

* * *

Электричество, 2015, № 11, с. 26–32.

Технология безопасного проведения электродинамических испытаний силовых трансформаторов

КУВШИНОВ А.А., ХРЕННИКОВ А.Ю.

Предложен критерий безопасности электродинамических испытаний, который заключается в принудительном прекращении опыта короткого замыкания сразу после формирования сигнала аварийного состояния обмоток испытуемого силового трансформатора. Показано, что практическая реализация предложенного критерия возможна только с использованием высоковольтного сильно-точного полупроводникового ключа (ВСПК) на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах. Рассмотрена схема испытательного стенда с защитой от перенапряжений как испытуемого силового трансформатора, так и ВСПК при аварийном прерывании тока короткого замыкания. Определены требования к пропускной способности ограничителей перенапряжений.

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

Технологический процесс электродинамических испытаний силовых трансформаторов согласно требованиям ГОСТ 20243–88 предусматривает проведение контрольных измерений перед началом и после окончания каждого опыта короткого замыкания (КЗ) [1–5]. Это необходимо для оценки исходного состояния испытуемого силового трансформатора, выявления начальных повреждений и контроля развития повреждений в процессе испытаний. К числу наиболее информативных диагностических параметров относится индуктивное сопротивление короткого замыкания, изменение которого позволяет фиксировать осевые и радиальные деформации обмоток, а также изменения взаимного пространственного расположения обмоток испытуемого силового трансформатора [6].

Для практической реализации безопасной технологии электродинамических испытаний мониторинг диагностических параметров силового трансформатора необходим не только перед и после проведения каждого опыта (КЗ), но и во время

опыта КЗ и соответственно под рабочим напряжением. Это позволяет фиксировать начало возникновения аварийного процесса и уменьшить масштабы аварии в случае своевременного отключения испытуемого трансформатора. Информационно-измерительные системы (ИИС) для контроля параметров испытуемого трансформатора во время опытов короткого замыкания рассмотрены в ряде работ [6–8].

Однако только формирования сигнала аварийного прекращения опыта короткого замыкания недостаточно для обеспечения безопасности электродинамических испытаний силовых трансформаторов. Необходимо минимизировать интервал времени между моментом формирования ИИС аварийного сигнала и моментом аварийного прекращения опыта КЗ путем принудительного прерывания тока КЗ. Только в этом случае можно предотвратить аварийное разрушение обмоток испытуемого силового трансформатора и тем самым повысить безопасность электродинамических испытаний.

Коммутационные аппараты с традиционной контактной системой, например воздушные и элегазовые выключатели, характеризуются временем выключения 0,04, 0,08 с. Соответственно и опыт КЗ может быть прерван по аварийному сигналу не ранее, чем через 2, 4 периода сетевого напряжения после возникновения аварийного процесса [9].

Коммутационные аппараты на базе силовых тиристоров с электрическим и прямым световым управлением теоретически способны прервать опыт КЗ через интервал времени не более 10 мс после возникновения аварийного процесса [10–12]. Однако это возможно только в том случае, если ток КЗ не содержит апериодической 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.

Таким образом, актуальной является задача быстрого аварийного прекращения опыта КЗ, решение которой позволяет обеспечить безопасность электродинамических испытаний за счет уменьшения масштаба повреждений обмоток испытуемого силового трансформатора. В статье показана возможность решения указанной задачи с помощью высоковольтного сильноточного полупроводникового ключа (ВСПК) на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов – запираемых тиристоров или биполярных транзисторов с изолированным затвором.

