

# Силовые блоки на основе тиристоров и фототиристоров для промышленных применений

**В статье представлены последние результаты разработок в области силовых блоков на основе отечественных биполярных полупроводниковых приборов. Рассмотрены примеры конструирования блоков выпрямителей и ключей переменного тока большой мощности, ориентированных на требования потребителей.**

**Алексей Сабешкин  
Вячеслав Мускатиньев  
Алексей Гришанин  
Вячеслав Елисеев  
Светлана Иванова  
Сергей Потапов  
Ренат Аширов  
Дмитрий Немаев**

## Введение

В современном мире мы все чаще сталкиваемся с желанием потребителей получать готовые решения от профессионалов, имеющих компетенции в соответствующей сфере. В области силовой электроники также наблюдаются подобные тенденции с предоставлением полного спектра услуг. Многие лидеры отрасли имеют в своем составе интегрированные структуры, выпускающие как силовые полупроводниковые приборы (СПП), так и преобразовательную технику (ПТ) на их основе, что дает определенные преимущества динамичного развития как первой, так и второй группы изделий. Одна из немногих отечественных организаций, осуществляющих разработку и производство СПП и энергоэффективной ПТ на их основе, — ПАО «Электровыпрямитель». В настоящее время номенклатура выпускаемых предприятием СПП составляет свыше 1000 типов на токи до 10 000 А и напряжение до 10 000 В и свыше 500 наименований ПТ, в том числе преобразователей для частотного регулирования асинхронных и синхронных двигателей мощностью до 12,5 МВт с рабочим напряжением до 10 кВ.

Несмотря на указанные выше тенденции, в ряде случаев готовые решения в виде поставки ПТ не всегда могут быть выгодны конкретному потребителю, и происходит это по техническим или экономическим причинам. В таких случаях разработчикам ПТ или потребителям систем силовой электроники, применяющим их на производственных объектах, наиболее целесообразно иметь решения в виде силовых блоков. Силовые блоки представляют собой определенную комбинацию СПП и специальных систем охлаждения, снабдеров, драйверов и других вспомогательных элементов, соединенных конструктивно по определенной электрической схеме в единый моноблок или несколько отдельных конструктивно, но схемно связанных субблоков. Силовые блоки в виде функционально законченных силовых схем могут применяться как самостоятельные изделия для решения технологических задач при наличии внешней системы управления, так и в виде узлов для комплектации ПТ. К преимуществам

блочной-узловой организации ПТ относятся наличие унифицированных силовых блоков, гибкость их компоновки для различных диапазонов мощностей, высокая степень ремонтпригодности и оперативность замены в случае аварии.

Среди многообразия компонентов и производителей силовой электроники компаниям, не имеющим опыта разработки и изготовления силовой части ПТ, зачастую сложно самостоятельно выбрать правильные решения, а иногда и экономически нецелесообразно. Применение полупроводниковых приборов, особенно в силовой электронике, является местом пересечения многих направлений знаний: физики работы полупроводниковых приборов и требований к режимам их применения, термодинамики (тепловой расчет охлаждающих систем), механики (механическая конструкция устройства стяжки и охлаждающих систем), промышленной электроники (разработка и выбор элементов снабдерных цепей, резистивных делителей, драйверов). Для проектирования и организации изготовления надежных силовых блоков требуется наличие квалифицированного персонала, владеющего соответствующими знаниями и опытом в области устройства и применения СПП. ПАО «Электровыпрямитель» более 15 лет имеет в своем составе подразделение, специализацией которого является разработка, испытания, производство, монтаж и сервисное обслуживание силовых блоков. На базе серии новых охладителей и СПП таблеточной и модульной конструкции созданы блоки, предназначенные для устройств плавного пуска и управления скоростью вращения электродвигателей постоянного и переменного тока, регуляторов температуры, освещенности, электросварки, гальваники, индукционного нагрева, источников бесперебойного питания, печей отжига, транспорта, импульсной техники. [1]

На сегодня разработана и освоена в производстве линейка силовых блоков, выполненных по стандартным электрическим схемам, с различными вариантами охлаждения. Номенклатура блоков объединяет типовые схемы по напряжению 100 В — 10 кВ и токи 15 А — 32 кА [2]. Уникальными являются реализованные проекты по созданию высоковольтных ком-

мутаторов импульсного тока на 100 кА и на напряжение 12 кВ на основе импульсных фототиристоров собственного производства [3–5] и высоковольтных коммутаторов импульсов тока субмиллисекундной длительности амплитудой до 250 кА и напряжением 25 кВ на основе реверсивно-включаемых динисторов [6–8]. Данные изделия широко используются в импульсной технике в качестве мощных полупроводниковых ключей для разряда емкостных накопителей энергии в научно-исследовательских областях и промышленности (лазеры, термоядерный синтез, магнитная штамповка).

