. Ставрополь) [14]. Начав с производства оптотиристоров со сравнительно небольшими токами — ТО125-(6,3;-; 10-), предприятие затем стало выпускать усовершенствованные модели оптотиристоры: ТО325-(10;-; 12,5;-); ТО425-(12,5;-; 16-), ТО525-(10;-; 12,5;-; 16-); ТО135-(25;-; 40;-; 63;-; 80-), ТО146-80, а также оптотиристорных двоясных модулей МТОТОИ-40/80, МТОТО-160.

Приведем для иллюстрации некоторые параметры и особенности работы оптотиристоры серии ТО135-Х-XX (ИЖТШ.432362.003ТУ) производства ОАО «Оптон-Ставрополь»:

- силовая цепь: $U_{RRM} = 400\text{--}1200$ В (по классам), $I_{T(AV)}$ = (25; 40; 63; 80) А — при температуре 70°C , $U_{TM} = 1,85$ В; $dU_D/dt = 20\text{--}50$ В/мкс;
- цепь управления (оптоизлучатель): $U_{GM} = 2,5$ В (неотпирающее $U_{G\min} = 0,9$ В); $I_{GM} = 80\text{--}250$ мА (по группам);
- гальваническая развязка: электрическая прочность изоляции между основанием и силовыми выводами, а также между силовыми выводами и выводами управления — не менее 2000 В.

Отметим неплохие показатели надежности: вероятность безотказной работы за время 1000 ч — $P(1000) \geq 0,95$; $T_\gamma = 15$ лет (γ — процентный срок службы — 90%).

Оптотиристоры ТО135-Х-XX конструктивно выполнены в виде модуля типа Isotop, в котором основание электрически изолировано и от силовой, и от управляющей цепей. При применении ТО135-Х-XX имеют ряд особенностей. В частности, для работы в цепях переменного тока напряжением 220 В рекомендуется использовать оптотиристоры не ниже 6 класса (600 В), при напряжении 380 В — оптотиристоры 10–12 класса (1000–1200 В). При работе оптотиристоры на индуктивную нагрузку рекомендуется использовать режим управления пачками импульсов тока: длительность импульсов в пачке 8–10 мкс при периоде следования импульсов в пачке 30–40 мкс; скважность и амплитуда пачек импульсов выбирается из условий неперевышения среднего

тока управления 40 мА за 20 мс. При работе оптотиристоры на безиндуктивную нагрузку рекомендуется длительность импульса тока управления 50 мкс. Не рекомендуется подача сигнала управления при приложении к оптотиристоры обратного напряжения.

В таблице 2 представлены основные характеристики некоторых оптотиристоры отечественного производства [15].

Личный опыт работы с оптотиристоры (ТО325-12,5, МТОТО-80) одного из авторов в середине 90-х — начале 2000 г.г. описан в работе [16]. В частности, для тиристорных модулей МТОТО-80 приходилось вводить обязательный 100%-й входной контроль и по его результатам производить отбраковку образцов (до 10–15%). Возможно, это явилось следствием ненадлежащих условий хранения приборов у производителя или дилера в сложные 1990-е годы.

В последние годы за рубежом, а потом и в России появилась новая разновидность оптотиристоры (фототиристоры) большой и супербольшей мощности. В них оптоизлучатель находится в устройстве управления, а оптический сигнал управления (световая мощность/энергия) передается на тиристор по оптоволоконному кабелю. Но такие тиристоры строятся уже по структуре запираемых тиристоры класса IGCT.

Запираемые тиристоры

Рассмотрим отдельно и более подробно этот класс силовых тиристоры, поскольку в России его обсуждают и о нем пишут гораздо реже. С этой целью используем материалы работ [6, 17, 18, 19]. Для устранения основного недостатка традиционных тиристоры вскоре после их создания стали проводиться исследования с целью обеспечить их выключение по управляющему электроду. Главная проблема состояла в обеспечении быстрого рассасывания носителей зарядов в базовых областях. Первые такие тиристоры появились в 1960 г. в США и получили название Gate Turn Off (GTO). В нашей стране они больше известны как запираемые, или выключаемые, тиристоры.

