

Функциональные и коммутационные особенности высоковольтного сильноточного полупроводникового ключа для электродинамических испытаний трансформаторов

Кувшинов А. А., доктор техн. наук

Тольяттинский государственный университет

Хренников А. Ю., доктор техн. наук

ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», Москва

Разработаны требования к функциональным возможностям высоковольтного сильноточного полупроводникового ключа (ВСПК), обеспечивающие нормированный уровень и повторяемость воздействий на силовые трансформаторы при проведении электродинамических испытаний. Введено понятие коммутационной мощности, служащее обобщенной характеристикой ВСПК и количественным критерием для сравнительного анализа различных вариантов реализации. Представлена сравнительная оценка коммутационной мощности фототиристорных, запираемых тиристорных с интегрированным устройством управления, биполярных транзисторных с изолированной базой, имеющих практически одинаковый диаметр кремниевой пластины и пригодных для построения силовой схемы ВСПК. Получены расчетные выражения, позволяющие определить необходимую коммутационную мощность и количество силовых полупроводниковых приборов в составе ВСПК по известным паспортным данным испытываемых силовых трансформаторов. Предложены два способа использования ВСПК для проведения электродинамических испытаний.

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

Электродинамические испытания являются важным и необходимым этапом создания нового трансформаторного и реакторного оборудования, на котором проверяется адекватность реализованных конструкторско-технологических решений. Проблематика проведения электродинамических испытаний силовых трансформаторов (СТ) уже освещалась в ряде работ [1–3]. Их проверка на электродинамическую стойкость предполагает преднамеренное создание режима КЗ при номинальном напряжении сетевой обмотки на предварительно заданном интервале времени [4, 5]. Такой режим может быть создан с помощью высоковольтного тиристорного вентиля (ВТВ), способного включаться в необходимый момент и сохранять проводящее состояние заданное количество периодов сетевого напряжения [5]. В этом отношении ВТВ предпочтительнее контактных коммутационных аппаратов.

Однако в настоящее время выпускаются силовые полупроводниковые приборы и других видов, которые по многим техническим параметрам вполне сопоставимы и даже превосходят мощные силовые тиристоры. Поэтому для обоснованного выбора элементной базы ВСПК необходимо сформулировать технические требования, учитывающие специфические условия электродинамических ис-

пытаний СТ. Такая чрезвычайно актуальная задача и рассматривается в данной статье, поскольку в настоящее время существует острая необходимость в проведении электродинамических испытаний СТ мощностью выше $40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Требования к функциональным возможностям коммутационного оборудования. Для наиболее полного использования потенциала электродинамических испытаний необходимо коммутационное оборудование, способное обеспечить [3, 4]:

многократные циклы включения-отключения испытываемых СТ с искусственно закороченными выводами к питающим шинам испытательного стенда с необходимой мощностью КЗ;

синхронизацию начала опытов КЗ с напряжением на шинах испытательного стенда с точностью до единиц микросекунд для обеспечения полной повторяемости проводимых экспериментов;

регулирование фазы включения в диапазоне $0 \div \pi/2$ относительно момента перехода напряжения на шинах испытательного стенда через нулевое значение для нормирования апериодической составляющей тока КЗ;

синхронизацию окончания опытов с моментом перехода тока КЗ через нулевое значение для минимизации перенапряжений при отключении испытываемого трансформатора от шин стенда;

предварительное намагничивание магнитопровода испытываемого трансформатора однополярным током от напряжения на шинах стенда;

регулирование продолжительности опытов КЗ от одного периода промышленной частоты до максимально допустимого значения (3 с в соответствии с ГОСТ 11677–85).

Обеспечить выполнение указанных требований с помощью контактных коммутационных аппаратов (высоковольтных выключателей) практически невозможно, поскольку длительности включения и отключения, которые в зависимости от конкретного типа могут составлять десятки миллисекунд, являются статистическими характеристиками. Кроме того, высоковольтные выключатели имеют ограниченный коммутационный ресурс.

