

Силовые блоки на основе мощных фототиристоров

Статья продолжает цикл публикаций, посвященных силовым блокам на основе отечественных фототиристоров [1]. Представлены результаты разработок и примеры конструирования высоковольтных коммутаторов тока для импульсных применений.

Вячеслав Мускатиньев

Алексей Хапугин

Алексей Сабешкин

Наталья Мельникова

Светлана Иванова

Сергей Потапов

Александр Плотников

Алексей Гришанин

Валентин Мартыненко

Введение

В последние 25 лет в области силовой полупроводниковой электроники важное место занимают твердотельные ключи для импульсных применений. Они изготавливаются в виде быстродействующих высоковольтных коммутаторов на основе мощных силовых полупроводниковых приборов (СПП), способных переключать импульсные токи амплитудой десятки и сотни килоампер в микросекундном и субмиллисекундном диапазонах. Некоторые направления использования высоковольтных импульсных коммутаторов в импульсной энергетике:

1. Лазерная техника:
 - генераторы импульсов тока для импульсного питания источников света в системах накачки лазерных сред;
 - генераторы импульсов тока и напряжения для формирования объемных разрядов в лазерных средах.
2. Электрофизические установки (промышленные и научно-исследовательские):
 - ускорители элементарных частиц;
 - установки для исследований электрического ускорения твердых тел;
 - установки для получения сверхсильных магнитных полей (в том числе системы питания и защиты обмоток ТОКОМАКов);
 - установки для электроразрядной очистки индустриальных газовых выбросов и сточных вод;
 - установки для магнитоимпульсной обработки металлов;
 - установки высокочастотного индукционного нагрева.

В качестве источника импульсных токов распространение получили емкостные накопители энергии. Несмотря на довольно низкую плотность запасаемой энергии по сравнению с другими типами накопителей (индуктивные, электромашинные), они характеризуются рядом преимуществ:

- удобство и простота в эксплуатации;
- возможность изменения в широких пределах параметров импульса разрядного тока;
- способность работать на разные типы нагрузок с высокой эффективностью передачи накопленной энергии [2].

Специфика высоких напряжений в мощной импульсной технике, резко сужает границы и номенкла-

туру применяемой электронной компонентной базы. Поэтому одной из главных задач при создании твердотельных ключей является правильный выбор силовых полупроводниковых приборов (СПП) и разработка надежных малогабаритных конструкций коммутаторов тока. При современном уровне развития элементной базы переход к СПП представляется предпочтительным по сравнению с газоразрядными приборами. Полупроводниковые коммутаторы используют СПП промышленного изготовления, технология производства которых хорошо отработана. Мощные полупроводниковые приборы таблеточной конструкции легко соединяются последовательно в единой сборке, что может обеспечивать рабочее напряжение коммутатора до 100 кВ. Полупроводниковые коммутаторы не допускают пропусков срабатываний, отличаются большим сроком службы, экологической безопасностью, а также невосприимчивостью к положению в пространстве.

При разработке конструкции силовых блоков исходят из ряда условий, удовлетворяющих требованиям надежности, простоты и стоимости законченного изделия. При необходимости получения импульсных коммутаторов на высокие напряжения и коммутируемые импульсные токи наиболее оптимальна организация силовых блоков в виде столбов с последовательным соединением СПП. При этом для высоковольтных применений одной из важных задач остается гальваническая развязка силовой части схемы от системы управления. Для емкостных накопителей энергии с временами разрядного процесса порядка долей и единиц миллисекунд на токи до 150 кА напряжением до 50 кВ предпочтительным решением становятся силовые блоки на основе фототиристоров.

