

## Высоковольтный сильноточный полупроводниковый ключ для безопасного проведения электродинамических испытаний силовых трансформаторов

КУВШИНОВ А.А., ХРЕННИКОВ А.Ю.

*Обоснована целесообразность использования высоковольтного сильноточного полупроводникового ключа (ВСПК) на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах для практической реализации технологии безопасного проведения электродинамических испытаний силовых трансформаторов. Рассмотрена схема защиты от перенапряжений испытуемого силового трансформатора и ВСПК при аварийном прерывании тока короткого замыкания. Представлены примеры выполнения силовой схемы ВСПК на запираемых тиристорах с интегрированным устройством управления (IGCT) и биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT). Показано, что наиболее полно требованиям безопасного проведения опытов короткого замыкания удовлетворяют ВСПК, реализованные на базе IGCT.*

*Ключевые слова: силовой трансформатор, электродинамические испытания, силовой полупроводниковый прибор, высоковольтный сильноточный ключ*

Проведение испытаний силовых трансформаторов на электродинамическую стойкость предполагает преднамеренное создание режима короткого замыкания (КЗ) при номинальном напряжении сетевой обмотки на предварительно заданное число периодов сетевого напряжения [1–3]. К основным трудностям практической реализации таких испытаний можно отнести требования точной синхронизации начала и окончания опытов КЗ, которые определяются необходимостью нормирования и повторяемости уровней воздействий на силовые трансформаторы [4]. Это требует применения специализированных высоковольтных выключателей с управляемой коммутацией и традиционной контактной системой [5] или ВСПК на основе силовых полупроводниковых приборов (СПП) [6–8]. Последние имеют гораздо больший коммутационный ресурс и обеспечивают более высокую точность синхронизации.

Не менее важными задачами являются оценка исходного состояния испытуемого силового трансформатора, выявление начальных повреждений, контроль развития повреждений в процессе испытаний. В этой связи необходим мониторинг испытуемого силового трансформатора не только до и после проведения каждого опыта КЗ, но и во время этого опыта [9, 10]. Это позволяет фиксировать начало возникновения аварийного процесса и уменьшить масштабы аварии в случае своевременного отключения испытуемого трансформатора. Для этого необходимо минимизировать интервал времени между моментом формирования аварийного сигнала и моментом аварийного прекращения опыта КЗ путем принудительного прерывания тока КЗ.

В этом заключается технология безопасного проведения электродинамических испытаний, которая предъявляет дополнительные требования к функциональным возможностям и динамическим свойствам ВСПК. Прежде всего это способность быстрого прерывания аварийного тока (за несколько микросекунд) и блокирования восстанавливающегося напряжения, возрастающего с высокой скоростью (сотни киловольт в микросекунду). Задача практической реализации безопасной технологии чрезвычайно актуальна, поскольку в настоящее время существует острая необходимость в проведении электродинамических испытаний силовых трансформаторов мощностью свыше (40, 63) МВА. В статье показана возможность решения указанной задачи путем реализации ВСПК на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов.

**Сравнительная характеристика современных силовых полупроводниковых приборов.** Коммутационные аппараты на базе силовых тиристорov с электрическим и прямым световым управлением способны прервать опыт КЗ только в момент перехода тока через нулевое значение и соответственно через интервал времени не более 10 мс после возникновения аварийного процесса. Однако это возможно только в том случае, если ток КЗ не содержит аperiodической составляющей. В противном случае аварийное прекращение опыта КЗ, например на первом периоде, когда амплитуда ударного тока и соответственно вероятность развития аварийного процесса максимальны, может привести к последующему неконтролируемому включению силовых

тиристоров и необратимому повреждению полупроводниковых структур.

Практика проведения электродинамических испытаний с использованием высоковольтных тиристорных вентилях широкой номенклатуры силовых трансформаторов номинальной мощностью до 666 МВА и номинальным напряжением (110, 750) кВ описана в [11]. Такие испытания проводились на Мощном испытательном стенде Все-союзного электротехнического института (г. Тольятти) в 1983–1994 гг.

Современная элементная база силовой электроники предоставляет достаточно широкий выбор различных видов СПП, которые обладают потенциальной возможностью для применения в составе ВСПК:

мощные низкочастотные тиристоры с управлением электрическим током (ЕТТ), особенности работы которых в условиях опытов КЗ силовых трансформаторов рассмотрены в [6, 7];

мощные низкочастотные тиристоры с прямым управлением светом (фототиристоры – ЛТТ), применение которых существенно упрощает схему и конструкцию высоковольтного тиристорного вентиля [8];

запираемые тиристоры (GTO), которые включаются и выключаются подачей на управляющий электрод импульсов положительного и отрицательного тока соответственно;

запираемые тиристоры с кольцевым выводом управляющего электрода, получившие название тиристоров с жестким управлением (GCT) и более совершенная их модификация – запираемые тиристоры с интегрированным устройством управления – драйвером (IGCT);

биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

По функциональным возможностям и коммутационным способностям каждый из перечисленных

СПП способен в большей или меньшей степени обеспечить комплекс требований, сформулированных ранее. В качестве примера в таблице представлены основные параметры трех видов СПП, способных коммутировать указанные токи, различных производителей: ОАО «Электровыпрямитель» (фототиристор типа ТФ183-2000) [12], ABB Semiconductors (IGCT типа 5SHY35L4510) [13] и IXYS (IGBT типа T1800GA45A) [14]. Выбранные СПП имеют таблеточную конструкцию (корпус «press – pack»), наиболее удобную для изготовления высоковольтных конструкций, и практически одинаковый диаметр кремниевой пластины (» 100 мм).