Анализ схем ПТ показывает, что схемные решения, на базе которых реализуются почти все основные задачи силовой электроники, можно выделить в следующие категории:

- одно- и трехфазные выпрямители (управляемые и неуправляемые);
- ключи переменного тока;
- инверторы;
- коммутаторы импульсные.

Выпрямители и ключи переменного тока, благодаря своей простоте и надежности, по-прежнему являются одними из основных направлений в развитии силовых блоков для промышленного применения. В статье [9] представлены основные подходы к проектированию и результаты разработки серии силовых выпрямительных блоков и ключей переменного тока на основе биполярных приборов. С учетом развития СПП осуществляется постоянное совершенствование конструкции силовых блоков данных типов, направленное на увеличение плотности мощности, повышение функциональных возможностей и надежности. Конструкция каждого конкретного силового блока зависит от принципиальной электрической схемы, мощности и условий эксплуатации ПТ, типа применяемых СПП и способа охлаждения. Основным фактором, определяющим общность конструктивных решений силовых блоков, является способ их охлаждения в составе ПТ. Ежегодно компания выполняет десятки проектов, в том числе разработку и изготовление силовых выпрямительных блоков, ключей переменного тока, а также блоков специального назначения с различными вариантами охлаждения. Ниже представлены последние разработки в области силовых блоков на основе тиристорных и фототиристорных для традиционных схем выпрямителей и ключей переменного тока.

#### Управляемые выпрямители

Силовая электроника остается, возможно, одной из немногих областей техники, где традиционные схемные решения востребованы, несмотря на кажущуюся их простоту. В номенклатуре предприятия представлен широкий ряд силовых блоков управляемых выпрямителей на основе тиристорных с электрическим управлением модульной и табличной конструкции, выполненных по однофазной, трехфазной и шестифазной схемам. Существующая линейка выпрямителей рассчитана на диапазон напряжений 0,1–10 кВ. Максимальный выходной ток таких блоков достигает 6300 А при жидкостном охлажде-

**Таблица 1.** Основные параметры БВ6М1Т–1200/2000–0,1–П

Рабочее напряжение (среднее значение), кВ, не более	0,1
Выходной рабочий ток (среднее значение) при угле проводимости тиристоров 120° эл., А, не более	1200
Ток перегрузки (среднее значение) в течение 30 с (с периодом повторения не менее 3 мин.), А, не более	1500
Ток перегрузки (среднее значение) в течение 2 с (с периодом повторения не менее 2 мин.), А, не более	2000
Частота питающей сети, Гц, не более	400
Масса, кг, не более	50

нии. Наиболее широкое распространение получили мощные блоки с классом напряжения 0,4 кВ для управления промышленным электроприводом.

К числу последних разработок относится силовой блок трехфазного управляемого выпрямителя с воздушным принудительным охлаждением БВ6М1Т–1200/2000–0,1–П. Блок предназначен для плавного пуска электродвигателей с рабочим напряжением 0,1 кВ. Основные технические характеристики блока приведены в таблице 1. Фотография блока представлена на рис. 1.