Таким образом, существует реальная необходимость создания ВСПК для проведения опытов КЗ с нормированным уровнем воздействий при электродинамических испытаниях СТ. Современная элементная база силовой электроники предоставляет достаточно широкий выбор различных видов силовых полупроводниковых приборов (СПП), обладающих потенциальной возможностью применения в составе ВСПК. К числу таких СПП можно отнести:

мощные низкочастотные тиристоры с управлением электрическим током (ЕТТ), особенности работы которых в условиях опытов КЗ СТ рассмотрены в [5];

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

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

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 каждый из перечисленных СПП способен обеспечить комплекс сформулированных выше требований. Однако при выборе вида СПП необходимо учитывать специфические особенности режима работы ВСПК в случае проведения электродинамических испытаний. Основная особенность заключается в том, что аварийный режим КЗ испытываемого трансформатора является по существу номинальным для ВСПК. Последний должен обладать соответствующими коммутационной способностью и коммутационным ресурсом, чтобы многократно пропускать токи КЗ широкой номенклатуры СТ без превышения предельно допустимых значений параметров СПП. Для этого обязательно следует учитывать кратковременность опытов КЗ.

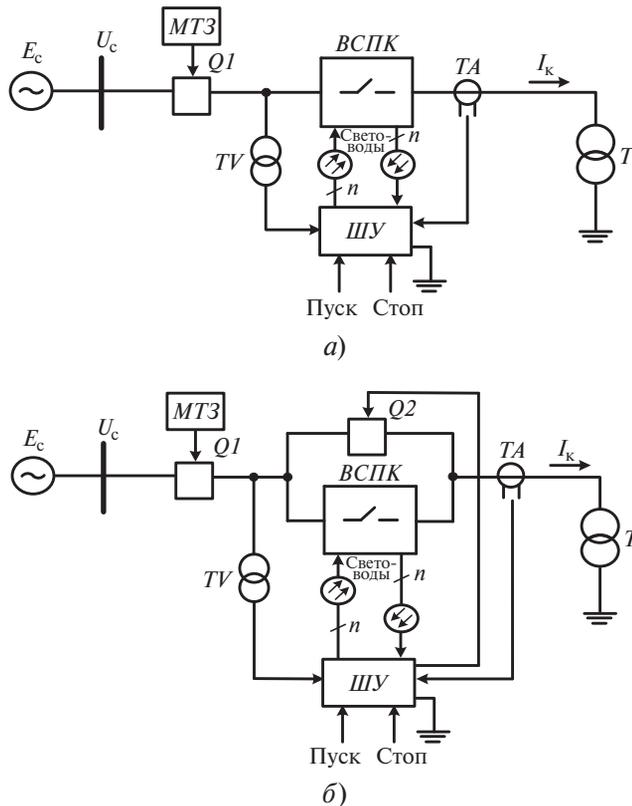
Требования к коммутационной способности ВСПК. Перегрузочная способность СПП, функционирующих в составе ВСПК, должна быть достаточной для пропуска тока КЗ на стороне высокого напряжения испытываемого СТ в двухобмоточном режиме при искусственном закорачивании выводов на стороне низкого напряжения. Кратность установившегося тока КЗ в двухобмоточных режимах трехфазного трансформатора определяется из выражения

$$I_{\text{к}}^* = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{1}{(u_{\text{к}}/100 + S_{\text{ном}}/S_{\text{с}})}, \quad (1)$$

где $u_{\text{к}}$ — напряжение КЗ испытываемого трансформатора, %; $I_{\text{ном}}$ и $S_{\text{ном}}$ — номинальный ток и номинальная мощность испытываемого СТ; $S_{\text{с}}$ — мощность КЗ питающей сети на шинах испытательного стенда (с учетом промежуточных трансформаторов для согласования напряжений на шинах стенда с номинальным напряжением испытываемого трансформатора).

Для СТ с номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 40 \div 1250 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, номинальным напряжением сетевых обмоток 110–500 кВ и напряжением КЗ $u_{\text{к}} = 10 \div 14 \%$ при $S_{\text{с}} \approx 0$ (шины бесконечной мощности) кратность установившегося тока КЗ $I_{\text{к}}^* = 7,14 \div 10$. В именованных единицах действующие значения установившегося тока КЗ составляют приблизительно 1–18 кА.