Следует только добавить, что в таблицу не включены обычные запираемые тиристоры (GTO), поскольку допускают низкую скорость нарастания анодного тока при включении и нарастания анодного напряжения ( $du/dt \leq 500$  В/(мкс)) после выключения. Данное обстоятельство требует использования тяжелых снабберных цепей RCD – типа (демпфирующий конденсатор шунтирован высоковольтным диодом) с ориентировочным значением емкости демпфирующего конденсатора около 2 мкФ на 1000 А коммутируемого тока. Кроме того, GTO характеризуются сложностью управления и высоким энергопотреблением цепей управления, вызванных наличием значительного тока сопровождения через управляющий электрод (несколько ампер) на весь интервал протекания анодного тока и большим значением запирающего импульса тока управления (порядка 650 А при значении запираемого тока 2500 А). Указанные недостатки препятствуют созданию ВСПК на базе последовательного соединения GTO и отсутствуют у IGCT и IGBT.

Как видно из таблицы, по коммутационной способности фототиристоры заметно превосходят IGCT и IGBT, а по динамическим параметрам (критическая скорость нарастания напряжения, за-

Тип прибора	Номинальное напряжение, кВ	Ток		Критическая скорость нарастания напряжения, В/мкс	Заряд восстановления, мкКл	Время, мкс		Коммутационная мощность, МВА	
		номинальный, А	ударный, кА			включения	выключения	номинальная	ударная
ЛТТ [12]	$U_{DRM}/U_{RRM}$ 6,5/7,0	$I_{TAV}$ 2115 (70 °C)	$I_{TSM}$ 40 (10 мс)	5000	5000	$t_{don}/t_r$ 5,0/–	630	$U_{DRM}I_{TAV}$ 13,7474	$U_{DRM}I_{TAV}$ 260
IGCT [13]	$U_{DRM}/U_{RRM}$ 4,5/4,5	$I_{TAV}/I_{TQRM}$ 1700/4000	$I_{TSM}$ 32 (10 мс)	Не требует ограничения	Отсутствует	$t_{don}/t_r$ 3,5/1,0	$t_{dof}/t_f$ 7,0/1,0	$U_{DRM}I_{TQRM}$ 18,0	$U_{DRM}I_{TSM}$ 144
IGBT [14]	$U_{CE}/U_R$ 4,5/0	$I_C$ 1500	$I_C$ 3,0 (10 мс)	То же	То же	$t_{don}/t_r$ 1,0/2,0	$t_{dof}/t_f$ 2,0/1,0	$U_{CE}I_C$ 6,75	$U_{CE}I_C$ 13,5

ряд восстановления, время включения и выключения) существенно уступают. Таким образом, существует реальная возможность создания ВСПК для проведения опытов КЗ с нормированным уровнем воздействий при электродинамических испытаниях силовых трансформаторов.

**Защита от перенапряжений при аварийном прекращении опыта короткого замыкания.** На рис. 1 представлена схема защиты ВСПК от перенапряжений при проведении электродинамических испытаний силового трансформатора ИТ с помощью нелинейных ограничителей напряжения FV1 и FV2.

Силовая схема ВСПК содержит цепочку из  $n$  последовательно соединенных ячеек, каждая из которых образована встречно-параллельно соединенными ключами  $S1_{(1)}, \dots, S1_{(n)}$  и  $S2_{(1)}, \dots, S2_{(n)}$ . В качестве последних должны использоваться полностью управляемые силовые полупроводниковые приборы, например запираемые тиристоры с кольцевым выводом управляющего электрода и интегрированным устройством управления (IGCT) или мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Шкаф управления (ШУ) по сигналу «Пуск» формирует серию управляющих импульсов, которые по световодам передаются на потенциал ВСПК. Число управляющих импульсов определяет число положительных и отрицательных полупериодов тока в опыте КЗ. По сигналу «Стоп» серия

управляющих импульсов прекращается, завершая опыт КЗ. Сигналы трансформаторов напряжения TV и тока ТА обеспечивают синхронизацию соответственно моментов включения и выключения ВСПК при нормальном протекании опыта КЗ.