Запираемый тиристор — полностью управляемый полупроводниковый прибор, который включается и выключается соответственно подачей положительного и отрицательного импульсов тока на электрод управления. Различия в структурах приборов заключаются в ином расположении горизонтальных и вертикальных слоев с n - и p -проводимостями. Катодный слой N разбит на несколько сотен

Таблица 2. Основные характеристики отечественных силовых оптотиристоры

| Наименование | U_{RRM} , В | $I_{T(AV)}$, А [T, °C] | $I_{T(RMS)}$, А | I_{TSM} , А (время, мс) | U_{TM} , В | di_T/dt , А/мкс | dU_T/dt , В/мкс | Корпус [$R_{th\ j-c}$, °C/Вт] |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|---------------------------|----------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|
| ТО525-(10; 12,5; 16)- | 400–2000 (по классам) | 10; 12,5; 16 | 16; 20; 25 | 400–500 | 1,75 | – | 20–1000 (по классам) | Типа Isotop |
| ТО135-XX | 400–1200 (по классам) | 25–60 [70] | – | – | 1,85 | – | 20–50 | Типа Isotop |
| ТО146-(50; 63; 80)-X | 400–2000 (по классам) | 50; 63; 80 | – | – | 2,0; 2,0; 1,85 | – | 20–1000 (по классам) | Штыревой металлоглазанный |
| ТО232-25 | 100–1200 (то же) | 25 [70] | 40 | 600 (10) | 1,85 | 40 | 20–1000 (то же) | Штыревой [0,7] |
| ТО242-50 | 100–1200 (то же) | 50 [70] | 79 | 800 (10) | 1,85 | 40 | 20–1000 (то же) | Штыревой [0,36] |
| ТО242-80 | 100–1200 (то же) | 80 [70] | 125 | 1350 | 1,75 | 40 | 20–1000 (то же) | Штыревой [0,24] |

элементарных ячеек, равномерно распределенных по площади и соединенных параллельно. Например, полупроводниковый кристалл диаметром 91 мм имеет 2000 сегментов, каждый из которых может запереть ток до 2 А. Поскольку все сегменты кристалла соединены параллельно, то суммарный запираемый ток составит 4000 А при одновременном срабатывании всех сегментов. Вследствие этого обеспечивается равномерное снижение тока по всей площади полупроводниковой структуры при выключении прибора. Анодный слой Р имеет шунты (зоны N-), соединяющие N-базу с анодным контактом через небольшие распределенные сопротивления. Анодные шунты предназначены для уменьшения времени выключения прибора за счет улучшения условий «извлечения» зарядов из базовой области N. Несколько слов об особенностях работы тиристора GTO.

В цикле работы тиристора GTO различают четыре фазы: включение, проводящее состояние, выключение и блокирующее состояние. При включении запираемые тиристоры предъявляют жесткие требования к крутизне фронта dI_G/dt и амплитуде I_{GM} тока управления. Использование тиристоров GTO требует обязательного применения специальных защитных цепей для ограничения скорости нарастания тока dI_T/dt . При выключении тиристора GTO при неизменной (положительной) полярности напряжения U_T к управляющему электроду и катоду прикладывается управляющее напряжение отрицательной полярности ($-U_G$). Оно вызывает ток выключения, протекание которого ведет к рассасыванию основных носителей заряда (дырок) в базовом слое Р-. По мере освобождения от них тиристор начинает запирается. Этот процесс характеризуется резким уменьшением прямого тока I_T тиристора за короткий промежуток времени. После того как вся энергия, запасенная в индуктивности цепи управления, будет израсходована, ток через тиристор равен току утечки, который протекает от анода к катоду. В режиме блокирующего состояния к управляющему электроду и катоду остается приложенным напряжение отрицательной полярности ($-U_G$) от устройства управления. При включении всем типам GTO требуется защитная цепь, ограничивающая скорость нарастания прямого тока, — индуктивный реактор (дроссель). При выключении запираемому тиристорному необходима защита от скорости нарастания прямого напряжения — RCD-цепь (снаббер), о которой было сказано выше. Запираемый тиристор оптимизирован для низких потерь в проводящем состоянии. Типичная частота переключения — от 50(60) до 200–300 Гц для классического GTO. Приборы GTO по своей природе являются сравнительно медленными ключами. Среднее время перехода от включенного к выключенному состоянию и обратно составляет от 10 до 30 мкс.