В общем случае электродинамические испытания могут предусматривать воздействие на испытываемый трансформатор установив-



Схемы включения ВСПК для реализации полного коммутационного цикла (а) и синхронизации опытов КЗ (б)

шегося тока КЗ с наложением апериодической составляющей с нормированным значением ударных коэффициентов. Согласно ГОСТ 11677–85 наибольший ударный ток КЗ (амплитуда первой полуволны тока КЗ)

$$I_{уд\ max} = I_K(\sqrt{2}k_{уд})$$

определяется значением ударного коэффициента $k_{уд}$, которое в зависимости от соотношения $u_{к(р)}/u_{к(а)}$ (где $u_{к(р)}$ и $u_{к(а)}$ — реактивная и активная составляющие напряжения КЗ испытываемого трансформатора) может находиться в пределах $k_{уд} = 1,07 \div 1,8$. Для мощных трансформаторов принимают максимально возможное значение $k_{уд} = 1,8$.

Для сравнительных оценок ВСПК, реализованных на основе различных видов СПП, целесообразно использовать понятие коммутационной мощности ВСПК, под которой следует понимать произведение действующих значений блокирующего напряжения и пропускаемого тока. Нужно различать номинальную и ударную коммутационные мощности, значения которых определяются соответственно установившимся и ударным токами КЗ.

Выражение (1) позволяет оценить значение номинальной коммутационной мощности

при установившемся токе КЗ и напряжении на шинах испытательного стенда, равном номинальному напряжению $U_{НОМ}$ сетевой обмотки испытываемого трансформатора:

$$S_{к.НОМ}^* = \frac{S_{к.НОМ}}{S_{НОМ}} = \frac{I_K U_{НОМ}}{\sqrt{3} S_{НОМ}} = \frac{1}{3(u_K/100 + S_{НОМ}/S_c)} \quad (2)$$

В наиболее неблагоприятном случае $S_{НОМ}/S_c \approx 0$ (при шинах испытательного стенда бесконечной мощности) и при типичных значениях напряжения КЗ $u_K = 10 \div 14\%$ номинальная коммутационная мощность ВСПК достигает значений $S_{к.НОМ}^* \approx 2,38 \div 3,33$, т. е. более чем в 2–3 раза превышает номинальную мощность $S_{НОМ}$ испытываемого СТ. Ударная коммутационная мощность благодаря апериодической составляющей тока КЗ увеличивается до значений $S_{к.уд}^* = k_{уд} S_K^* \approx 4 \div 6$.

Таким образом, для обеспечения электродинамических испытаний СТ с номинальной мощностью, не превышающей $S_{НОМ} = 1250\text{ МВ} \cdot \text{А}$, ударная коммутационная мощность ВСПК должна составлять $S_{к.уд} \approx 7500\text{ МВ} \cdot \text{А}$. Для сравнения следует указать, что наиболее мощные серийные СПП таблеточной конструкции с диаметром кремниевой пластины $100 \div 125\text{ мм}$ способны коммутировать мощность только до $10 \div 20\text{ МВ} \cdot \text{А}$, т. е. во много раз меньше требуемой коммутационной мощности ВСПК. Это необходимо учитывать при выборе вида СПП, силовой схемы ВСПК и способа применения последнего в опытах КЗ.

Схемы включения ВСПК. На рисунке представлены два возможных варианта включения ВСПК в схему проведения электродинамических испытаний силового трансформатора T . В первом варианте (рисунок, а) для проведения опыта КЗ ВСПК должен осуществлять полный коммутационный цикл, состоящий из следующих этапов:

блокирование напряжения U_c на шинах испытательного стенда после включения выключателя $Q1$;

включение в заданную фазу напряжения U_c для обеспечения нормированного значения апериодической составляющей тока КЗ;

пропускание аварийного тока КЗ в течение заданной продолжительности опыта КЗ;

выключение в момент перехода тока КЗ I_K через нулевое значение для минимизации

амплитуды восстанавливающегося напряжения;

блокирование восстанавливающегося напряжения до отключения выключателя $Q1$.