Аварийное прерывание опыта короткого замыкания с помощью высоковольтного тиристорного ключа. На рис. 1 показана упрощенная схема электродинамических испытаний

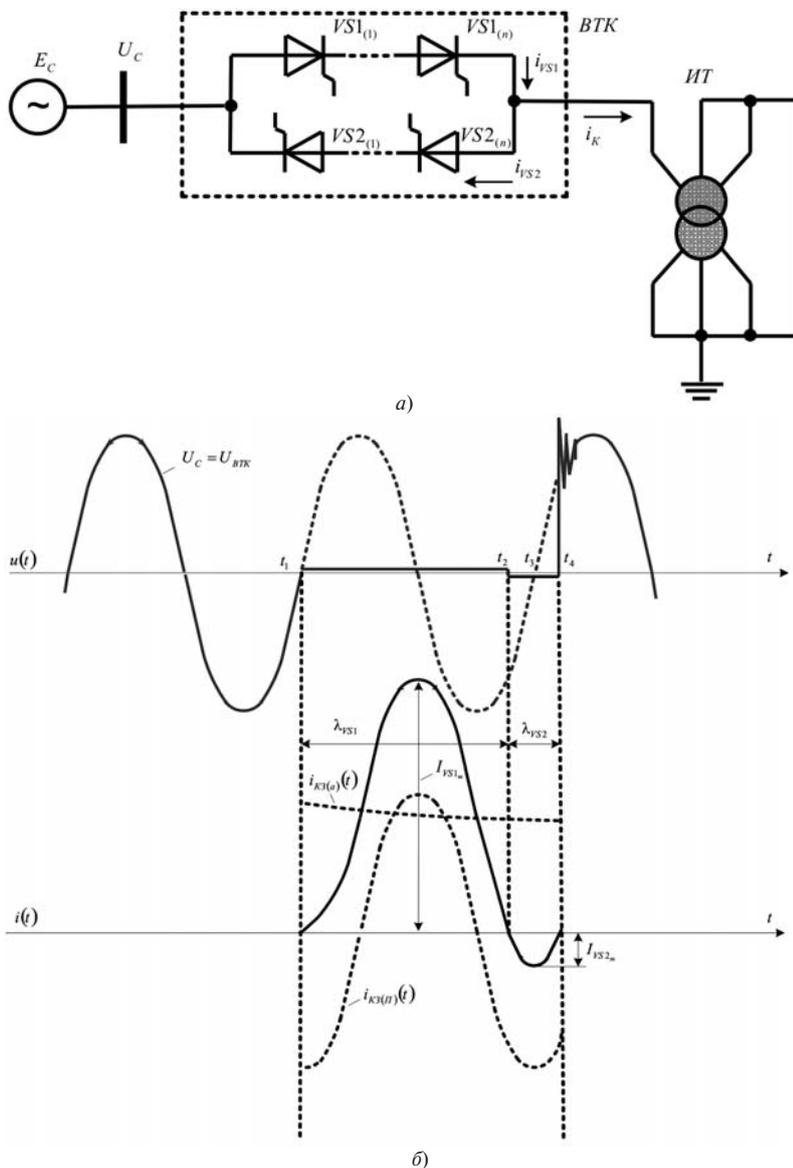


Рис. 1. Упрощенная схема электродинамических испытаний (а) и временные диаграммы напряжений и токов опыта КЗ (б)

силового трансформатора ИТ в двухобмоточном режиме при искусственном закорачивании выводов на стороне низкого напряжения (а) и временные диаграммы напряжения и тока в опыте КЗ с воздействием максимальной по величине апериодической составляющей (б). До момента времени t_1 напряжение U_c шин испытательного стенда приложено к силовым тиристорам $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ и $VS2_{(1)}, \dots, VS2_{(n)}$ высоковольтного тиристорного ключа (ВТК). В момент времени t_1 , когда на силовых тиристорах $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ появляется положительное напряжение, начинается опыт КЗ с углом первоначального включения ВТК, равным нулю. Через ВТК протекает ток КЗ, содержащий периодическую $i_{КЗп}(t)$ и апериодическую $i_{КЗа}(t)$ (см. рис. 1, б) составляющие

$$i_{КЗ}(t) = I_{км} [e^{-t/\tau} - \cos \omega t], \quad (1)$$

где $I_{км} = \sqrt{2} E_c / Z_S$ – амплитуда установившегося тока КЗ на стороне высокого напряжения испытуемого силового трансформатора; E_c – действующее значение фазной ЭДС электрической сети, питающей испытательные сети; $Z_S = \sqrt{(x_c + x_T)^2 + r_T^2}$ – модуль полного сопротивления контура КЗ; x_c – эквивалентное индуктивное сопро-

тивление электрической сети, питающей испытательный стенд; x_T, r_T – индуктивная и активная составляющие сопротивления КЗ испытуемого силового трансформатора; $t = (x_c + x_T) / \omega r_T$ – постоянная времени контура КЗ; ω – угловая частота сетевого напряжения.