Блок БВ6М1Т–1200/2000–0,1–П представляет собой сборку из шести беспотенциальных одноключевых тиристорных модулей М1Т–1600 с шириной основания 90 мм, установленных на трех охладителях О55 (по два модуля на каждом охладителе). Модули М1Т–1600 изготовлены по технологии прижимного контакта, что обеспечивает их высокую энерготермоцикlostойкость при значительных токовых нагрузках. Толстое медное основание создает высокую перегрузочную способность по току при естественном охлаждении. Это особенно важно для режимов плавного пуска мощных асинхронных двигателей. Принудительное воздушное охлаждение силового блока реализуется обдувом ребер охладителей тремя встроенными осевыми вентиляторами, обеспечивающими скорость потока охлаждающего воздуха не менее 6 м/с. Для предупреждения

повреждения тиристорных модулей от коммутационных перенапряжений установлены RC-цепи. Также блок оснащен шестиканальным драйвером собственного производства. Драйвер выполнен на основе управляемого источника тока, формирующего импульсы тока управления с оптимальными для надежного включения тиристорных параметрами, включая форсирующий управляющий импульс. Параметры импульса тока управления слабо зависят от параметров цепи управления силовых тиристорных и соединительных цепей. Каждый канал драйвера имеет собственную гальваническую развязку по питанию, а вся плата питается от одного внешнего источника постоянного напряжения +24 В. Связь драйвера с системой управления производится по оптоволоконным кабелям. Электрическая прочность изоляции драйвера между первичными цепями питания и выходными цепями платы 3000 В.

Для защиты от перегрева модулей силовой блок оснащен датчиками температуры нагрева охладителей — термостатами с нормально замкнутым контактом размыкающимся при температуре выше +65°C и замыкающимся при температуре ниже +55°C, с коммутируемым током до 16 А при напряжении до 250 В. Допустимое напряжение изоляции между корпусом и контактом термостата — 1500 В. Установка блока в оборудование может осуществляться в любом положении. Крепление блока выполняется четырьмя болтами М8 через пазы крепежных планок основания блока. Габаритные размеры (д×ш×в) силового блока 390×430×310 мм. Климатическое исполнение силового блока У, категория размещения 2. По требованию заказчика блоки могут быть оснащены быстродействующими предохранителями, установленными в цепи каждого тиристора.

На базе аналогичных решений по желанию потребителей могут быть реализованы и более сложные варианты силовых блоков. Ниже для примера представлена конструкция силового блока реверсивного управляемого



**Рис. 1.** Силовой блок БВ6М1Т–1200/2000–0,1–П

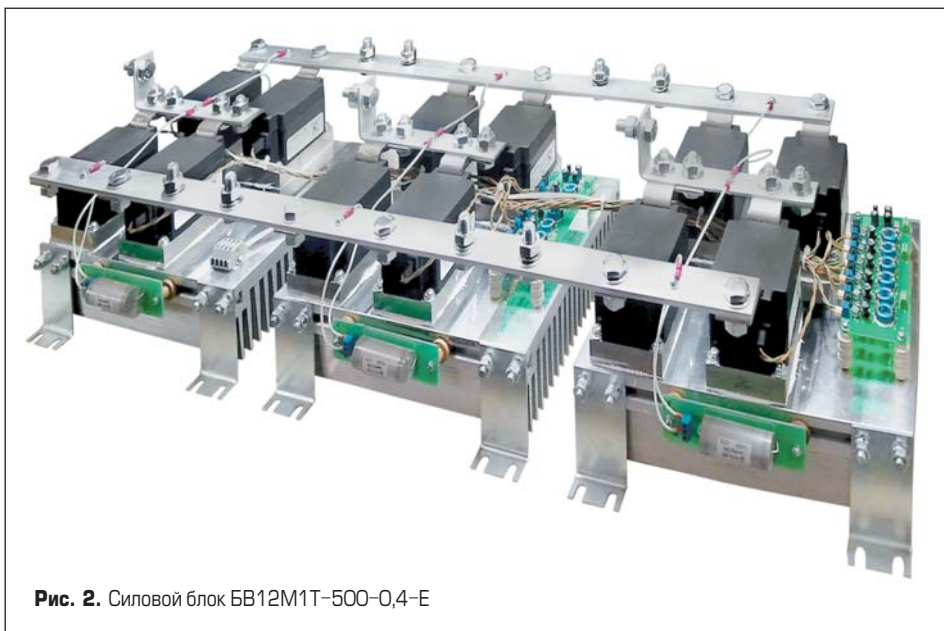


Рис. 2. Силовой блок BV12M1T-500-0,4-E

выпрямителя на ток 500 А, напряжение 400 В для электропривода постоянного тока BV12M1T-500-0,4-E с естественным охлаждением. Блок состоит из двух выпрямительных мостов. Такой выпрямитель может быть применен и для плавного пуска, регулирования скорости вращения, плавной остановки и реверса электродвигателей постоянного тока.