Фототиристоры импульсные

Целесообразность использования фототиристоров в схемах с последовательным соединением СПП обусловлена рядом их особенностей: высокой нагрузочной и перегрузочной способностью; точным временным контролем включения группы приборов; высоковольтной гальванической развязкой между цепью управления и силовой схемой преобразователя; стойкостью к электромагнитным помехам, которые могут приводить к ложным включениям (особенно в системах, где неизбежны длинные кабели управления); устойчивостью к лавинным перегрузкам (осо-

Таблица 1. Основные характеристики фототириستоров

Тип	V_{DRM}, V_{RRM}	V_D, V_R	$I_{TRM}, \sin 180^\circ \text{ эл.град.}$		$V_{T(ТО)}$	r_T	$(di_T/dt)_{cr}$		t_q	$(dv_D/dt)_{cr}$	$R_{th(l-c)}$	Габариты корпуса $D_{max}/D_{cont}/H$
			$t_p = 700 \text{ мкс}$	$t_p = 10 \text{ мс}$			$f = 1 \text{ Гц}$	$f = 50 \text{ Гц}$				
	В	В	кА	кА	В	МОм	А/мкс	А/мкс	мкс	В/мкс	°С/Вт	мм
ТФИ183-2000	6000–6500	4000–4500	65	20	1,2	0,39	5000	1000	800	1000–2000	0,0078	120/86/35
ТФИ193-2000	7000–7200	5000	80	25	1,22	0,39				1000	0,0067	147/100/40
ТФИ193-2500	4200–4600	3000	100	30	1,15	0,18				630	1600–2000	0,0065

бенно в режимах динамической лавины) и т. д. Они легко управляются инфракрасным светом с оптической мощностью несколько десятков милливатт. В линейке серийно выпускаемых фототиристоров три исполнения на импульсные токи до 100 кА, напряжение до 7200 В [3–5]. В таблице 1 представлены их основные характеристики, а на рис. 1 приведены фотографии фототиристоров.

Особенность работы фототиристоров в импульсных режимах связана с коммутацией одиночных или редко повторяющихся импульсов тока с амплитудой, близкой к максимально допустимым значениям ударных токов. Это приводит к выделению большого количества тепла в полупроводниковой структуре прибора, что ограничивает его коммутирующую способность. При работе высоковольтных фототиристоров на коротких импульсах тока (менее 1 мс) необходимо учитывать и потери, связанные с распространением включенного состояния, которое из-за физических особенностей приборов не происходит одновременно по всей площади полупроводниковой структуры. Это дополнительно накладывает ограничения по амплитуде импульсного тока I_{TRM} . Время полного включения тиристоров и нагрузочная способность по току зависят от электрофизических свойств кремниевой структуры, топологии управляющего электрода и катодного эмиттера. Топология и концентрационный профиль распределения примеси кристаллов импульсных фототиристоров оптимизированы для обеспечения минимального времени включения и максимальных скоростей нарастания тока di_T/dt .

Для каждого конкретного случая применения фототиристоров в силовых коммутаторах проводится моделирование электрических и тепловых переходных процессов, с учетом режимов их работы в емкостных накопителях энергии. Применяемые методы основаны на расчетах температуры кремниевой структуры исходя из заданного интеграла действия импульса тока. Предельное значение токовой нагрузки прибора определяется в момент появления термогенерационного пика на осциллограмме

прямого падения напряжения. Фототиристоры для комплектации блоков проходят 100%-ный контроль, включая испытания на устойчивость к динамической лавине, как по отдельности, так и в составе блоков, на испытательном стенде собственной разработки [4].

Блок коммутатора для проекта ИТЭР

Один из главных критериев правильной конструкции высоковольтных блоков — обеспечение однородности давления в контактах СПП. Для оптимального выбора конструкции деталей и узлов зажимного устройства предварительно проводятся его моделирование и расчет. По результатам расчетов определяется наиболее подходящий вариант конструкции зажимного устройства силового блока, обеспечивающий однородное распределение контактного давления как по площади каждого СПП, так и между последовательно соединенными приборами. Ниже приведен пример расчета системы прижима силового блока из шести фототиристоров ТФИ193-2500-42 с применением оптимально выбранных конструкций нижней усеченной опоры и верхнего распределителя давления конусообразной формы. На рис. 2 показаны результаты распределения контактного давления на каждом СПП высоковольтного блока БК6ТФИ-100000-12,0-Е,