Относительное значение установившегося тока КЗ трехфазного трансформатора в двухобмоточном режиме при искусственном закорачивании выводов на стороне низкого напряжения определяется выражением

$$I_{\text{К}}^* = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{(u_{\text{К}}\% / 100 + S_{\text{НОМ}} / S_{\text{С}})}, \quad (1)$$

где  $u_{\text{К}}\%$  – напряжение КЗ испытываемого трансформатора, %;  $I_{\text{НОМ}}, S_{\text{НОМ}}$  – номинальный ток и номинальная мощность испытываемого силового трансформатора;  $S_{\text{С}}$  – мощность КЗ питающей сети на шинах испытательного стенда.

Если  $\sqrt{2}I_{\text{К}} \leq I_{\text{TORM}}$ , то аварийное прерывание опыта КЗ возможно в любой момент времени  $I_{\text{TORM}}$  – импульсный запираемый ток, т.е. ток, который способен выключить по управляющему электроду IGCT при использовании в составе ВСПК.

Если  $I_{\text{TORM}} < \sqrt{2}I_{\text{К}} < I_{\text{TSM}}$ , то аварийное прерывание опыта КЗ возможно только на той части каждого полупериода, где выполняется условие

$$j \in \sin^{-1}(I_{\text{TORM}} / \sqrt{2}I_{\text{К}}). \quad (2)$$

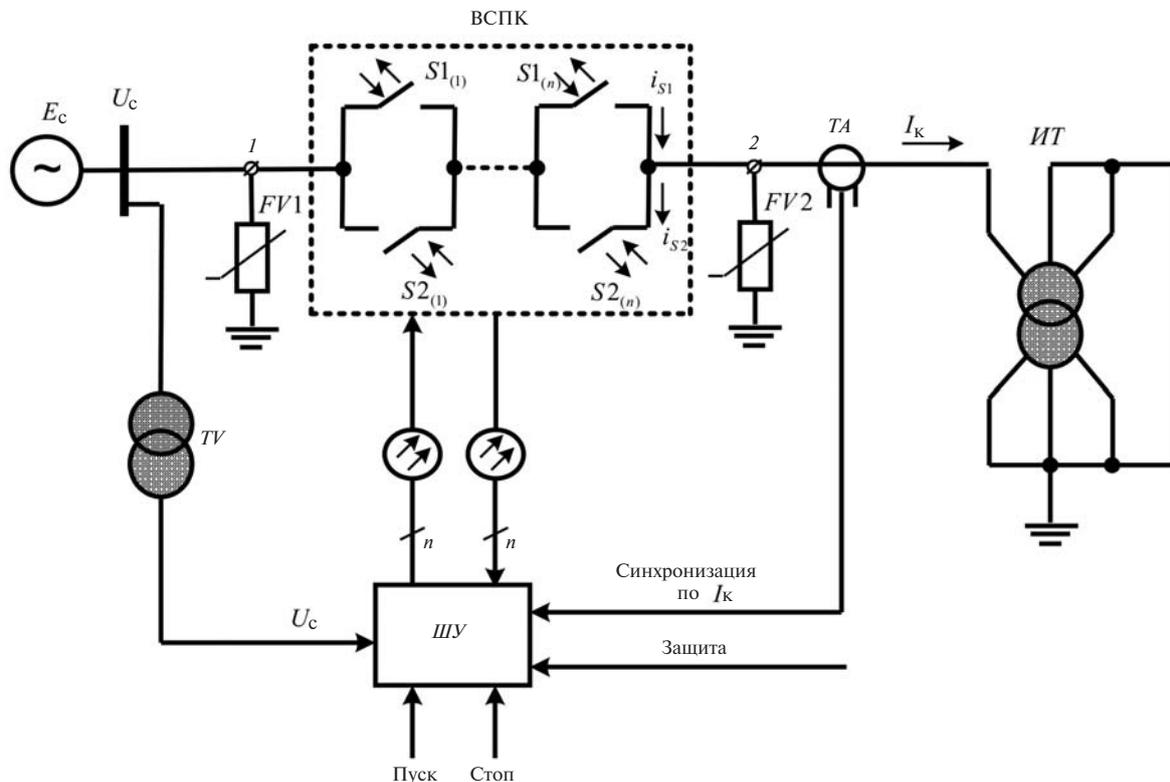


Рис. 1. Схема включения ВСПК для безопасного проведения электродинамических испытаний

Выражение (2) определяет область  $[(p - J), (p + J)]$  возможного прерывания опыта КЗ, центром которой является момент перехода тока КЗ через нулевое значение.