Основное конструктивное исполнение тиристорных GTO — таблеточное с четырехслойной кремниевой пластиной, зажатой через термокомпенсирующие молибденовые

диски между двумя медными основаниями, обладающими повышенной тепло- и электропроводностью. С кремниевой пластиной контактирует управляющий электрод, имеющий вывод в керамическом корпусе. Прибор зажимается контактными поверхностями между двумя половинами охладителей, изолированных друг от друга и имеющих конструкцию, определяемую типом системы охлаждения. Все запираемые тиристоры фирмы ABB Semiconductors (ABB) [20], одного из ведущих производителей GTO, выпускаются в таблеточных корпусах.

Сейчас тиристоры GTO производят более десятка фирм: Toshiba, Hitachi, Mitsubishi, ABB, Eures и другие. Параметры тиристоров по напряжению U_{DRM} : 2500; 4500; 6000 В; по току I_{TQM} (максимальный повторяющийся запираемый ток): 1000; 2000; 2500; 3000; 4000; 6000 А. Так, фирма ABB в 2007 г. выпускала 15 типонаименований GTO (3 номинала напряжения, 5 типоразмеров таблеточных корпусов): от 2500 до 6000 В и от 1500 до 4000 (6000) А. Для примера, GTO этой фирмы типа 5S30J4502 имеет следующие параметры: $U_{DRM} = 4500$ В, $I_{GQM} = 3000$ А, $I_{TSM} = 32000$ А (10 мс, 125 °С), $U_{T0} = 2,2$ В, $f < 500$ Гц [20]. Основные области применения GTO: мощные электроприводы двигателей с регулируемой скоростью вращения, статические компенсаторы, системы бесперебойного питания, оборудование индукционного нагрева.

В середине 90-х годов фирмами ABB Semiconductors (ABB) и Mitsubishi Electric Semiconductor (Mitsubishi) [21] был разработан новый вид тиристорных — запираемый тиристор с кольцевым выводом управляющего электрода, получивший название тиристор с жестким управлением (HDGTO), или Gate Commutated Thyristor (GCT). GCT разрабатывался как прибор, лишенный недостатков, характерных для GTO. Вследствие этого процессы, происходящие при его выключении, заметно изменились. В частности, сделав тиристор нечувствительным к эффекту dU_T/dt , стало возможным отказаться от снабберной цепи, что и было реализовано в конструкции GCT.

Основной особенностью тиристорных GCT, по сравнению с приборами GTO, является быстрое выключение. Оно достигается как изменением принципа управления, так и совершенствованием конструкции прибора. Быстрое выключение реализуется превращением тиристорной структуры в транзисторную при запирающем приборе, что делает прибор нечувствительным к эффекту du/dt . В фазах включения, проводящего и блокирующего состояний GCT управляется так же, как и GTO. Управляющий электрод обладает низкой индуктивностью, что позволяет достичь скорости нарастания тока управления dI_G/dt , равной 3000 А/мкс и более (для тиристорных GTO значение dI_G/dt составляет 30–40 А/мкс).