полученные в ходе моделирования. Видно, что с выбранными опорами контактное давление в сборке однородно как по контактной площади фототиристоров, так и между шестью приборами, составляющими высоковольтную сборку. Конструкция данного блока обеспечивает также способность выдерживать синусоидальную вибрацию в диапазоне частот 2–10 Гц с максимальной амплитудой ускорения перпендикулярно оси блоков 0,3g и вдоль оси блоков 2g.

Система прижима при помощи тарельчатых пружин и шпилек из изоляционного композиционного материала высокой прочности 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 запаса по рабочему напряжению.

Силовые блоки БК6ТФИ-100000-12,0-Е предназначены для коммутации импульсного тока 100000 А, с номинальным постоянным напряжением 12 кВ, с естественным воздушным охлаждением. Основные параметры блока приведены в таблице 2, внешний вид блока

Таблица 2. Основные характеристики БК6ТФИ-100000-12,0-Е

Наименование параметра, режимы испытаний	Значение
Номинальное постоянное напряжение, V_D, V_R , кВ	12
Амплитуда импульса тока, I_{TRM} , кА	100
Длительность импульса тока (полуволна), t_p , мс	0,7
Максимальная скорость нарастания тока при включении, (di_T/dt) , А/мкс	500
Интеграл действия тока в импульсе, i^2t , А ² с	$2,3 \times 10^6$
Класс изоляции относительно заземленной конструкции, V_{isol} , кВ	28
Температура окружающей среды, °С: максимально допустимая минимально допустимая	+40 +5
Температура хранения, °С: максимально допустимая минимально допустимая	+60 -30
Вид охлаждения	Воздушное естественное
Габаритные размеры, не более, мм	640×330×310
Масса, не более, кг	65



Рис. 1. Фототиристоры импульсные серии ТФИ

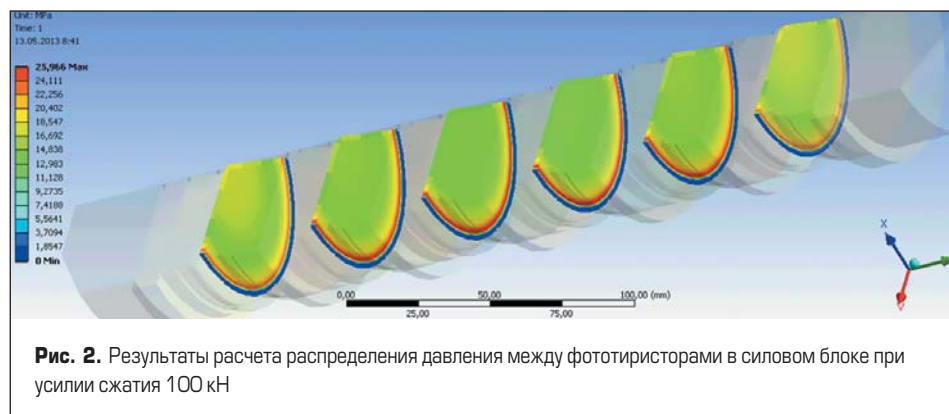


Рис. 2. Результаты расчета распределения давления между фототиристорами в силовом блоке при усилии сжатия 100 кН