При аварийном прерывании опыта КЗ по сигналу «Защита» возможно возникновение перенапряжений с высокой кратностью, вызванных быстрым спадом тока в индуктивностях обмоток ИТ, ошиновки испытательного стенда и собственной ошиновки ВСПК. Нелинейный ограничитель напряжений  $FV2$  поглощает энергию магнитного поля индуктивности КЗ ИТ, ошиновки испытательного стенда и фиксирует потенциал вывода «2» ВСПК относительно «земли». Ограничитель  $FV1$  поглощает энергию магнитного поля внутренней ошиновки ВСПК и фиксирует потенциал вывода 1 относительно «земли». Кроме того, ограничитель  $FV1$  защищает ВСПК от грозовых и коммутационных перенапряжений, поступающих на шины  $U_c$  испытательного стенда со стороны питающей сети. В результате необходимое число последовательно соединенных ячеек определяется соотношением

$$n = \frac{\sqrt{2} E_c}{U_{DRM}} k_o k_U k_H k_{и}, \quad (3)$$

где  $E_c$  – действующее значение фазной ЭДС электрической сети, питающей испытательный стенд;  $U_{DRM}$  – повторяющееся импульсное напряжение СПП в закрытом состоянии;  $k_o = 1,1$  – коэффициент, учитывающий возможность предельно допустимого установившегося отклонения напряжения на шинах испытательного стенда;  $k_U = (1,6, 1,8)$  – уровень ограничения перенапряжений, обеспечиваемый нелинейными ограничителями  $FV1$  и  $FV2$ ;  $k_H = (1,1, 1,2)$  – коэффициент, учитывающий неравномерность деления напряжения по последовательно соединенным ячейкам ВСПК;  $k_{и} = (1,05, 1,1)$  – коэффициент избыточности, обеспечивающий возможность работы ВСПК при пробое (5, 10)% СПП.

**ВСПК на запираемых тиристорах IGCT.** Запираемые тиристоры с интегрированным устройством управления (драйвером) – Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT) разработаны сравнительно недавно на основе обычных запираемых тиристоров – Gate Turn-Off (GTO) [16]. Тиристоры IGCT имеют таблеточную конструкцию (корпус типа «press-pack») с кольцевым выводом управляющего электрода, который охватывает прибор по окружности и проходит сквозь керамический корпус, контактируя снаружи с драйвером. Это позволило радикально уменьшить индуктивность цепи управляющего электрода и достигнуть скорости снижения выключаемого тока примерно до 4 кА/мкс, а время выключения снизить до единиц микросекунд (см. таблицу). Малое время выключе-

ния IGCT позволяет синхронизировать момент выключения ВСПК с точностью до нескольких микросекунд, обеспечивая бестоковую коммутацию и соответственно окончание опыта КЗ с минимальной амплитудой восстанавливающегося напряжения. Для сравнения, время выключения фототиристора ТФ183-2000 составляет 630 мкс.

Необходимо отметить, что достаточно широкая номенклатура IGCT ориентирована прежде всего на использование в составе мощных высоковольтных инверторов напряжения и конструктивно выполняется в общем со встроенным обратным диодом корпусе «press-pack», т.е. не обладает обратной блокирующей способностью. Тем не менее и такие IGCT могут использоваться для создания ВСПК.

На рис. 2 показаны два варианта силовой схемы ВСПК, один на IGCT, обладающих обратной блокирующей способностью (а), другой на IGCT, не обладающих обратной блокирующей способностью (б).

В первом случае каждая тиристорная ячейка ВСПК образуется встречно-параллельным соединением двух IGCT, во втором случае каждая тиристорная ячейка ВСПК образуется встречно-последовательным соединением двух IGCT.

Силовая схема ВСПК, показанная на рис. 2,а, реализована на запираемых тиристорах  $VS_1^{(+)} \dots, VS_n^{(+)}$  и  $VS_1^{(-)} \dots, VS_n^{(-)}$ , образующих ветви для протекания положительной и отрицательной полуволн тока КЗ соответственно. Штриховыми линиями на рис. 2,а показаны единые конструктивные единицы: запираемый тиристор  $VS_n^{(+)}$  – драйвер  $CU_n^{(+)}$ .

Сигналы управления передаются на драйверы  $CU_1^{(+)} \dots, CU_n^{(+)}$  и  $CU_1^{(-)} \dots, CU_n^{(-)}$  по оптоволоконным кабелям с потенциала земли. Питание драйверов  $CU_1^{(+)} \dots, CU_n^{(+)}$  и  $CU_1^{(-)} \dots, CU_n^{(-)}$  осуществляется постоянным напряжением (обычно 20 В) от внешних источников питания  $U_1^{(+)} \dots, U_n^{(+)}$  и  $U_1^{(-)} \dots, U_n^{(-)}$  мощностью до нескольких десятков ватт каждый соответственно. Гальваническая развязка преобразователей напряжения  $U_1^{(+)} \dots, U_n^{(+)}$  и  $U_1^{(-)} \dots, U_n^{(-)}$ , каждый из которых расположен на потенциале катодов соответствующих запираемых тиристоров  $VS_1^{(+)} \dots, VS_n^{(+)}$  и  $VS_1^{(-)} \dots, VS_n^{(-)}$ , обеспечивается кабельно-трансформаторным каналом  $TA_1^{(+)} \dots, TA_n^{(+)}$ .