Рис. 3. Силовой блок BV3TF-3000-10,0-B

При разработке конструкции силовых блоков исходят из ряда условий, удовлетворяющих требованиям надежности, простоты и стоимости законченного изделия. При необходимости получения мощных выпрямителей на высокие напряжения, наиболее оптимальна организация силовых блоков в виде столбов с последовательным соединением СПП и жидкостным охлаждением. При этом для высоковольтных применений одной из важных задач остается гальваническая развязка силовой части схемы от системы управления. Для таких задач наиболее перспективными силовыми ключами являются высоковольтные фототиристоры. Они легко управляются инфракрасным лазерным излучением с оптической мощностью несколько десятков милливатт, имеют отличные характеристики включения, низкие потери мощности в проводящем состоянии и при переключении. Данные СПП производятся сегодня на токи до 2500 А, напряжение до 7600 В [10, 11]. Узкий разброс таких параметров, как времена задержки включения, напряжение в открытом состоянии, заряд обратного восстановления дает возможность использовать эти приборы в последовательных и параллельных соединениях и успешно реализовывать различные энергетические

Таблица 2. Основные параметры BV3TF-3000-10,0-B

Рабочее напряжение (амплитудное значение), кВ, не более	10,0
Номинальный ток, А, не более	3000
Рабочая частота, Гц	50...400
Амплитуда светового импульса запуска фототиристора, мВт	150...300
Длительность светового импульса запуска фототиристора, не менее, мкс	10
Скорость охлаждающей жидкости, л/мин, не менее	3
Температура охлаждающей жидкости, °С	+5...+20
Габаритные размеры (д×ш×в), мм, не более	250×250×640
Масса, кг, не более	55
Климатическое исполнение	УХЛ
Категория размещения	4

проекты с общей мощностью до нескольких гигаватт.

С использованием фототириستоров собственного производства, многоканальных оптических драйверов на базе излучателей инжекционных лазеров в комплекте с оптоволоконными кабелями и адаптерами разработан силовой блок однофазного выпрямителя BV3TF-3000-10,0-B с жидкостным охлаждением. Технические характеристики силового блока приведены в таблице 2, внешний вид на рис. 3.

Данный блок управляемого выпрямителя с жидкостным охлаждением представляет единую конструкцию на основе трех последовательно соединенных фототиристоров с жидкостными охладителями, собранными в столб. СПП таблеточной конструкции в столбе стянуты с заданным усилием через четыре изоляционные шпильки посредством опорных плит. Блок укомплектован резистивными делителями напряжения и снабжен на основе низкоиндуктивных резисторов. Специальная система стяжки при помощи тарельчатых пружин и изолированных шпилек позволяет соединять в столб до 15 фототиристоров или других таблеточных СПП и обеспечивать равномерное распределение усилия сжатия между ними. Последовательное соединение СПП позволяет повысить надежность силовых ключей посредством реализации принципа «N + 1». В зависимости от требований заказчика возможно закладывать различный коэффициент по рабочему напряжению. Со стороны анода и катода высоковольтного блока расположены медные шины, предназначенные для подключения блока к внешней силовой цепи. Также блок оснащен платами контроля состояния и запуска фототиристоров и датчиками контроля температуры нагрева охладителей.

### Ключи переменного тока

Степень компенсации реактивной мощности в отечественной электроэнергетике значительно ниже, чем в промышленно развитых странах. Наибольшие уровни несимметрии и искажения синусоидальности напряжений имеют место в электрических сетях, питающих электрифицированные железные дороги переменного тока и у таких крупных потребителей электроэнергии, как алюминиевые заводы и предприятия металлургической промышленности. При этом неудовлетворительные значения отклонения напряжений наблюдаются, как правило, в дефицитных энергосистемах с протяженными электрическими сетями и недостаточным количеством средств компенсации реактивной мощности [12].