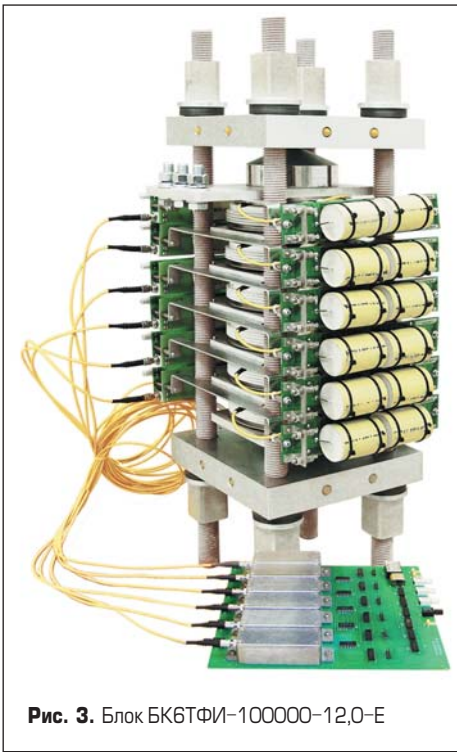


Рис. 3. Блок БК6ТФИ-100000-12,0-Е

представлен на рис. 3, структурная схема силового блока — на рис. 4.

Для надежной эксплуатации коммутаторов при больших токах и высоких напряжениях следует учитывать особенности работы фототиристоров [7] и обеспечивать:

- форсированное включение последовательно соединенных приборов;
 - подавление импульсных перенапряжений, возникающих при запираии фототиристоров или при обрыве тока в нагрузке.
- Форсирование включения фототиристоров достигается подключением RC-цепи парал-

Таблица 3. Основные характеристики платы драйвера блока БК6ТФИ-100000-12,0 Е

Наименование параметра, режимы испытаний	Значение
Сигнал запуска драйвера	оптический, электронный
Мощность оптического излучения драйвера, P _л , мВт	200–350
Тип оптоволоконного кабеля	QQ WF 205/230
Габаритные размеры, мм	260×230×36
Масса, не более, кг	2
Напряжение питания, В	24

льно каждому прибору. Для подавления импульсных перенапряжений при обратном восстановлении фототиристоров применяют RCD-снабберы.

Блок оснащен платами запуска фототиристоров. Управление фототиристорами в блоке обеспечивается драйверами собственной разработки, основные параметры которых приведены в таблице 3.

Панель драйвера соединена с блоком коммутатора многомодовым оптоволоконным кабелем 200/230 мкм с двумя ST-коннекторами на концах. На панели драйвера через разъем XT1–XT2 подается напряжение питания оптических излучателей ИЛ-1М и преобразователя напряжения 24/+5 В, питающее схему логики и индикации панели драйвера. Запуск панели драйвера производится сигналом через оптоприемник U2 «Пуск оптический» или сигналом через разъем XT3 «Пуск инжекционный» (витая пара). Схема панели драйвера формирует импульс управления длительностью 10 мкс, размножает его на шесть разовых импульсов и синхронно подает их через разъемы X7–X12 на входы шести лазерных излучателей А1–А6, которые включают фототиристоры блока. Связь излучателей с фототиристорами оптическая по многомодовым кабелям через адаптеры ST. Панель драйвера имеет в своем составе схему контроля временного снижения

оптической мощности импульсов излучения до заданного опорного уровня и световую индикацию наличия прохождения их в течение 2 с оптоизлучателем U3 «Сигнал». Возврат схемы панели драйвера в исходное состояние после прохождения импульса запуска осуществляется автоматически.

Со стороны анода и катода высоковольтного блока расположены силовые шины, предназначенные для подключения блока к внешней коммутируемой цепи. Блоки БК6ТФИ-100000-12,0 Е также обеспечивают работоспособность при воздействии радиационного фона в местах их размещения: вид излучения — гамма-кванты с энергией кванта — 6,5 МэВ; максимальная интенсивность излучения — 0,01 Гр/ч; суммарная доза за период эксплуатации — 47 Гр.