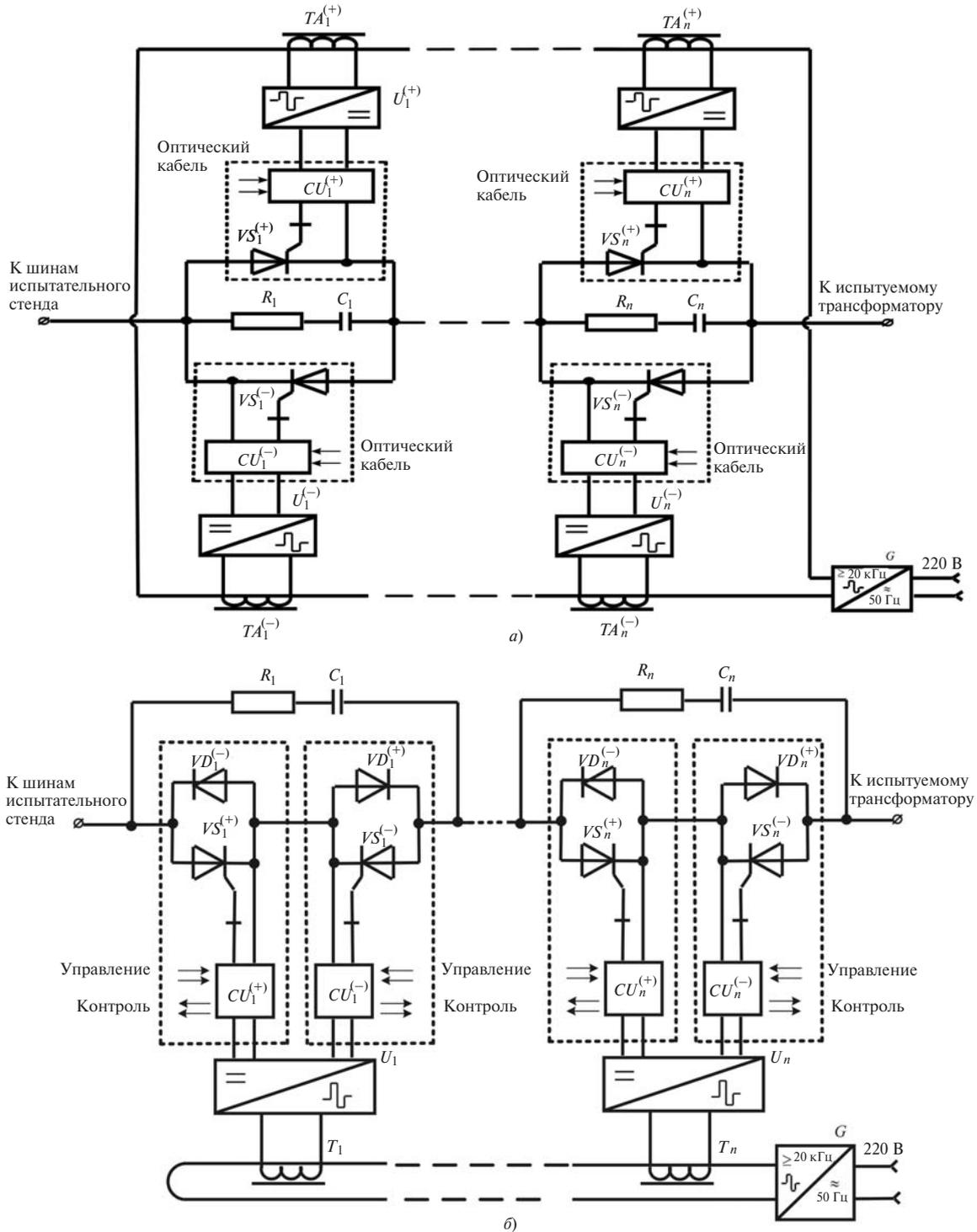


Рис. 2. Силовая схема ВСПК на IGBT, обладающих (а) и не обладающих (б) обратной блокирующей способностью с элементами системы управления на высоком потенциале

Первичная обмотка кабельно-трансформаторного канала – общая для всех трансформаторов  $TA_1^{(+)}, \dots, TA_n^{(+)}$  и  $TA_1^{(-)}, \dots, TA_n^{(-)}$ , вторичные обмотки подключены к источникам питания  $U_1^{(+)}, \dots, U_n^{(+)}$  и  $U_1^{(-)}, \dots, U_n^{(-)}$  соответственно. Генератор  $G$  высокочастотного напряжения питает первичную обмотку кабельно-трансформаторного канала.

Назначение основных элементов силовой схемы ВСПК, изображенной на рис. 2,б, не требует дополнительных пояснений. Следует только добавить, что положительная полуволна тока КЗ протекает через тиристоры  $VS_1^{(+)}, \dots, VS_n^{(+)}$  и диоды  $VD_1^{(+)}, \dots, VD_n^{(+)}$ , а отрицательная полуволна – через тиристоры  $VS_1^{(-)}, \dots, VS_n^{(-)}$  и диоды  $VD_1^{(-)}, \dots, VD_n^{(-)}$ .

В результате потери мощности в каждом корпусе IGCT (штриховые линии на рис. 2,б) складываются из потерь в тиристоре и потерь в диоде, что существенно утяжеляет температурный режим полупроводниковых структур. Поэтому ударная коммутационная мощность ВСПК, реализованного по варианту рис. 2,б, принципиально меньше ударной коммутационной мощности ВСПК, реализованного по варианту рис. 3,а.