При выключении после подачи отрицательного импульса управления ($-I_g$), равного по амплитуде величине анодного тока (I_a), весь прямой ток, проходящий через прибор,

отклоняется в устройство управления и достигает катода, минуя переход между областями Р- и N-. Этот переход смещается в обратном направлении, и катодный *n-p-n*-транзистор закрывается. Дальнейшее выключение GCT аналогично выключению любого биполярного транзистора, что не требует внешнего ограничения скорости нарастания прямого напряжения du/dt . Изменение конструкции GCT связано с тем, что динамические процессы, возникающие в приборе при выключении, протекают на один-два порядка быстрее, чем в GTO. Так, если минимальное время выключения и блокирующего состояния для GTO составляет 100 мкс, для GCT эта величина не превышает 10 мкс. Скорость нарастания тока управления при выключении GCT составляет 3000 А/мкс, GTO — не превышает 40 А/мкс. Для обеспечения высокой динамики коммутационных процессов пришлось изменить конструкцию вывода управляющего электрода и соединение прибора с формирователем импульсов УУ. Вывод сделан кольцевым, опоясывающим прибор по окружности. Кольцо проходит сквозь керамический корпус тиристора и внутри контактирует с ячейками управляющего электрода. Снаружи контакт осуществляется с пластиной, соединяющей управляющий электрод с формирователем импульсов.

Тиристоры GCT, выпускаемые фирмами Mitsubishi и ABB, рассчитаны на напряжение U_{DRM} до 6500 В и ток I_{TQM} до 4000 А [20, 21]. Так, в частности, GCT типа GCU08AA-130 (Mitsubishi) имеет следующие параметры: $U_{DRM} = U_{RRM} = 4500$ В, $I_{TQM} = 3000$ А, $I_{T(AV)} = 330$ А, $I_{TSM} = 800$ А (8,3 мс; 115 °С), $U_T = 6,8$ В (800 А), $dU/dt = 3000$ В/мкс $f < 500$ Гц.

В настоящее время тиристоры GCT и GTO освоены ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) [6, 12], в частности тиристоры серий ТЗ-243, ТЗ-253, ТЗ-273, ЗТА-173, ЗТА-193, ЗТФ-193 (подобен GCT) и др. У этих тиристорных диаметр кремниевой пластины — до 125 мм, напряжение $U_{DRM} = 1200$ –6000 В и ток $I_{TQM} = 630$ –4000 А.

Приведем примеры применения мощных запираемых тиристорных из зарубежного опыта [22]. В Германии в середине 1990-х годов, например, в крупной компании DBEnergie длина сети линий тягового электроснабжения частотой 162/3 Гц составляла 7400 км и была гальванически связана с системой воздушных линий напряжением 110 кВ. Через 150 тяговых подстанций железных дорог Германии осуществлялось понижение напряжения до 15 кВ для подачи в контактную сеть. В течение нескольких десятилетий использовались только электромашинные преобразователи. Преобразовательный агрегат представляет собой сложную электромеханическую систему, состоящую из трехфазного двигателя, питаемого напряжением частотой 50 Гц, и смонтированного на одном валу с ним однофазного генератора, вырабатывающего напряжение частотой 162/3 Гц. Несмотря на относительно высокие капитальные и эксплуатационные затраты, электромашинным преобразователям в течение многих лет отдавалось предпочте-

ние перед статическими. Одна из причин — то, что машинные преобразователи в силу своей инерционности и благодаря наличию мощных фундаментов надежно защищали сеть с частотой 50 Гц от гармоник 331/3 Гц, генерируемых в процессе преобразования частоты 50 Гц в 162/3 Гц.