Выключатель $Q1$ выполняет защитные функции, обеспечивая при отказе ВСПК прекращение опыта КЗ в результате действия максимальной токовой защиты МТЗ с выдержкой времени, согласованной с требуемой продолжительностью опыта КЗ. Сигналы от трансформаторов напряжения TU и тока TA поступают в шкаф управления ШУ для синхронизации соответственно моментов включения и выключения ВСПК.

Во втором варианте (рисунок, б) ВСПК обеспечивает только синхронизацию опытов КЗ. Из полного коммутационного цикла исключается этап пропускания аварийного тока КЗ. Испытательная схема усложняется за счет введения шунтирующего выключателя $Q2$, но требования к коммутационной мощности ВСПК существенно снижаются. Включение ВСПК должно происходить в заданную фазу напряжения U_c , но с некоторым опережением $\Delta t_{оп}$ относительно момента замыкания контактов шунтирующего выключателя $Q2$. Если обеспечить $\omega \Delta t_{оп} \leq \pi/2$ (где ω — угловая частота сетевого напряжения), то ВСПК не будет подвергаться воздействию амплитуды ударного тока КЗ. После замыкания контактов ток КЗ протекает по цепи шунтирующего выключателя $Q2$, поскольку падение напряжения на переходном сопротивлении контактов во много раз меньше падения напряжения на $p-n$ переходах СПП.

Выключение ВСПК должно происходить после размыкания контактов шунтирующего выключателя $Q2$ в момент первого перехода тока КЗ через нулевое значение, т. е. с некоторым запаздыванием $\Delta t_{зп}$. Продолжительность интервала запаздывания не превысит значения, определяемого неравенством $\omega \Delta t_{зп} \leq \pi$. Таким образом, общая продолжительность интервалов протекания тока через ВСПК в начале и конце опыта КЗ не превысит одного периода сетевого напряжения. В результате коммутационная мощность синхронизирующего ВСПК для испытательной схемы на рисунке, б должна быть существенно меньше коммутационной мощности ВСПК полного коммутационного цикла для схемы на рисунке, а.

Требования к коммутационной способности СПП. Сравнительный анализ коммутационной способности различных видов СПП удобно проводить на основе обобщенных ха-

рактеристик, которыми могут служить номинальная коммутационная мощность

$$S_{п.ном} = I_{кл} U_{кл}$$

и ударная (импульсная) коммутационная мощность единичного прибора

$$S_{п.уд} = I_{уд} U_{кл},$$

где $I_{кл}$ и $U_{кл}$ — классификационные значения тока и напряжения СПП; $I_{уд}$ — ударный (импульсный) ток в открытом состоянии.

Номинальная коммутационная мощность $S_{п.ном}$ характеризует коммутационную способность СПП в длительных режимах работы с установившимся тепловым режимом полупроводниковой структуры, а ударная коммутационная мощность $S_{п.уд}$ — предельное значение мощности, которое СПП способен коммутировать только в кратковременном режиме, пока температурный режим полупроводниковой структуры не успевает достичь теплового равновесия и превысить предельно допустимый уровень.

В таблице для сравнения представлены значения номинальной и ударной коммутационных мощностей СПП трех типов (разных производителей): LTT типа ТФ183–2000 (ОАО “Электровыпрямитель”) [6], IGCT типа 5SHY35L4510 (ABB Semiconductors) [7] и IGBT типа T1800GA45A (IXYS) [8]. Выбранные СПП имеют таблеточную конструкцию (корпус “press-pack”), наиболее удобную для изготовления высоковольтных конструкций, и практически одинаковый диаметр кремниевой пластины (≈ 100 мм).