В первый период опыта КЗ обмотки испытуемого силового трансформатора ИТ и силовые тиристоры $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ подвергаются воздействию ударного тока с амплитудой

$$I_{VS1}^{(1)} = I_{km}(1 + e^{-1/2t^*}), \quad (2)$$

где $t^* = t/T$; T – период сетевого напряжения.

Продолжительность интервала $(t_1 - t_2)$ проводимости силовых тиристоров $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ и соответственно ударного тока КЗ составит

$$l_{VS1} = 2\rho - \arccos(e^{-1/t^*}). \quad (3)$$

В момент времени t_2 включаются силовые тиристоры $VS2_{(1)}, \dots, VS2_{(n)}$, через которые будет протекать ток КЗ с амплитудой

$$I_{VS2m} = I_{km}(1 - e^{-1/t^*}) \quad (4)$$

и продолжительностью

$$l_{VS2} = 2\arccos(e^{-1/t^*}). \quad (5)$$

Например, при $t^* = 9$ амплитуды положительной (2) и отрицательной (4) полуволн тока КЗ равны $I_{VS1m} = 1,95I_{km}$ и $I_{VS2m} = 0,11I_{km}$. Интервалы проводимости (3) силовых тиристоров $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ и (5) силовых тиристоров $VS2_{(1)}, \dots, VS2_{(n)}$ составят $l_{VS1} \gg 333,5$ и $l_{VS2} \gg 53$ эл. град. соответственно.

При возникновении на интервале $(t_1 - t_2)$ ударного тока КЗ аварийных процессов в обмотках испытуемого силового трансформатора электродинамические испытания можно прервать либо в момент времени t_2 либо в момент t_4 .

В первом случае к силовым тиристорам $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ до момента времени t_3 будет приложено обратное напряжение, а с момента времени t_3 силовые тиристоры $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ должны выдерживать приложение прямого напряжения. Для этого необходимо, чтобы время выключения t_q силовых тиристоров $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ удовлетворяло условию

$$t_q < \frac{2\rho - l_{VS1}}{\omega} \frac{\dot{\varphi}}{\ddot{\varphi}} \frac{\dot{t}_{rr}}{\ddot{t}_{rr}} \quad (6)$$

при апериодической форме восстанавливающегося напряжения или условию

$$t_q < 1/f_{вст} \quad (7)$$

при колебательной форме восстанавливающегося напряжения. (Здесь t_{rr} – время обратного восстановления силовых тиристоров; $f_{вст}$ – частота восстанавливающегося напряжения.)

Нарушение условий (6) или (7) приведет к неконтролируемому (без подачи управляющих импульсов) включению ВТК в момент времени и последующему необратимому пробоем всех силовых тиристоров $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$.

Во втором случае к силовым тиристорам $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ на интервале $(t_2 - t_4)$ приложено обратное напряжение, равное падению напряжения на силовых тиристорах $VS2_{(1)}, \dots, VS2_{(n)}$. Значение обратного напряжения на силовом тиристоре $VS1_{(i)}$, равное падению напряжения на силовом тиристоре $VS2_{(i)}$, не превысит 1, 2 В. Таким образом, восстановление запирающих свойств силовых тиристоров $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$ будет происходить практически без приложения обратного напряжения. В результате время выключения увеличивается в 1,5, 2 раза и должно удовлетворять условию

$$t_q < \frac{l_{VS2}}{(1,5, 2,0)\omega}, \quad (8)$$

нарушение которого также приведет к неконтролируемому включению силовых тиристоров $VS1_{(1)}, \dots, VS1_{(n)}$.