Прогресс преобразовательной техники и систем управления привел к появлению многочисленных устройств поперечной и продольной компенсации в виде статического тиристорного компенсатора (СТК), управляемого шунтирующего реактора (УШР), систем тиристорно-управляемой продольной компенсации, статического компенсатора реактивной мощности на базе преобразователя напряжения (СТАТКОМ) и другие, которые улучшают работу сетей в части устойчивости, управляемости [13]. Основным компонентом для комплектации СТК,



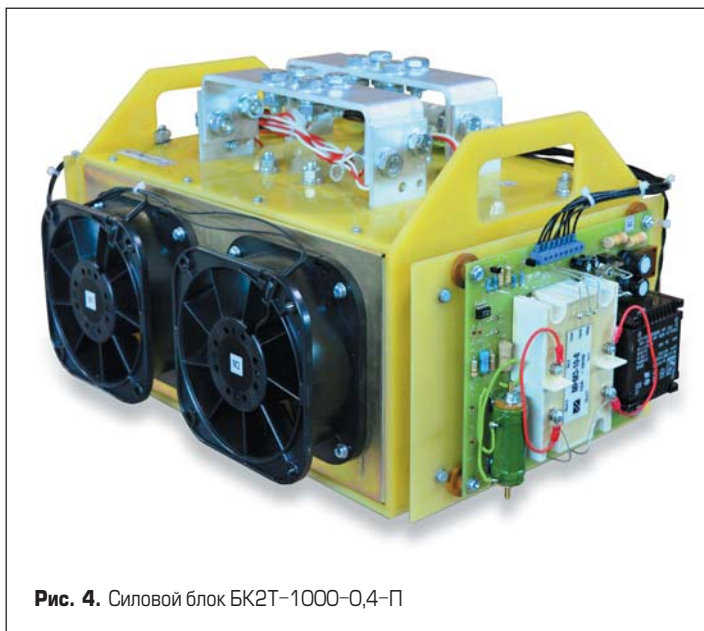


Рис. 4. Силовой блок БК2Т-1000-0,4-П

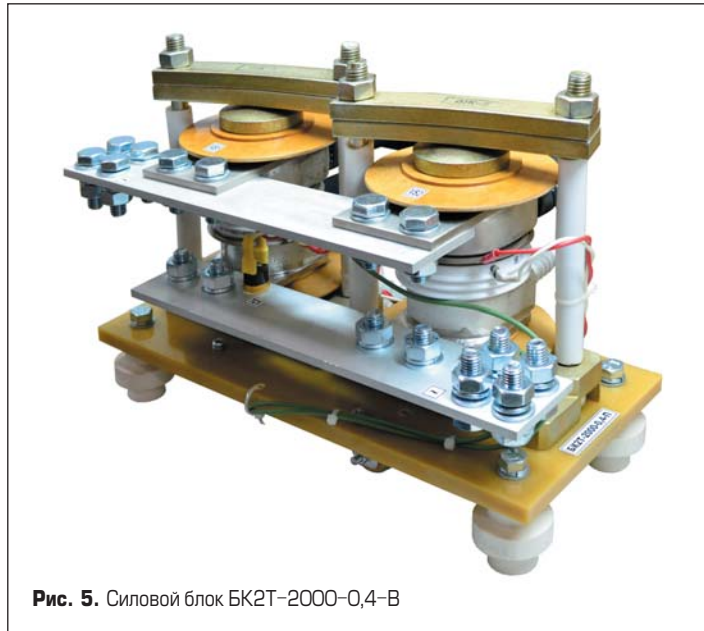


Рис. 5. Силовой блок БК2Т-2000-0,4-В

УШР является тиристорный вентиль. При комплектации тиристорных вентилях наибольшее распространение получили тиристоры с электрическим управлением и фототиристоры. Ключ, как правило, состоящий из встречно-параллельно включенных тиристоров, по команде, задаваемой системой управления, обеспечивает включение или отключение нагрузки.

Среди серийно освоенных силовых блоков имеются однофазные и трехфазные ключи переменного тока с различными вариантами исполнения охлаждения: естественное, принудительное, жидкостное. Конструктивно однофазные ключи реализуются на основе тиристоров таблеточного и модульного исполнения, имеют максимальный рабочий ток до 2000 А, напряжение до 6,3 кВ. Также серийно освоен в производстве ряд силовых блоков на основе высоковольтных фототиристоров на рабочие ток до 600 А и напряжение до 12 кВ. Среди трехфазных ключей переменного тока имеются моноблочные конструкции на ток до 2000 А и напряжение 0,4 кВ. При этом применение соединений трех однофазных блоков дает возможность построения на их основе трехфазных ключей.