Таким образом, ВСПК на IGCT способен обеспечить точную синхронизацию для бестокового окончания опыта КЗ, а при возникновении аварийной ситуации прервать опыт КЗ и при ненулевом токе. Для успешного окончания опыта КЗ ВСПК должен выдержать приложение восстанавливающегося напряжения, которое характеризуется не только амплитудным значением, практически равным  $U_{ост}$ , но и скоростью нарастания, которую также необходимо ограничивать. Для этого необходима демпфирующая RC-цепь, которую наиболее рационально ввести в состав ВСПК [12]. В этом случае дополнительно решается задача равномерного деления напряжения между СПП как в закрытом состоянии, так и на интервалах коммутации.

**ВСПК на биполярных транзисторах с изолированным затвором IGBT.** Следует отметить, что биполярные транзисторы принципиально не способны блокировать обратное напряжение, поэтому для

применения в составе ВСПК наиболее удобны одиночные IGBT с обратным диодом, конструктивно размещенные в общем корпусе типа «press-pack». Последовательное соединение двух таких IGBT позволяет получить ключ переменного тока.

В составе ВСПК могут использоваться «press-pack» IGBT типа T1800GA45A производителя IXYS, основные технические характеристики которых приведены в таблице. Для управления IGBT разработан драйвер C0030BG400SaS с напряжением питания  $\pm 15$  В, обеспечивающий импульс выходного тока амплитудой 30 А с временем нарастания 0,5 мкс при работе на емкостную нагрузку 100 нФ (емкость затвор – эмиттер транзистора T1800GA45A).

На рис. 3 представлена силовая схема ВСПК, которая состоит из  $n$  одинаковых последовательно соединенных ключей переменного тока.

Каждый ключ переменного тока образован встречно-последовательным двух «press-pack» IGBT с обратными диодами:  $VT_1^{(+)}, \dots, VD_1^{(-)}$  и  $VT_1^{(-)}, \dots, VD_1^{(+)}$ , ...,  $VT_n^{(+)}, \dots, VD_n^{(-)}$  и  $VT_n^{(-)}, \dots, VD_n^{(+)}$ . Каждый прибор «press-pack» выделен пунктирными линиями.

Положительная полуволна тока КЗ протекает через транзисторы  $VT_1^{(+)}, \dots, VT_n^{(+)}$  и обратные дио-

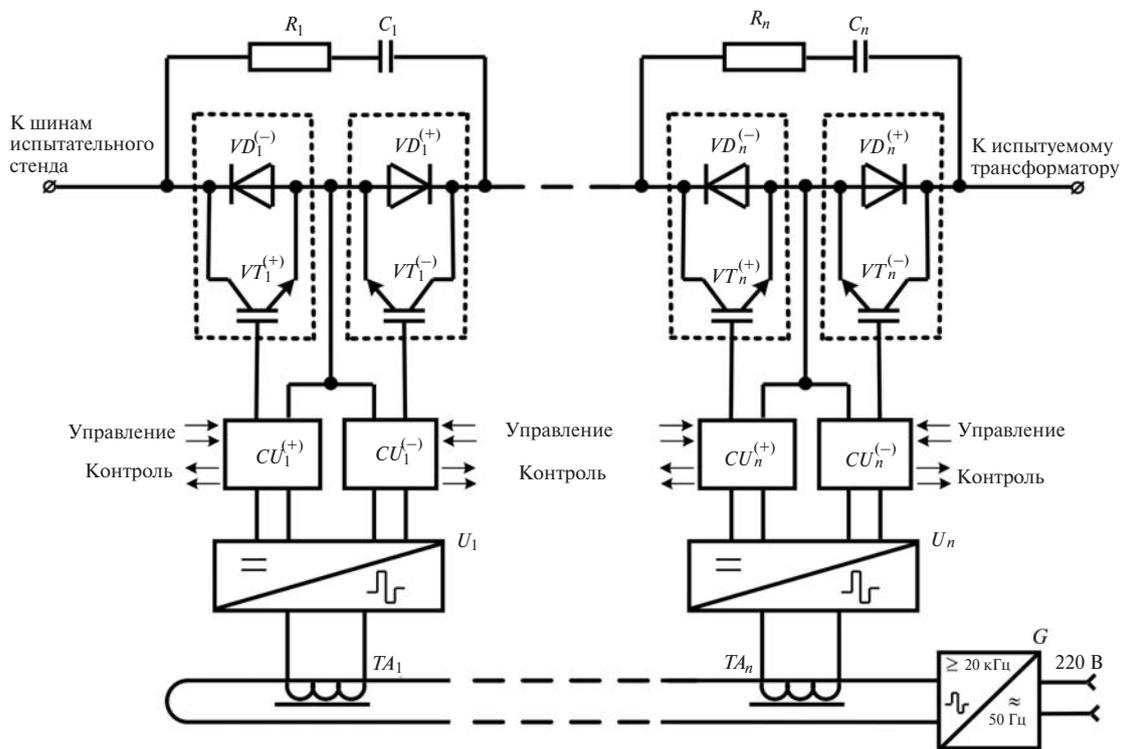


Рис. 3. Силовая схема ВСПК на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT) с элементами системы управления на высоком потенциале

ды  $VD_1^{(+)}, \dots, VD_n^{(+)}$ . Отрицательная полуволна тока КЗ протекает через транзисторы  $VT_1^{(-)}, \dots, VT_n^{(-)}$  и обратные диоды  $VD_1^{(-)}, \dots, VD_n^{(-)}$ .