В качестве классификационного напряжения в таблице указаны для тиристорov повторяющиеся импульсные прямое (U_{DRM}) и обратное (U_{RRM}) напряжения в закрытом состоянии, а для IGBT — максимально допустимое постоянное напряжение коллектор — эмиттер (U_{CE}) и постоянное обратное напряжение (U_R). В качестве классификационного тока приведены для тиристорov средний ток в открытом состоянии (I_{TAV}) и дополнительно для IGCT — импульсный запираемый ток (I_{TQRM}), а для IGBT — максимально допустимое значение постоянного тока коллектора (I_C). В качестве ударного тока указаны: для тиристорov — ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии (I_{TSM}), для IGBT — импульсный коллекторный ток (I_{CM}).

Как видно из таблицы, значения номинальной коммутационной мощности рассматриваемых видов СПП вполне сопоставимы.

Параметр	Тип прибора		
	LTT ТФ183–2000	IGCT 5SHY35L4510	IGBT T1800GA45A
Классификационное напряжение, кВ	U_{DRM}/U_{RRM} 6,5/7,0	U_{DRM}/U_{RRM} 4,5/4,5	U_{CE}/U_R 4,5/0
Классификационный ток, А	I_{TAV} 2115 (70 °С)	I_{TAV}/I_{TQRM} 1700/4000	I_C 1500
Ударный ток, кА	I_{TSM} 40 (10 мс)	I_{TSM} 32 (10 мс)	I_{CM} 3,0 (1,0 мс)
Номинальная коммутационная мощность, МВ · А	$U_{DRM} I_{TAV}$ 13,7474	$U_{DRM} I_{TQRM}$ 18	$U_{CE} I_C$ 6,75
Ударная коммутационная мощность, МВ · А	$U_{DRM} I_{TSM}$ 260	$U_{DRM} I_{TSM}$ 144	$U_{CE} I_{CM}$ 13,5

Однако отношение ударной коммутационной мощности к номинальной

$$k_{п max} = S_{п,уд}/S_{п,ном},$$

характеризующее предельную перегрузочную способность СПП, составляет для фототиристоров $k_{п max} \approx 19$, для запираемых тиристоров $k_{п max} = 8$, для транзисторов с изолированным затвором только $k_{п max} = 2$. Следует отметить, что в последнем случае допустимая длительность протекания импульсного коллекторного тока (1 мс) значительно меньше, чем ударного неповторяющегося тока через тиристоры (10 мс).

Ударная коммутационная мощность ВСПК

$$S_{к,уд} = NS_{п,уд}, \quad (3)$$

где $S_{п,уд}$ — ударная коммутационная мощность единичного СПП; N — количество последовательно-параллельно соединенных приборов.

Используя выражение (3), можно с учетом формулы (2) определить минимально необходимое количество СПП в составе ВСПК по номинальным параметрам испытываемого трансформатора:

$$N_{min} = \frac{k_{уд}}{3k_{п max} S_{п,ном}^* (u_k / 100 + 1 / S_c^*)}, \quad (4)$$

где $S_{п,ном}^* = S_{п,ном} / S_{ном}$; $S_c^* = S_c / S_{ном}$.

Поскольку продолжительность опытов КЗ отличается от допустимой длительности ударного тока, указанной в информационных ма-

териалах, значение $k_{п}$ следует выбирать таким образом, чтобы

$$1 \leq k_{п} \leq k_{п max}.$$

При $k_{п} = 1$ силовые приборы работают в номинальном режиме при классификационных значениях тока и напряжения. В этом случае практически не используются перегрузочные способности СПП, количество которых в составе ВСПК будет максимальным. Поэтому необходимо учитывать главную отличительную особенность ВСПК, заключающуюся в том, что благодаря кратковременности опытов КЗ испытываемого трансформатора температурный режим полупроводниковых структур СПП не достигает теплового равновесия. Это позволяет выбирать $k_{п} \gg 1$, но не превышая предельного значения $k_{п max}$. Чем больше $k_{п}$, тем меньше потребуется СПП для реализации ВСПК, но тяжелее будет температурный режим полупроводниковых структур.