Например, блок однофазного ключа переменного тока БК2Т-1000-0,4-П представляет единую конструкцию на основе двух тиристоров таблеточного типа Т243-1250-12, каждый из которых сжат с заданным усилием между половинками

охлаждителя. Охлаждение блока — воздушное принудительное со скоростью потока охлаждающего воздуха не менее 6 м/с с напряжением питания 220 В и суммарной потребляемой мощностью вентиляторов 50 Вт. Блок оснащен платой согласования со встроенным в нее модулем регулировки мощности (МРМ). Регулировка угла открытия осуществляется в диапазоне 0–170° эл. при изменении сигнала управления 0–5 В. Напряжение питания платы согласования 220 В. Характер нагрузки блока — активно-индуктивная. Коэффициент мощности — 0,95. Силовой блока УХЛ, категория размещения 4. Данный блок может применяться для регулировки выходной мощности печных трансформаторов, электродуговых печей.

Использование жидкостного охлаждения для двух тиристоров Т253-1250-12 таблеточной конструкции, сжатых совместно с охлаждаителями с заданным усилием, через опорные шпильки с помощью траверс в два столба (по одному тиристор в каждом столбе), позволяет создавать ключи на ток 2000 А, напряжение 0,4 кВ в габаритах 350×350×250 мм. В данном случае тиристорные сборки установлены на изоляционном основании. Крепление блока в изделие заказчика осуществляется через четыре изолятора установленных в основании блока. Применение таких блоков возможно в источниках бесперебойного питания, установках контактной сварки.

Еще одна новая разработка для комплектации высоковольтных тиристорных вентилях — силовой блок БК8ТФ-150-12,0-П, выполненный по схеме однофазного ключа переменного тока. Блок представляет собой сборку из восьми фототиристоров ТФ353-630-65, собранных в два столба с охлаждаителями по четыре фототиристора в каждом столбе (рис. 6). Фототиристоры электрически соединены попарно встречно-параллельно. Основные характеристики блока приведены в таблице 4.

Унифицированная конструкция блока позволяет увеличивать рабочее напряжение путем изменения количества последовательно соединенных фототиристоров.

В высоковольтных последовательных сборках для предотвращения катастрофических аварий дорогостоящего оборудования очень важна своевременная диагностика вышедших из строя

Таблица 4. Основные параметры БК8ТФ-150-10,5-П

Рабочее напряжение (эффективное значение), кВ, не более	12
Амплитуда максимально допустимого напряжения, кВ, не более	26
Рабочий ток (эффективное значение) ( $T_a \leq +40^\circ \text{C}$ ), А, не более	150
Рабочая частота сети, Гц	50, 60
Габаритные размеры (д×ш×в), мм, не более	320×290×470
Масса, кг, не более	34
Климатическое исполнение	УХЛ
Категория размещения	4
Скорость потока охлаждающего воздуха (обеспечивается потребителем), м/с, не менее	2

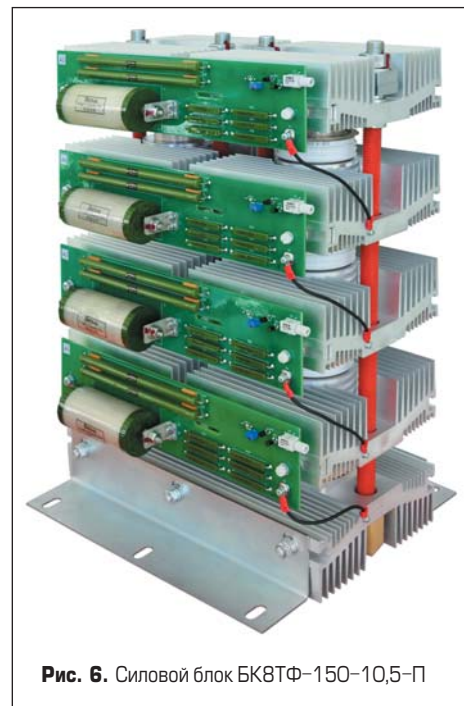


Рис. 6. Силовой блок БК8ТФ-150-10,5-П

Таблица 3. Основные параметры БК2Т-1000-0,4-П

Рабочее напряжение (эффективное значение), кВ	0,4
Максимальный рабочий ток (эффективное значение) при угле проводимости тиристоров 180° эл., А, не более	1000
Рабочая частота, Гц	50
Скорость обдува, м/с, не менее	6
Габаритные размеры (д×ш×в), мм, не более	300×465×290
Масса, кг, не более	20
Климатическое исполнение	УХЛ
Категория размещения	4