Силовые блоки БК6ТФИ-100000-12,0 Е применены в коммутирующем оборудовании для конденсаторных батарей термоядерного реактора мощностью 500 МВт, строительство которого ведется по международному проекту ИТЭР. Конденсаторные батареи предназначены для создания импульса противотока в вакуумных прерывателях двух ступенчатых мощных контакторов. Эти контакторы являются частью системы питания сверхпроводящих катушек ИТЭР и обеспечивают быстрый разряд энергии магнитного поля

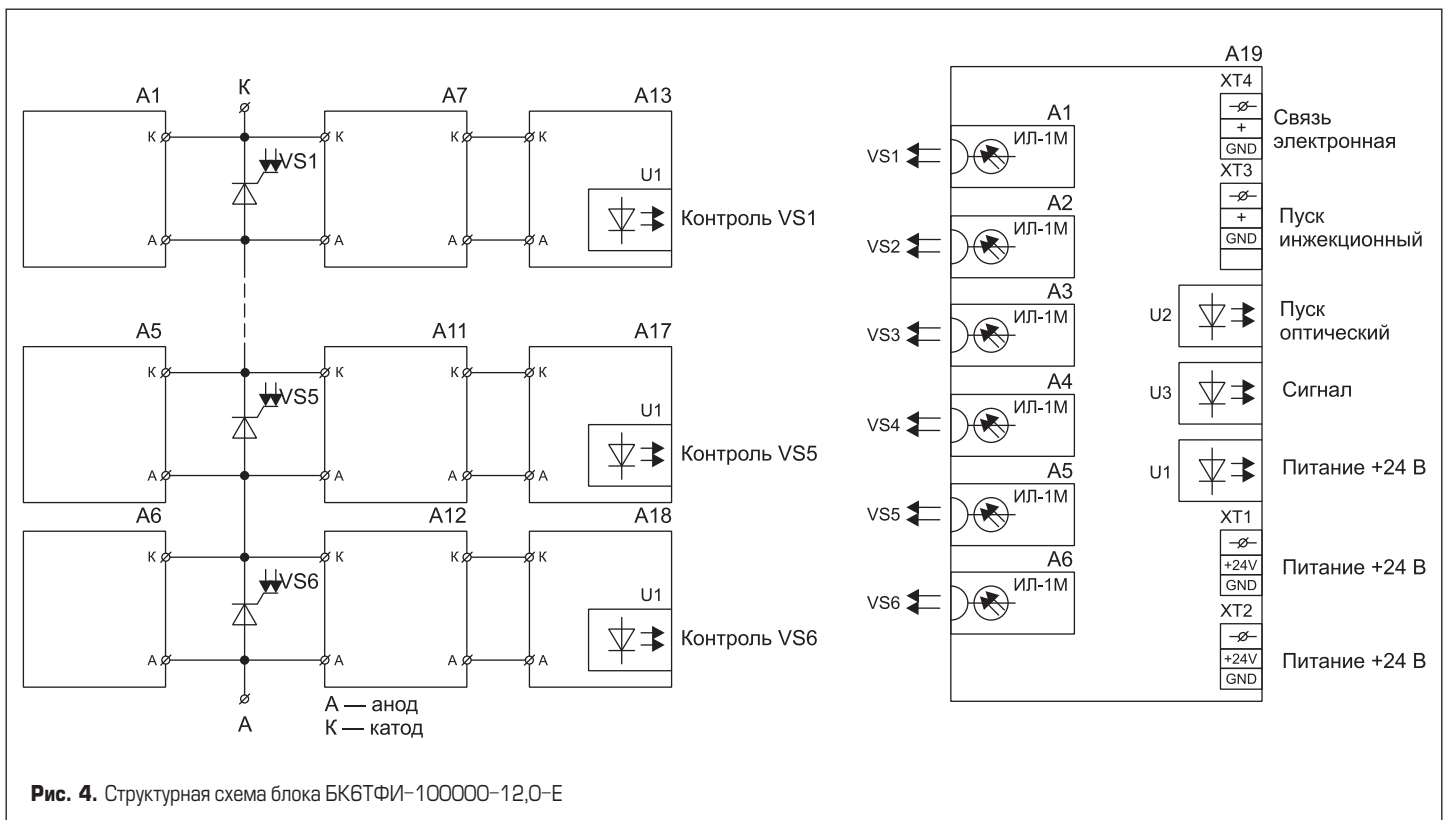


Рис. 4. Структурная схема блока БК6ТФИ-100000-12,0-Е

Таблица 4. Краткие характеристики блоков коммутаторов на основе импульсных фототиристоров