Способность СПП выдерживать аварийный ток определяется максимально допустимой температурой перехода на интервале проводимости, которая не должна достигать 400 ÷ 600 °С, когда начинаются процессы шнурования прямого тока. Максимально допустимая температура перехода в момент приложения обратного напряжения не должна достигать 200 ÷ 300 °С из-за процесса шнурования обратного тока. Если к СПП после протекания аварийного тока прикладывается прямое напряжение, то температура перехода не должна превышать 150 ÷ 170 °С, поскольку в противном случае возможно са-

мопроизвольное включение [9 – 11]. Поэтому для обеспечения надежного функционирования ВСПК необходимо, чтобы температура полупроводниковых структур СПП на всем интервале опыта КЗ, включая этап восстановления напряжения, не превышала допустимого значения, указанного в информационных материалах (обычно 120 или 125 °С) [12].

Анализ представленных в таблице классификационных параметров показал, что каждый из рассмотренных СПП можно использовать для создания ВСПК, способного коммутировать токи КЗ широкой номенклатуры силовых трансформаторов. Для СТ с токами КЗ на стороне высокого напряжения до 1,5 ÷ 3,0 кА существует принципиальная возможность создания ВСПК полного коммутационного цикла на базе высоковольтных IGBT. При больших токах КЗ ВСПК полного коммутационного цикла может быть реализован на базе фототиристоров или запираемых тиристоров IGCT. Не следует исключать и вариант синхронизирующего ВСПК на базе IGBT.

Выводы

1. Комплекс функциональных требований к коммутационному оборудованию для электродинамических испытаний СТ, включая предварительное намагничивание магнитопровода, синхронизацию, регулирование начальной фазы включения, пропускание и отключение тока КЗ, в наиболее полном объеме может быть выполнен только с использованием высоковольтного сильноточного полупроводникового ключа.

2. Для сравнительной характеристики различных вариантов реализации ВСПК целесообразно применять понятия ударной и номинальной коммутационных мощностей, значения которых для ВСПК в целом определяются параметрами испытываемого трансформатора и примыкающей сети, а для отдельных СПП — классификационными параметрами, указанными в информационных материалах.

3. В зависимости от значения ударной коммутационной мощности ВСПК при проведении электродинамических испытаний может использоваться либо самостоятельно для

осуществления полного коммутационного цикла, включая синхронизацию и пропускание тока КЗ, либо совместно с шунтирующим выключателем только для синхронизации опытов КЗ.

Список литературы

1. Хренников А. Ю. Проблема электродинамической стойкости силовых трансформаторов. — Промышленная энергетика, 2008, № 9.
2. Хренников А. Ю., Мажурин Р. В. Мощный испытательный центр в России. Технические и организационные факторы. — Новости электротехники, 2012, № 3 (75).
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.
4. Хренников А. Ю., Гольдштейн В. Г. Техническая диагностика, повреждаемость и ресурсы силовых и измерительных трансформаторов и реакторов. — М.: Энергоатомиздат, 2007.
5. Хренников А. Ю., Кувшинов А. А. Электродинамические испытания силовых трансформаторов на стойкость к токам короткого замыкания в Федеральном испытательном центре. — В кн.: Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. “Инновационные решения и современные технологии эксплуатации трансформаторного оборудования высокого напряжения”. СПб, ПЭИПК, 2013.
6. Отечественные высоковольтные мощные фототиристоры с интегрированной самозащитой от пробоя / А. В. Конюхов, И. М. Веселова, В. А. Мартыненко и др. — Электричество, 2011, № 10.
7. ABB Switzerland Ltd. Semiconductors reserves the right to change specifications without notice. — Doc. NO 5SYA1232-01. Dec.02.
8. Wakeman F., Li G., Golland A. New family of 4,5 kV Press-pack IGBTs. — PCIM'05, Nuremberg, Germany, June, 2005.
9. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М. И. Абрамович, В. М. Бабайлов, В. Е. Либер и др. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
10. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. — М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2001.
11. Кэрролл Э., Клака С., Линдер С. Тиристоры IGCT. Новый подход к сверхмощной электронике. — Электротехника, 1998, № 7.
12. О создании Федерального испытательного центра. Электродинамические испытания силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ / Ю. А. Деметьев, А. А. Кувшинов, В. В. Смекалов и др. — Новости электротехники, 2014, № 1 (85).

ak2390@inbox.ru