Для их замены были использованы преобразователи с промежуточным звеном постоянного напряжения и автономные инверторы на GTO. Сеть трехфазного тока частотой 50 Гц в этом случае защищают от гармоник 331/3 Гц с помощью фильтра, рассчитанного на эту частоту. Выходной инвертор преобразователя состоит из отдельных независимо регулируемых ступеней, каждая из которых реализована как четырехквadrантный регулятор (4QS), собранный по двух- или трехточечной схеме. Выходы этих ступеней гальванически разделяются с помощью трансформаторов, вторичные обмотки которых соединяют последовательно. Так, преобразователь в Дзюбьяско мощностью 25 МВт имеет 12 выходных 4QS-ступеней, в которых каждый схемный вентиль реализован на одном тиристоре GTO фирмы ABB. Суммированием выходных напряжений и смещением такта их включения обеспечивается такой низкий уровень гармоник, что практически отпадает потребность в сетевом фильтре. При этом запираемые тиристоры должны работать с пониженной тактовой частотой, чтобы обеспечивались низкие потери, высокий КПД и достаточный резерв для реакции на динамические процессы в тяговой сети. Первоначально рассматривался вариант с использованием для инверторов запираемых тиристоров GTO с рабочим напряжением до 6 кВ и током в пределах 6 кА. Но в этом случае выходные токи фазовых модулей стали бы слишком большими, что потребовало бы значительно повысить механические требования к конструкциям модулей и распределительных устройств. Если же использовать последовательное соединение менее мощных, широко используемых тиристоров GTO, то у них время нарастания тока управляющего электрода, а значит, и время записания тиристора составляет несколько микросекунд с определенным разбросом. В то же время для последовательного соединения необходимо иметь тиристоры, которые должны запирается строго одновременно. Конечно, существуют различные схемы, с помощью которых можно достичь одновременности срабатывания, но они усложняют схему, увеличивают габариты преобразователя и его стоимость. Решение задачи последовательного соединения стало возможным с появлением запираемых тиристоров типа HDGTO (GCT) с жестким управлением, у которых темп нарастания тока управляющего электрода увеличен более чем в 100 раз по сравнению с обычными GTO. Если у тиристоров GTO разброс по времени нарастания тока в цепи управления составляет в лучшем случае ± 2 мкс, то у HDGTO он не превышает ± 100 нс, что дает возмож-

ность соединять их последовательно без подбора. Поскольку все сегменты кристалла отключаются одновременно, емкость обычно используемой снабберной цепи может быть уменьшена, что повышает общий КПД системы. Последовательное соединение запираемых тиристоров в схеме преобразователя с частотой на выходе 162/3 Гц позволяет включать в его схему резервные HDGTO, что дает несколько преимуществ. В частности, при выходе из строя тиристора замена его резервным происходит автоматически без отключения преобразователя. Отключение возможно лишь в том случае, если число вышедших из строя тиристоров в одном схемном вентиле больше, чем было предусмотрено резервных.

Следующим крупным достижением жестко управляемых GTO (HDGTO) стало создание запираемого тиристора с интегрированным устройством управления (драйвером) — Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT). Благодаря технологии жесткого управления равномерное переключение увеличивает область безопасной работы IGCT до пределов, ограниченных лавинным пробоем. Так же как и для GCT, для IGCT не требуется никаких защитных цепей от превышения du/dt . Это оказалось возможным благодаря контролю примесных профилей, применению мезотехнологии, протонного и электронного облучения для получения нужного распределения рекомбинационных центров. Существенную роль сыграла и технология так называемых прозрачных, или тонких, эмиттеров, а также формирование буферного слоя в N-базовой области. УУ должно «питаться» от внешнего источника с напряжением 28–40 В. Мощность управления в среднем составляет 20–50 Вт и снижена примерно в 5 раз по сравнению со стандартными GTO. При интегрированном УУ величина катодного тока снижается до того момента времени, как анодное напряжение начинает увеличиваться. Это происходит за счет очень низкой индуктивности цепи управляющего электрода, реализуемой за счет коаксиального соединения управляющего электрода в сочетании с многослойной платой УУ. В результате стало возможным достигнуть значения скорости выключаемого тока до 4 кА/мкс. При напряжении управления $U_{GK} = 20$ В, когда катодный ток становится равным нулю, оставшийся анодный ток переходит в УУ, которое имеет в этот момент низкое сопротивление. За счет этого потребление энергии блоком управления минимизируется. Работая при «жестком» управлении, тиристор переходит при запираении из *p-n-p*-состояния в *p-n-p*-режим за 1 мкс. Выключение происходит полностью в транзисторном режиме, устраняя всякую возможность возникновения триггерного эффекта.