одиночных СПП. Для этих целей разработаны и успешно используются схемы контроля состояния каждого ключа. Если единственный СПП исправен, то в закрытом состоянии к нему приложено высокое напряжение и схема контроля состояния выдает по оптоволоконному кабелю соответствующие световые импульсы, поступающие в контроллер для последующей обработки. Если же СПП вышел из строя, то диагностические световые импульсы отсутствуют, что служит сигналом неисправности соответствующего ключа. Особенностью разработанных схем контроля состояния является отсутствие необходимости организации их отдельного питания и, соответственно, не нужно решать возникающие при этом вопросы гальванической развязки.

Важным этапом проектирования и разработки конструкции силовых блоков становится выполнение всех необходимых расчетов, включая схемотехническое моделирование, анализ теплового режима с выбором оптимальных СПП и охладителей для решения поставленных задач. Надежность работы СПП связана с множеством факторов. Одно из основных условий обеспечения надежной работы приборов — обеспечение теплового режима в силовом блоке. При разработке и выборе охлаждающих систем используется универсальный программный комплекс, позволяющий решать задачи механики деформируемого твердого тела, задачи механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена. Моделирование и анализ в этой программе позволяют специалистам избежать дорогостоящих и длительных циклов «проектирование — изготовление — испытание».

Один из примеров результатов типового расчета теплового сопротивления охлаждающего устройства и аэродинамики тепловода воздушного охладителя для выбора оптимальной конструкции блока БК8ТФ-150-10,5-П приведен на рис. 7.

Разработка конструкции силовых блоков с улучшенными массогабаритными показателями предполагает применение современных методов и средств проектирования. С учетом повышенных требований к устройствам ПТ для качественного проектирования силовых блоков используются САД-программы, потребителю могут быть предоставлены 3D-модели конструкции силовых блоков, которые позволяют на этапе разработки конечных устройств оценить габаритные размеры, взаимное расположение и компоновку элементов.

### Заключение

Производство силовых блоков оснащено всем необходимым оборудованием для сборки и испытаний, включая линию поверхностного монтажа по изготовлению печатных плат. Перед сборкой в силовые блоки серийные СПП проходят 100%-ный контроль классификационных электрических параметров по программе приемо-сдаточных испытаний, характеризующих их соответствие установленным в технических условиях требованиям. Также при необходимости проводятся дополнительные испытания с учетом особенностей режимов эксплуатации конкретных блоков. Это предоставляет возможность повысить эффективность отбора СПП для комплектации силовых блоков. При необходимости использования в блоках нестандартных приборов осуществляется разработка и изготовление СПП с оптимальной системой параметров для решения поставленных потребителем задач.

Наличие собственного металлообрабатывающего производства позволяет с высокой скоростью и заданной точностью осуществлять

изготовление нестандартных деталей по вновь разработанным чертежам. Это делает гибкой работу с оптимизацией конструкций силовых блоков, обеспечивая оптимальное соотношение цены и качества в соответствии с задачами, поставленными клиентом. Индивидуальный подход к каждому заказу позволяет разрабатывать устройства, не имеющие аналогов, с функциональными возможностями, необходимыми потребителю.