Параметр	БК1ТФИ-20000-2,5-Е	БКЗТФИ2Д-100000-7,0-Е	БК5ТФИ-20000-24,0-Е
Максимальное напряжение, кВ, не более	2,5	7	24
Максимальный импульсный ток, кА, не более	20	100	20
Длительность полуволны разрядного импульса, мс	19,3	0,6	1
Частота повторения импульсов, мин-1, не более	1/30	1/10	1
Габаритные размеры, мм, не более	300×360×360	390×390×235	450×260×220
Внешний вид	рис. 5	рис. 6	рис. 7

сверхпроводящих катушек посредством включения в контур катушек разрядных резисторов. Сверхпроводящие катушки ИТЭР запасают значительную энергию (несколько ГДж) и от конденсаторной батареи проточного тока должен быть сформирован импульс тока не менее 70 кА длительностью порядка 600 мкс при начальном напряжении заряда до 10 кВ. После прохождения импульса тока разрядный ключ конденсаторной батареи закрывается и высокое напряжение, превышающее начальное напряжение заряда прикладывается к разрядному ключу [7].

Линейка силовых блоков на фототиристорах

Используя подходы в разработке и проектировании, описанные в предыдущей главе, а также накопленный опыт в изготовлении коммутаторов для импульсных применений специалистами компании реализован ряд проектов по техническим требованиям потребителей. В результате создана линейка силовых блоков на основе импульсных фототиристоров [8]. Ниже представлена информация по выборке из линейки разработанных блоков с указанием их основных параметров (табл. 4).

Все представленные блоки обеспечивают работоспособность с заданными параметрами при естественном воздушном охлаждении.

Конструкция блока БКЗТФИ2Д-100000-7,0-Е на основе трех импульсных фототиристоров и двух кроубарных диодов рассчитана на эксплуатацию в составе емкостного накопителя

энергии 120 кДж с высокой плотностью энергии (до 0,4 Дж/см³). При проектировании блока учитывался возможный режим работы конденсаторной ячейки: обрыв тока в нагрузке. В комплект блока входит трехканальная плата драйвера управления фототиристорами.

Силовой блок БК5ТФИ-20000-24,0-Е отличается стойкостью к аварийным импульсам тока амплитудой 40 кА длительностью не более 2 мс.

Заключение

Силовые блоки на основе мощных фототиристоров представляют собой один из вариантов оптимального решения для комплектации высоковольтного коммутационного оборудования емкостных накопителей энергии. Описанные в статье примеры, не ограничивающие многообразие вариантов компоновки и параметров блоков. Представленные результаты являются платформой в создании новых надежных высоковольтных коммутаторов для импульсных применений, которые могут быть спроектированы в соответствии с задачами потребителя.

Литература

1. Сабешкин А., Мускатинов В., Гришанин А., Елисеев В., Иванова С., Потапов С., Аширов Р., Немаев Д. Силовые блоки на основе тиристоров и фототиристоров для промышленных применений // *Силовая электроника*. 2012. № 1.

2. Еникеев Р. Ш. Переходные процессы в емкостных накопителях энергии с полупроводниковыми коммутаторами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, СПб, 2011.

3. Chibirkin V., Martynenko V., Khapugin A., Konuchov A., Tundykov S., Grishanin A., Enikeev R., Serebrov R. Development and Investigations of Light Triggered Thyristors for Pulse Application. PCIM Europe, 17–19 May 2011. Nueremberg, Germany, 2011.