Для максимальной помехоустойчивости и компактности устройство управления конструктивно окружает IGCT, формируя единую конструкцию с охладителем. Оно содержит только ту часть схемы, которая необходима для управления непосредственно IGCT. Благодаря этому уменьшено число элементов

УУ и снижены параметры теплорассеяния, электрических и тепловых перегрузок, а также повышена надежность. Тиристор IGCT, с его интегрированным УУ, легко фиксируется в модуле и точно соединяется с источником питания и источником управляющего сигнала через оптоволоконную линию. При работе IGCT без снаббера обратный диод тоже должен работать без снаббера. Этим требованиям соответствует высокоомощный диод в прижимном корпусе с улучшенными характеристиками, созданный с использованием процесса облучения в сочетании с классическими процессами. Возможности по обеспечению di/dt определяются работой диода.

Средняя частота переключения IGCT составляет 500 Гц. Малые потери переключения позволяют тиристорам этого типа с напряжением 6,5 кВ работать на частотах до 600 Гц, а приборам на напряжение 4,5 кВ — на частоте 1 кГц в непрерывном режиме и кратковременно — на частотах до 40 кГц. Другие характеристики IGCT: напряжение в открытом состоянии составляет 2 В (при токе 4 кА); тепловое сопротивление — 8,5 °C/кВт. Максимально допустимый средний прямой ток равен 1700 А (при температуре корпуса 85 °C), что позволяет отказаться от параллельного включения IGCT для получения требуемого тока. Основной производитель IGCT — компания ABB. На базе IGCT компании ABB без параллельного или последовательного включения IGCT созданы преобразователи мощностью более 15 МВт. А параллельное включение, по утверждению специалистов компании, позволит реализовать преобразователи мощностью 100 МВт и довести мощность последующих поколений статических преобразователей энергосистем до 300 МВт.

Параметры тиристоров IGCT фирмы ABB [20]: по напряжению $U_{DRM} = 4500; 6000$ В; по току $I_{TGM} = 3000; 4000$ А. Так, IGCT типа 55HY35L4510 этой фирмы имеет следующие параметры: $U_{DRM} = 4500$ В, $I_{GQM} = 4000$ А, $I_{TSM} = 32000$ А (10 мс, $T = 125$ °C), пороговое напряжение включения $U_{T0} = 1,4$ В, $f < 1$ кГц.

Другой пример по применению запираемых тиристоров также из немецкого опыта. Показательным является сравнение двух эксплуатирующихся в Карлсфельде идентичных статических преобразователей, содержащих последовательно соединенные запираемые тиристоры ABB. Общая мощность 100/132 МВ·А обеспечивается двумя блоками мощностью соответственно 50/66 МВ·А. Каждый из преобразователей имеет восемь выходных ступеней, содержащих по $m+n = 5$ включенных последовательно тиристоров на один схемный вентиль, при этом резерв $n = 1$. Таким образом, каждый блок содержит 160 запираемых тиристоров. Один из преобразователей построен на запираемых тиристорах GCT (HDGTO), а второй — на IGCT (с прозрачным анодом). Прежде чем переоборудовать один из блоков с заменой GCT на IGCT, компанией ABB (совместно с Adtranz) был проведен ряд контрольных мероприятий (по существу — испытания на надежность), в частности:

- получение сертификата изготовителя, подтверждающего низкое сопротивление тиристорам в проводящем состоянии;
- эксплуатационные испытания тиристоров IGCT в течение 3000 ч в схеме отдельного четырехквадрантного регулятора, собранного из расчета: один тиристор ($m = 1$) на один схемный вентиль. Здесь тиристоры использовались без снабберной цепи и переключались с частотой, в 7 раз превышающей рабочую частоту преобразователя тягового электроснабжения;
- проверка распределения напряжения между пятью тиристорами IGCT, включенными последовательно, и влияния индуктивности рассеяния, проводившаяся методом подачи одиночных импульсов;
- проверка в режиме продолжительной максимальной нагрузки работоспособности тиристоров IGCT в модуле с двумя выходными ступенями, содержащими в одном схемном вентиле пять последовательно включенных тиристоров.

Исследование тиристоров по окончании серии проверочных испытаний показало, что с ними не произошло никаких изменений.

Практика доказала высокую надежность ГТО, которые могут работать без отказов в течение нескольких лет в жестких режимах переменных нагрузок, как это имеет место в преобразователях для тягового электроснабжения. Преобразователи на IGCT имеют значительно меньшее число схемных компонентов за счет отсутствия снабберной цепи и схем ограничения скорости нарастания тока dI/dt , а также в связи с упрощением схем управления тиристорами. Благодаря этому они имеют меньшие потери мощности. При почти одинаковой с ГТО устойчивости к режимам переменных нагрузок надежность IGCT в принципе выше.

В заключение отметим, что основным стимулом развития новых поколений запираемых тиристоров (ГТО) и совершенствования их характеристик стала конкуренция с быстро развивающимися с начала 90-х годов новым классом силовых приборов — IGBT. Как будет показано далее (в 3 части этой статьи), основными преимуществами IGBT, по сравнению с ГТО, являются простота и компактность схем управления (малый ток управления), высокие значения КПД и рабочей частоты. Появление в последние годы модулей IGBT с рабочим напряжением до 4500 В и более, с токами в несколько тысяч ампер привело к вытеснению запираемых тиристоров (ГТО) в устройствах мощностью до 1 МВт и напряжением до 3500 В. Однако новые запираемые тиристоры IGCT имеют более высокие параметры по сравнению с ГТО и способны работать с частотами переключения от 500 Гц до 2 кГц. Благодаря этому, а также оптимальной комбинации хорошо освоенных технологий тиристорам с присущими им низкими потерями, высокоэффективной (бесснабберной) процедурой выключения, тиристоры IGCT имеют реальный шанс для применения в области силовой электроники среднего и высокого напряжений.

Для иллюстрации развития отечественных запираемых тиристоров приведем особенности и параметры современных фототиристоров класса IGCT производства ОАО «Электровыпрямитель» [12]. Так, фототиристор ТФ253-630 имеет следующие параметры: $U_{DRM} = U_{RRM} = 5000\text{--}6400$ В, $I_{T(AV)} = 630$ А (+85°C), $I_{TSM} = 12000$ А (+125°C), защитный показатель $Pt = 720$ кА²с, $U_{TM} > 2,8$ В. Впечатляет, что при указанных больших значениях тока открытого фототиристора значение тока удержания (I_H) составляет не более 150 мА. Допустимые значения скорости нарастания тока и напряжения соответственно 300 А/мкс и 2000 В/мкс. Конструкция — таблеточная, тепловое сопротивление $R_{thJC} = 0,02$ °С/Вт. Оптическая мощность управления равна 40 мВт (среднее значение). Параметры быстродействия: задержка на включение — не более 5 мкс, время выключения — не более 630 мкс.