### Литература

1. Толкачев С., Алешин В., Мускатиньев В., Сабешкин А., Гурвич А. Силовые полупроводниковые блоки компании ОАО «Электровыпрямитель» для мощных преобразователей электрической энергии // Компоненты и технологии. 2016. № 6.
2. [www.ao-elpress.ru](http://www.ao-elpress.ru)
3. Chibirkin V., Martynenko V., Khapugin A., Konuchov A., Tundukov S., Grishanin A., Enikeev R., Serebrov R. Development and Investigations of Light Triggered Thyristors for Pulse Application. Nuremberg, Germany. PCIM Europe, 2011, 17–19 May 2011.
4. Серебров Р. А., Мартыненко В. А., Фридман Б. Э., Хапугин А. А. Разработка и исследование коммутаторов больших импульсных токов на основе фототиристоров // Электротехника. 2016. № 7.
5. Хапугин А., Плотников А., Мартыненко В., Гришанин А., Кострицкий С., Картаев В. Исследования мощных фототиристоров в предельных импульсных режимах // Силовая электроника. 2019. № 3.
6. Grishanin A., Martynenko V., Frolov O., Yantsen N., Nishchev K.. Simulations and Experimental Investigations of High Voltage Semiconductor Stacks for Ultra-High Current Commutation. Nuremberg, Germany. PCIM Europe, 2014. 20–22 May 2014.
7. Коженков Е. В., Арзев А. Г., Галахов И. В., Ганин Л. С., Гришанин А. В., Картаев В. Н., Кострицкий С. И., Креков А. В., Лесков В. И., Мартыненко В. А., Наумов Д. А., Осин В. А., Свиридов В. В., Сенник Д. А., Фролов О. В., Хапугин А. А., Чистопольский М. В. Исследование коммутационных возможностей и рабочего ресурса РВД-коммутаторов на ток 250 кА и напряжении 25 кВ для системы питания мощной лазерной установки // Труды международной конференции «XX Харитоновские тематические научные чтения. Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии», Саров, Нижегородская обл., 17–18 апреля 2018.
8. Коротков С. В., Хапугин А. А., Мартыненко В. А., Елисеев В. В., Жмодиков А. Л., Козлов А. К. Исследование реверсивно включаемых динисторов, модернизированных с целью уменьшения потерь энергии при коммутации импульсов обратного тока // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 3.
9. Мартыненко В., Мускатиньев В., Толкачев С., Пустыльник И. Серия силовых интеллектуальных сборок на основе биполярных полупроводниковых приборов // Силовая электроника. 2012. № 3.
10. Конюхов А. В., Веселова И. М., Мартыненко В. А., Хапугин А. А., Гришанин А. В. Отечественные высоковольтные мощные фототиристоры с интегрированной самозащитой от пробоя // Электричество. 2011. № 10.
11. Мартыненко В., Хапугин А., Конюхов А., Гришанин А., Плотников А. Мощные тиристоры с прямым управлением светом и лазерные волоконно-оптические модули управления для высоковольтных применений // Силовая электроника. 2012. № 1.
12. Вороничский В. Э., Дементьев Ю. А., Лазарев Г. Б., Шакарян Ю. Г. Организация комплексного процесса управления качеством электроэнергетики — перспективная задача энергетической стратегии развития России. XXVI конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Коммутационные аппараты, преобразовательная техника, микропроцессорные системы управления и защиты». М., 2017.
13. Шульга Р. Н., Дружинин М. Ю. Сопоставительный анализ различных средств продольной и поперечной компенсации кабельных и воздушных линий электропередач переменного тока. XXVI конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Коммутационные аппараты, преобразовательная техника, микропроцессорные системы управления и защиты». М., 2017.

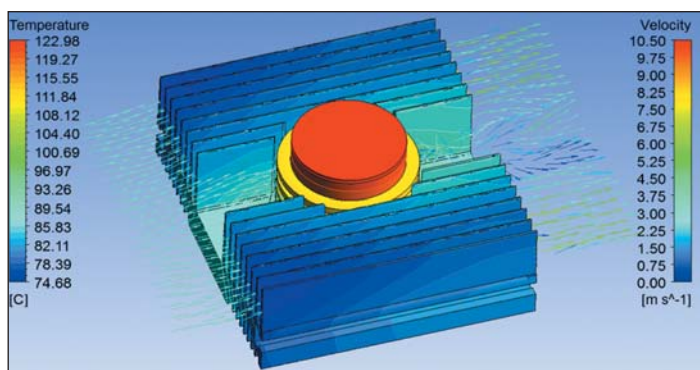


Рис. 7. Результаты теплового расчета охладителя для БК8ТФ-150-10,5-П