Управление каждым транзистором  $VT_1^{(+)}, \dots, VT_n^{(+)}$  и  $VT_1^{(-)}, \dots, VT_n^{(-)}$  осуществляется индивидуальным драйвером  $CU_1^{(+)}, \dots, CU_n^{(+)}$  и  $CU_1^{(-)}, \dots, CU_n^{(-)}$  соответственно. При этом пары драйверов  $CU_1^{(+)}$  и  $CU_1^{(-)}, \dots, CU_n^{(+)}$  и  $CU_n^{(-)}$  находятся на одном потенциале, позволяя обеспечить питание каждой пары драйверов от одного источника стабилизированного двухполярного напряжения  $U_1, \dots, U_n$  соответственно. Входным для каждого источника питания  $U_1, \dots, U_n$  служит переменное напряжение высокой частоты вторичных обмоток трансформаторов  $TA_1, \dots, TA_n$  с общей первичной обмоткой, подключенной к высокочастотному генератору  $G$ . Кабельно-трансформаторный канал  $TA_1, \dots, TA_n$  обеспечивает передачу напряжения высокой частоты генератора  $G$  с потенциала «земли» на потенциалы последовательно соединенных ячеек ВСПК. Уровень изоляции между первичной обмоткой и вторичными обмотками трансформаторов  $TA_1, \dots, TA_n$  должен выдерживать полное напряжение ВСПК.

Учитывая, что перегрузочная способность IGBT весьма незначительна по сравнению с тиристорами (обычно  $I_{см} \ll I_c$  при длительности импульса коллекторного тока не более 1 мс), ВСПК с силовой схемой, изображенной на рис. 3, могут использоваться для проведения электродинамических испытаний только силовых трансформаторов с амплитудой ударного тока КЗ не более 3 кА.

**Выводы.** 1. Технология безопасного проведения электродинамических испытаний силовых трансформаторов путем аварийного прерывания опыта КЗ практически может быть реализована с помощью ВСПК на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах – IGBT или IGBT.

2. Защита от перенапряжений при аварийном прекращении опыта КЗ обеспечивается поглощением энергии, накопленной в магнитном поле индуктивностей КЗ и ошиновки испытательного стенда, нелинейными ограничителями перенапряжений, установленными на выводах ВСПК.

3. По сочетанию коммутационной способности и динамических параметров наиболее полно требованиям технологии безопасного проведения опытов КЗ удовлетворяют запираемые тиристоры IGBT.

4. При практической реализации ВСПК для уменьшения потерь мощности и повышения ком-

мутационной способности предпочтительней использовать IGBT без встроенного обратного диода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хренников А.Ю. Проблема электродинамической стойкости силовых трансформаторов. – Промышленная энергетика, 2008, № 9, с. 12–16.
2. Хренников А.Ю., Мажурин Р.В. Мощный испытательный центр в России. Технические и организационные факторы. – Новости электротехники, 2012, № 3(75), с. 5–11.
3. Хренников А.Ю., Мажурин Р.В. Электродинамические испытания для повышения надежности трансформаторно-реакторного оборудования (ТРО), существующая испытательная база и возможности испытаний ТРО в будущем. – ЭЛЕКТРО, 2012, № 5, с. 41–46.
4. Кувшинов А.А., Хренников А.Ю. Функциональные и коммутационные особенности высоковольтного силовоточного полупроводникового ключа для электродинамических испытаний трансформаторов. – Промышленная энергетика, 2014, № 9, с. 10–15.
5. Portales E., Filion Y., Mercier A. Transformer-controlled switching taking into account residual flux-modelling transformers for realistic results in system studies. – RECIFE, 2011, p. 68.
6. Дементьев Ю., Смекалов В., Шакарян Ю., Хренников А.Ю., Кувшинов А.А. О создании Федерального испытательного центра. Электродинамические испытания силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ. – Новости электротехники, 2014, № 1(85), с. 32–37.
7. Кувшинов А.А., Хренников А.Ю. Высоковольтный тиристорный вентиль для электродинамических испытаний силовых трансформаторов. – ЭЛЕКТРО, 2014, № 2, с. 42–46.
8. Кувшинов А.А., Хренников А.Ю. Высоковольтный силовоточный полупроводниковый ключ с прямым световым управлением для электродинамических испытаний силовых трансформаторов. – Промышленная энергетика, 2015, № 2, с. 12–17.
9. Хренников А.Ю., Шлегель О.А. Контроль изменения индуктивного сопротивления трансформаторов для определения повреждений в обмотках. – Энергетик, 2004, № 2, с. 27–30.
10. Хренников А.Ю. Информационно-измерительные системы контроля и защиты обмоток силовых трансформаторов и реакторов. – Научный вестник НГТУ (Новосибирск), 2006, № 1(22), с. 123–130.
11. Хренников А.Ю., Гольдштейн В.Г. Техническая диагностика, повреждаемость и ресурсы силовых и измерительных трансформаторов и реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 2007, с. 286.
12. Конохов 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, с. 5–11.
13. Eric Carroll, Swen Klaka, Stefan Linder. Тиристоры IGBT. Новый подход к сверхмощной электронике. – Электротехника, 1998, № 7, с. 46–53.
14. Wakeman F., Li G., Golland A. New family of 4,5 kV Press-pack IGBTs. – PCIM'05, Nuremberg (Germany), June 2005, с. 6.