Еще более мощным является высоковольтный фототиристор типа ТФ 183-2000-70 этого же производителя: $U_{DRM} = U_{RRM} = 8000$ В, $I_{T(AV)} = 2000\text{--}2500$ А, $I_{TSM} = 80000$ А, защитный показатель $Pt = 2,5 \times 10^6$ Дж (2000 мкс). Прибор имеет встроенный лазерный диод, LTT-адаптер и снабжен оптоволоконным кабелем. Фототиристор ТФ 183-2000-70 применяется в мощных импульсных генераторах, компенсаторах реактивной мощности, преобразовательных устройствах ЛЭП. Производитель поставляет готовые унифицированные преобразовательные модули на напряжение до 12 кВ и ток до 2,5 кА на основе последовательного соединения указанных фототиристоров.

Симисторы, оптосимисторы

Симисторы (триаки) — это двунаправленные, или симметричные, тиристоры, которые в принципе имеют те же характеристики, что и традиционные тиристоры. Симисторы используются в основном для регулирования напряжения переменного тока промышленной частоты. Полупроводниковая структура симистора содержит пять слоев полупроводников с различным типом проводимостей и, по сравнению с тиристором, имеет более сложную конфигурацию. Прибор включается в любом направлении при подаче на управляющий электрод положительного импульса управления. Симистор можно заменить двумя встречно параллельно включенными тиристорами (тиристорная «двойка»). На симисторы в полной мере распространяются все рекомендации, касающиеся тиристорам. Отечественные приборы имеют те же обозначения в части токов и напряжений, что и тиристоры, а отличие лишь в наименовании: «Т» — тиристор, «ТС» — симистор. Можно, в частности, указать на симисторы: ТС 106-10, ТС 112-(10; 16); ТС 122-(20; 25), ТС 132-(40; 50), ТС 142-(63; 80). Эти тиристоры имеют $U_{RRM} = 100\text{--}1200$ В (по классам 1–12), эффективное значение переменного тока $I_{F(RMS)}$ — в соответствии со 2-й цифрой в обозначении. Группы по критической скорости увеличения коммутационного напряжения (всего 7):

группа «1» — 2,5, «2» — 4, «3» — 6,3, «4» — 10, «5» — 16, «6» — 25 и «7» — 50 В/мкс. Приборы выполнены в штыревых металлостеклянных корпусах с тепловым сопротивлением $R_{thJC} = 0,34\text{--}2,5$ °С/Вт [13].

Широко распространенные отечественные оптосимисторы имеют обозначение, аналогичное симисторам, с добавлением индекса «С», и такие же силовые параметры. Например, оптосимистор ТСО132-40 также имеет эффективное значение переменного тока $I_{F(RMS)} = 40$ А и напряжение $U_{RRM} = 200\text{--}1200$ В (по классам через 100 В).

Продолжение следует

Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 1 // Силовая электроника. 2009. № 5.
2. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания. // Силовая электроника. 2006. № 2.
3. Машурян Э. Современная ситуация в силовой электронике // Электронные компоненты. 2005. № 6.
4. Колпаков А. Перспективы развития электропривода // Силовая электроника. 2004. № 1.
5. Кокорева И. Отечественная силовая электроника. Фирмы-производители // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 3.
6. Шурыгина М. Дискретные силовые приборы. Расширение применения и специализация // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 3.
7. Прянишников В. Электроника: Курс лекций. СПб: Корона-Принт. 1998.
8. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2009. № 1.
9. www.eupec.com
10. www.westcode.com
11. Эраносян С., Ланцов В. Эволюция импульсных источников питания: от прошлого к будущему. Часть 2 // Силовая электроника. 2009. № 1.
12. www.elvpr.ru
13. www.esa-energo.ru
14. www.ixys.com
15. www.optron-stv.ru
16. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути их решения. Часть 5 // Силовая электроника. 2009. № 3.
17. Современные запираемые тиристоры (обзор фирмы «КТЦ-МК») // Компоненты и технологии. 2000. № 5-6.
18. Рогачев К. Современные силовые запираемые тиристоры. www.gaw.ru
19. www.nppsatur.ru
20. www.abbsemi.ru
21. www.mitsubishisemi.com
22. www.css-rdz.ru