Выполнение условий (6)–(8) зависит от параметров испытуемого трансформатора (x_T, r_T), параметров демфирующих цепей ВТК (на рис. 1, а не показаны), характеристик выключения (t_q, t_{rr}) силовых тиристоров. Следует добавить, что время выключения мощных низкочастотных тиристоров, которые могут использоваться в составе ВТК, достигает значений 600, 800 мкс, вполне соизмеримых с временными интервалами $(t_2 - t_3)$ и $(t_2 - t_4)$, показанных на рис. 1. Если условия (6)–(8) не выполняются, то с помощью (1) необходимо определить число периодов, по истечении которых возможно безопасное для ВТК прерывание опыта КЗ. Соответственно определяется и то минимальное число периодов опыта КЗ, в течение которых обмотки силового трансформатора даже при наличии аварийных деформаций будут подвергаться электродинамическим воздействиям. Это не позволяет в полной мере обеспечить безопасное проведение электродинамических испытаний.

Схема безопасного проведения электродинамических испытаний. На рис. 2 представлена упрощенная структурная схема, позволяющая обеспечить безопасность проведения опытов КЗ испытуемого силового трансформатора ИТ путем быстрого прерывания тока КЗ с помощью высоковольтного высоко-точного полупроводникового ключа (ВСПК).

Шкаф управления (ШУ) по сигналу «Пуск» формирует серию управляющих импульсов, которые по световодам передаются на потенциал ВСПК. Число управляющих импульсов определяют число положительных i_{S1} и отрицательных i_{S2} полупериодов тока I_K в опыте КЗ, а начальная фаза первого управляющего импульса относительного сетевого напряжения определит значение аperiodической составляющей тока КЗ. По сигналу «Стоп» серия управляющих импульсов прекращается, завершая опыт КЗ. Сигналы трансформаторов напряжения TU и тока TA обеспечивают синхронизацию соответственно моментов включения и выключения ВСПК. При этом нормальное завершение опыта КЗ предусматривает выключение ВСПК только в момент перехода I_K через нулевое значение.

Информационно-измерительная система (ИИС) обрабатывает диагностические сигналы, получаемые от первичных измерительных преобразователей (на рис. 2 не показаны), контролирующих текущее состояние ИТ во время опыта КЗ, например, среднее за период значение индуктивности КЗ. В случае опасного отклонения контролируемого параметра от первоначального значения ИИС формируется сигнал «Защита», который передается в ШУ. Последний формирует сигнал записи силовых полупроводниковых приборов ВСПК независимо от текущего значения тока КЗ, осуществляя аварийное прекращение опыта КЗ [13–15].

Необходимо иметь в виду, что аварийное прекращение опыта КЗ, не синхронизированное с моментом перехода тока через нулевое значение, будет сопровождаться опасными перенапряжениями как на обмотке высокого напряжения (А-Х) ИТ, так и на выводах ВСПК. Кратность перенапряжений будет определяться значением энергии, накопленной к моменту выключения ВСПК в магнитном поле индуктивности КЗ ИТ, индуктивностях токопроводов между шинами U_C испытательного стенда и выводом «1» ВСПК, между выводом «2» ВСПК и выводом «А» обмотки высокого напряжения ИТ. Для поглощения энергии магнитного поля и уменьшения уровня перенапряжений при аварийном прерывании опыта КЗ в схеме испытательного стенда используются ограничители перенапряжений $FV1, \dots, FV3$.

Ограничитель $FV3$ поглощает энергию магнитного поля индуктивности КЗ ИТ и защищает от перенапряжения обмотку высокого напряжения А-Х. Ограничитель $FV2$ поглощает энергию магнитного поля токопровода между выводом «2» ВСПК и выводом «А» ИТ и фиксирует потенциал вывода 2 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.

Наиболее тяжелым воздействиям при аварийном прерывании опыта КЗ подвергается ограничитель перенапряжений $FV3$, поскольку индуктивность короткого замыкания ИТ многократно превышает индуктивность ошиновки испытательного стенда. Наиболее неблагоприятным для аварийного прерывания опыта короткого замыкания с аperiodической составляющей является момент максимума ударного тока на первом полупериоде (см рис. 1), определяемый выражением (2).