4. Хапугин А., Плотников А., Мартыненко В., Гришанин А., Кострицкий С., Картаев В. Исследования мощных фототиристоров в предельных импульсных режимах // *Силовая электроника*. 2019. № 3.

5. www.elvpr.ru

6. Serebrov R. A., Fridman B. E., Khapugin F. F., Martynenko V. A. Development and Research of Heavy Pulse Current LTT Switch // *EEE Transactions on Plasma Science*. 2016. Vol. 44.

7. Fridman B., Enikeev R., Kharcheva K., Kovrizhnykh N., Serebrov R. Counter pulse capacitor bank for 70kA, 10 kV commutation systems. IEEE Pulsed Power Conference, 16–22 June 2013, San Francisco, USA.

8. www.ao-elpress.ru

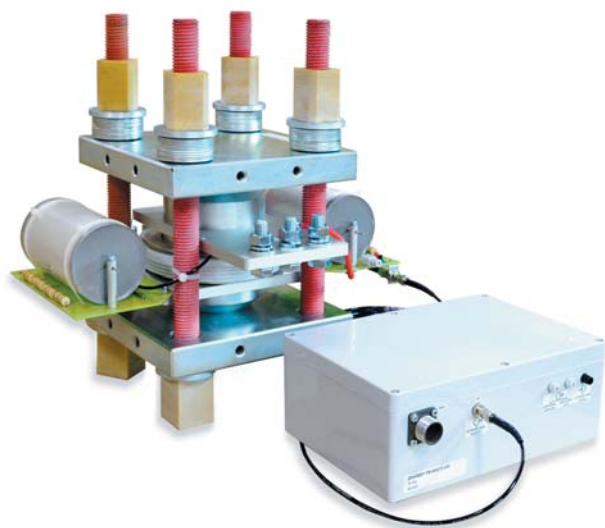


Рис. 5. Силовой блок БК1ТФИ-20000-2,5-Е с одноканальным драйвером управления

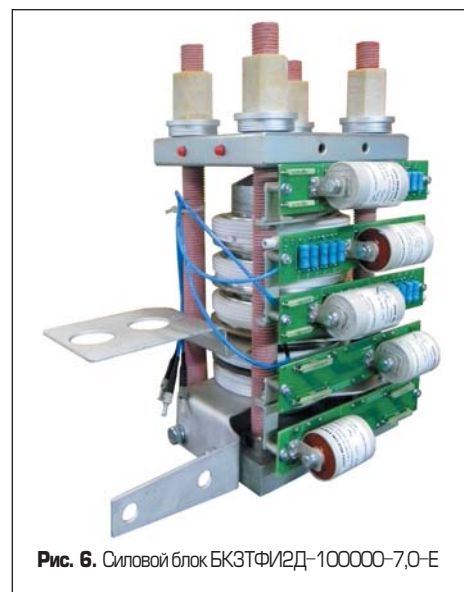


Рис. 6. Силовой блок БКЗТФИ2Д-100000-7,0-Е

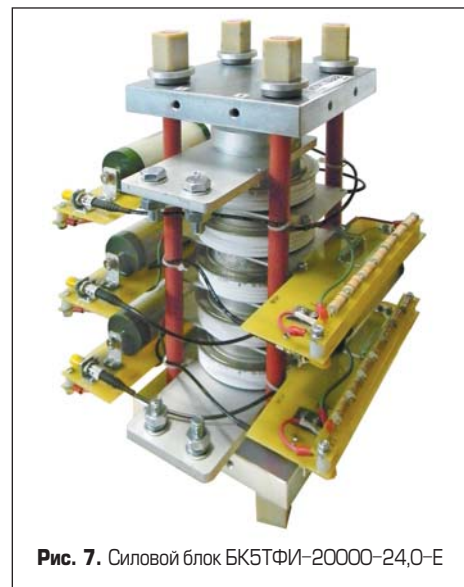


Рис. 7. Силовой блок БК5ТФИ-20000-24,0-Е