[24.09.15]

*А в т о р ы : Кувшинов Алексей Алексеевич окончил электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института (ТПИ) в 1975 г. В 2004 г. защитил докторскую диссертацию «Логико-алгебраическое моделирование и синтез интеллектуальных систем электропитания электронных и вычислительных средств в элементном базисе универсальных и силовых релейных». Профессор кафедры «Электро-*

снабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета.

**Хренников Александр Юрьевич** окончил в 1986 г. электротехнический факультет ТПИ. В 2009 г. защитил докторскую диссертацию «Комплексное диа-

гностическое моделирование параметров технического состояния силового трансформаторно-реакторного электрооборудования». Профессор Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт».

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 3, pp. 4–11.*

## A High-Voltage Heavy-Current Semiconductor Switch for Safely Carrying Out Electrodynamic Tests of Power Transformers

**KUVSHINOV Aleksei Alekseyevich** (Tol'yatti State University, Tol'yatti, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**KHRENNIKOV Aleksandr Yur'yevich** (Scientific Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

The article substantiates the advisability of using a high-voltage heavy-current semiconductor switch (HVHCSS) made using fully controlled power semiconductors for implementing the technology for safely carrying out electrodynamic tests of power transformers. An arrangement for protecting the tested transformer and HVHCSS from overvoltages arising during emergency interruption of short-circuit current is considered. Examples of implementing the HVHCSS power circuitry on the basis of IGCTs and IGBTs are given. It is shown that HVHCSSs constructed on the basis of IGCTs comply with the requirements of safely carrying out short-circuit tests to the fullest extent.

Key words: power transformer, electrodynamic tests, power semiconductor, high-voltage heavy-current semiconductor switch

### REFERENCES

1. **Khrennikov A.Yu.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2008, No. 9, pp.12–16.
2. **Khrennikov A.Yu.** *Novosti elektrotekhniki – in Russ. (News of Electrical Engineering)*, 2012, No. 3(75), pp. 5–11.
3. **Khrennikov A.Yu., Mazhurin R.V.** *ELEKTRO – in Russ. (ELECTRO)*, 2012, No. 5, pp. 41–46.
4. **Kuvshinov A.A., Khrennikov A.Yu.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2014, No. 9, pp. 10–15.
5. **Portales E., Filion Y., Mercier A.** Transformer-controlled switching taking into account residual flux-modelling transformers for realistic results in system studies. – RECIFE, 2011, p. 68.
6. **Dement'yev Yu., Smekalov V., Shakaryan Yu., Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A.** *Novosti elektrotekhniki – in Russ. (News of Electrical Engineering)*, 2014, No. 1 (85), pp. 32–37.
7. **Kuvshinov A.A., Khrennikov A.Yu.** *ELEKTRO – in Russ. (ELECTRO)*, 2014, No. 2, pp. 42–46.
8. **Kuvshinov A.A., Khrennikov A.Yu.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2015, No. 2, pp. 12–17.
9. **Khrennikov A.Yu., Shlegel' O.A.** *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2004, No. 2, pp. 27–30.
10. **Khrennikov A.Yu.** *Nauchnyi vestnik NGTU – in Russ. (Scientific Collection of the Novosibirsk State Technical University)*, 2006, No. 1 (22), pp. 123–130.
11. **Khrennikov A.Yu., Gol'dstein V.G.** *Tekhnicheskaya diagnostika, povrezhdayemost' i resursy silovykh i izmeritel'nykh transformatorov i reaktorov* (Technical diagnostics, damageability and lifetimes of power and instrument transformers and reactors). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 2007, p. 286.
12. **Konyukhov A.V., Veselova I.M., Martynenko V.A., Khapugin A.A., Grishanin A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 10, pp. 5–11.
13. **Carroll E., Klaka S., Linder S.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 1998, No. 7, pp. 46–53.
14. **Wakeman F., Li G., Golland A.** New family of 4,5 kV Press-pack IGBTs. – PCIM'05, Nuremberg (Germany), June 2005, p. 6.

[24.09.15]