В этом случае варисторы ограничителя перенапряжений $FV3$ после аварийного выключения ВСПК должны поглотить энергию, значение которой равно

$$W_{уд} = \frac{L_K (I_{VSm}^{(1)})^2}{2} = \frac{u_{K\%}}{100} K_{уд}^2 \frac{I_K}{I_{НОМ}} \frac{\ddot{\phi}^2}{\dot{\phi}} \frac{S_{НОМ}}{3W}, \quad (9)$$

где $S_{НОМ}$, $I_{НОМ}$ – номинальные мощность и ток испытуемого трансформатора; L_K , $u_{K\%}$ – индуктивность и напряжение КЗ испытуемого трансформатора; $K_{уд}$ – ударный коэффициент, значение которого для мощных трансформаторов может достигать значений 1,8, 1,95.

Учитывая, что кратность установившегося тока КЗ равна [11]:

$$I_K^* = \frac{I_K}{I_{НОМ}} \frac{\ddot{\phi}}{\dot{\phi}} = \frac{1}{\frac{u_{K\%}}{100} + S_{НОМ}/S_C} = \frac{1}{1/S_C^* + u_{K\%}/100},$$

и принимая в качестве базисного значения энергию

$$W_6 = (S_{НОМ} T),$$

выражение (9) можно преобразовать к виду, позволяющему определять значение ударной энергии по паспортным данным испытуемого силового трансформатора:

$$W_{уд}^* = \frac{W_{уд}}{W_6} = \frac{K_{уд}^2}{6p} \frac{(u_{K\%}/100)}{[1/S_C^* + u_{K\%}/100]^2}, \quad (10)$$

где $S_C^* = S_C / S_{НОМ}$; S_C – мощность КЗ питающей сети на шинах испытательного стенда.

Продолжительность процесса поглощения энергии испытуемого трансформатора ИТ при аварийном прекращении опыта КЗ можно оценить полагая, что остающееся напряжение $U_{ост}$ ограничителя перенапряжения $FV3$ сохраняется неизменным

$$Dt \gg \frac{L_K I_{уд \max}}{U_{ост}} = \frac{x_K I_{уд \max}}{k_3 W_{НОМ}},$$

где L_K – индуктивность КЗ испытуемого трансформатора; $k_3 = 1,6, 1,8$ – защитный показатель не-

линейного ограничителя перенапряжений; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение обмотки высокого напряжения испытуемого трансформатора.

Для количественных оценок гораздо удобней использовать относительную продолжительность рассматриваемого интервала:

$$Dt^* = \frac{Dt}{T} = \frac{1}{\rho\sqrt{6}} \frac{k_{\text{уд}}}{k_3} \frac{(u_{\text{к\%}}/100)}{[(u_{\text{к\%}}/100) + (1/S_c^*)]}, \quad (11)$$

которую легко определить по паспортным данным испытуемого трансформатора. Например, при аварийном прерывании опыта КЗ силового трансформатора с номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 63 \text{ МВА}$ относительные значения ударной энергии и продолжительности процесса поглощения накопленной энергии составят $W_{\text{уд}}^* \gg 1,375$, $Dt^* \gg 0,13$ (в имевшихся единицах $W_{\text{уд}} \gg 1732,5 \text{ кДж}$, $Dt \gg 2,6 \text{ мс}$ соответственно).

Выражения (2), (10) и (11) позволяют определить уровень электрических воздействий на ограничитель перенапряжений $FV3$ в случае аварийного прекращения опыта КЗ. При необходимости увеличения пропускной способности ограничителя перенапряжений $FV3$ должны использоваться параллельные колонки варисторов или параллельное соединение нескольких защитных аппаратов. Аналогичным образом, используя результаты измерения индуктивности ошиновки испытательного стенда и ВСПК, можно оценить требования к пропускной способности ограничителей перенапряжений $FV1$ и $FV2$.

Выводы. 1. Безопасность электродинамических испытаний силовых трансформаторов обеспечивается принудительным прекращением опыта короткого замыкания сразу после формирования сигнала аварийного состояния обмотки испытуемого силового трансформатора при произвольном значении тока короткого замыкания и может быть практически реализована только с помощью ВСПК на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах – IGBT или IGBT.

2. Высоковольтный тиристорный ключ не способен обеспечить аварийное прекращение электродинамических испытаний на первом периоде опыта короткого замыкания с апериодической составляющей тока, когда максимальна вероятность развития аварийных процессов в обмотках из-за воздействия ударного тока, поскольку для низкочастотных силовых тиристорных из-за асимметрии интервалов проводимости недостаточно времени приложения обратного напряжения для восстановления запирающих свойств.

3. Аварийное прекращение (за несколько микросекунд) опыта короткого замыкания возможно,

если обеспечено полное поглощение энергии, накопленной в магнитном поле индуктивностей короткого замыкания и ошиновки испытательного стенда, например, с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений, установленных на выводах как ВСПК, так и обмотки высокого напряжения испытуемого трансформатора.

4. Наиболее тяжелым воздействиям подвергается нелинейный ограничитель перенапряжений, установленный на выводе обмотки высокого напряжения испытуемого трансформатора, поскольку в случае прекращения опыта короткого замыкания в момент протекания ударного тока должен поглотить всю энергию магнитного поля, накопленную в индуктивности короткого замыкания испытуемого трансформатора.

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. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А. Электродинамические испытания силовых трансформаторов на стойкость к токам короткого замыкания на Федеральном испытательном центре. – Сб. докладов международной научно-технической конференции «Инновационные решения и современные технологии эксплуатации трансформаторного оборудования высокого напряжения», ПЭИПК, С. Петербург, октябрь 2013, с. 13–17.
5. 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.
6. Хренников А.Ю., Шлегель О.А. Контроль изменения индуктивного сопротивления трансформаторов для определения повреждений в обмотках. – Энергетик, 2004, № 2, с. 27–30.
7. Хренников А.Ю. Информационно-измерительные системы контроля и защиты обмоток силовых трансформаторов и реакторов. – Научный вестник НГТУ, Новосибирск, 2006, № 1 (22), с. 123–130.
8. Хренников А.Ю., Гольдштейн В.Г. Техническая диагностика, повреждаемость и ресурсы силовых и измерительных трансформаторов и реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 2007, 286 с.
9. 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.
10. Кувшинов А.А., Хренников А.Ю. Высоковольтный тиристорный вентиль для электродинамических испытаний силовых трансформаторов. – ЭЛЕКТРО, 2014, № 2, с. 42–46.
11. 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.
12. 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.

13. Патент РФ № 2041472. Устройство для испытания трансформатора токами короткого замыкания/А.Ю. Хренников, А.И. Лурье, О.А. Шлегель. — БИ, 1995, № 22.

14. Патент РФ № 2136099. Устройство контроля и защиты обмоток трансформаторов от деформации при коротких замыканиях/А.Ю. Хренников. — БИ, 1999, № 24.

15. Патент РФ № 2063050. Устройство контроля и защиты трансформаторов от деформации обмоток при коротких замыканиях в процессе эксплуатации/А.И. Лурье, А.И. Шлегель, А.Ю. Хренников. — БИ, 1996, № 18.

[08.06.15]

А в т о р ы : **Кувшинов Алексей Алексеевич** окончил электротехнический факультет Тольяттинского политехнического института (ТПИ) в 1975 г. В 2004 г.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 11, pp. 26–32.

Security Technology of Electrodynamical Testing 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 criterion of safety of electrodynamic tests is proposed. It consists in the forced curtailment of short-circuit test immediately after shaping of the signal of the emergency state of the windings of the tested power transformer. It is shown that the practical realization of the criterion proposed is possible only with the use of a high-voltage power current semiconductor key (HVSPK) on the completely controlled power semiconductor devices. It is examined the circuit of Short-circuit Power Laboratory with surge protection both the tested power transformer and HVSPK during the emergency interruption of short-circuit current. Definite requirements for the capacity and spacing ability of the overvoltage limiters.

Key words: power transformer, electrodynamic tests, high-voltage semiconductor key

REFERENCES

1. Khrennikov A.Yu. *Promyshlennaya energetika — in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2008, No. 9, 12–16.

2. Khrennikov A.Yu., Mazhurin R.V. *Novosti Elektrotehniki — in Russ. (News of Power Engineering)*, 2012, No. 3, pp. 5–11.

3. Khrennikov A.Yu., Mazhurin R.V. *ELEKTRO — in Russ. (ELECTRO)*, 2012, No. 5, pp. 41–46.

4. Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Innovatsionnye resheniya i sovremennye tekhnologii ekspluatatsii transformatornogo oborudovaniya vysokogo napryazheniya — in Russ. (Proc. of the Intern. Scientific and Technical Conf. «Innovative solutions and modern technologies operating the high-voltage transformer equipment»*. St. Petersburg. Petersburg Power Engineering Institute of Professional Development, Oktober 2013, pp. 13–17.

5. Dement'yev Yu., Smekalov V., Shakaryan Yu., Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A. *Novosti Elektrotehniki — in Russ. (News of Power Engineering)*, 2014, No. 1 (85), pp. 32–37.

6. Khrennikov A.Yu., Shlegel' O.A. *Energetik — in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2004, No. 2, pp. 27–30.

7. Khrennikov A.Yu. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — in Russ. (Scientific Collection the Novosibirsk State Technical University)*, 2006, No. 1 (22), pp. 123–130.

8. Khrennikov A.Yu., Gol'dstein V.G. *Tekhnicheskaya diagnostika, povrezhdayemost' i resursy silovyykh i izmeritel'nykh*

zaщitil doktorskuyu dissertatsiyu «Logiko-algebrayicheskoye modelirovaniye i sintez intellektual'nykh sistem elektrorpitaniya elektronnykh i vychislitel'nykh sredstv v elementnom bazyse universal'nykh i silovyykh relyatorov». Professor kafedry «Elektrosnabzheniye i elektrotehnika» Tolyat'tinskogo gosudarstvennogo universiteta.

Хренников Александр Юрьевич окончил в 1986 г. электротехнический факультет ТПИ. В 2009 г. защитил докторскую диссертацию «Комплексное диагностическое моделирование параметров технического состояния силового трансформаторно-реакторного электрооборудования». Профессор Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт».

transformatorov i reaktorov (Technical diagnostics, damageability, and lifetimes of power and instrument transformers and reactors). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 2007, 286 p.

9. Portales E., Filion Y., Mercier A. Transformer-controlled switching taking into account residual flux-modelling transformers for realistic results in system studies. — RECIFE 2011, 68. p.

10. Kuvshinov A.A., Khrennikov A.Yu. *ELEKTRO — in Russ. (ELECTRO)*, 2014, No. 2, pp. 42–46.

11. Kuvshinov A.A., Khrennikov A.Yu. *Promyshlennaya energetika — in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2014, No. 9, pp. 10–15.

12. Kuvshinov A.A., Khrennikov A.Yu. *Promyshlennaya energetika — in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2015, No. 2, pp. 12–17.

13. Патент РФ № 2041472. *Ustroistvo dlya ispytaniya transformatora tokami korotkogo zamykaniya (A device for testing a transformer with short-circuit currents)*/A.Yu. Khrennikov, A.I. Lur'ye, O.A. Shlegel'. Bulletin of inventions, 1995, No. 22.

14. Патент РФ № 2136099. *Ustroistvo kontrolya i zashchity obmotok transformatorov ot deformatsii pri korotkikh zamykaniyakh (A device for monitoring and protecting transformer windings from deformation during short-circuit faults)*/A.Yu. Khrennikov. Bulletin of inventions, 1999, No. 24.

15. Патент РФ № 2063050. *Ustroistvo kontrolya i zashchity transformatorov ot deformatsii obmotok pri korotkikh zamykaniyakh v protsesse ekspluatatsii (A device for monitoring and protecting transformer windings from deformation during short-circuit faults in the course of operation)*/ A.I. Lur'ye, A.I. Shlegel', A.Yu. Khrennikov. Bulletin of inventions, 1996, No. 18.

