

## ТРЕБОВАНИЯ К ИСПЫТАНИЯМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ СЕДОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 330 кВ И ВЫШЕ В НОРМАХ СССР, США, КАНАДЫ И МЭК

В. В. ГУРИН, А. К. ЛОХАНИН, В. В. СОКОЛОВ, кандидаты техн. наук,  
Л. Л. ГЛАЗУНОВА, инж.

В настоящее время в эксплуатации находится около 2,5 тыс. единиц мощных (63—1250 МВ·А) трансформаторов 330—1150 кВ, разработанных и изготовленных отечественной электротехнической промышленностью.

Первый отечественный стандарт на требования к электрической прочности изоляции электрооборудования [1] включал испытания изоляции силовых трансформаторов лишь переменным напряжением промышленной частоты в течение 1 мин (ОПЧ), хотя в предвоенные годы были проведены подготовительные работы по введению испытаний грозowymi импульсами [2]. В 1960 г. были введены испытания полным грозowym (ПГИ) и срезанным грозowym (СГИ) импульсами напряжения [3]. После освоения в 60—70-х годах измерений частичных разрядов (ЧР) и испытаний коммутационными импульсами (КИ) в стандарты [4, 5] были включены испытания длительным (в течение 30 мин и более) напряжением промышленной частоты (ДПЧ) и КИ. Все перечисленные испытания проводятся и на трансформаторах 1150 кВ [6].

При совпадении общих тенденций (поэтапное внедрение указанных видов испытаний, снижение испытательных напряжений) развитие отечественных норм и методов испытаний отличалось от практики других стран. Среди последних наибольший интерес представляют стандарты США и Канады, первыми, наряду с нашей страной, освоивших электропередачи 735—765 кВ и накопивших значительный (20 лет и более) опыт эксплуатации электрооборудования этого класса напряжения.

Учитывая намечаемые пересмотры стандартов СССР (ГОСТ) и международных (МЭК) и предоставление права самостоятельного выхода на внешний рынок ведущим трансформаторным заводам страны, в статье проведено сравнение требований к электрической прочности изоляции, дан анализ опыта эксплуатации отечественных и зарубежных силовых трансформаторов и разработана на основе этого предложения по сближению требований ГОСТ и МЭК. Опыт применения стандартов [7, 8] показывает, что существенные отличия национальных и международных норм будут сохраняться и в будущем. В статье анализируются требования к электрической прочности и некоторые особенности высоковольтных испытаний силовых трансформаторов 330 кВ и выше, регламентированных в действующих стандартах СССР, США, Канады и МЭК.

**Общие требования стандартов.** На изоляцию трансформаторов в эксплуатации воздействует рабочее напряжение (РН), квазистационарные (КСП), коммутационные (КП) и грозовые [ГП] перенапряжения [9].

В МЭК согласно методу 1 [8] для силовых трансформаторов с наибольшим рабочим напряжением  $U_{\max} \leq 420$  кВ стойкость изоляции по отношению к РН, КСП и КП проверяют испытаниями ОПЧ, а стойкость по отношению к ГП — испытаниями ПГИ. Каждому значению  $U_{\max}$  в [8] соответствуют два-три нормированных выдерживаемых значения ПГИ, а каждому из значений ПГИ — одно выдерживаемое значение ОПЧ.

Для трансформаторов с наибольшими рабочими напряжениями 300 кВ и выше согласно [10] по методу 2 [8] стойкость изоляции по отношению РН и КСП проверяется испытанием ДН, по отношению к КП — испытаниями КИ, по отношению к ГП — испытаниями ПГИ. В этом диапазоне наибольших рабочих напряжений  $U_{\max}$  определяющими считаются КП [10]. В [8] каждому значению  $U_{\max}$  соответствуют два нормированных выдерживаемых значения КИ, а каждому из значений КИ — два-три значения ПГИ. Испытание ОПЧ при этом не применяется, а относительные значения ДПЧ

одинаковы для всех  $U_{\max}$ .

В стандартах СССР [4—6] для каждого класса напряжения 220 кВ и выше принято по одному значению ОПЧ, ПГИ, СГИ, КИ (КИ не применяются для класса напряжения 220 кВ) и ДПЧ.

В стандарте США [11] уровни изоляции традиционно, как и в МЭК, определяет испытательное напряжение полного грозового импульса (ВІЛ), представляющее собой выдерживаемое значение ПГИ. Для каждого наибольшего рабочего напряжения, начиная от 115 кВ и выше, для ряда трансформаторов можно применять одно из трех-четырёх значений ВІЛ; каждому значению ВІЛ соответствует по одному значению СГИ и КИ. Испытание ОПЧ не проводится отдельно, а входит составной частью в испытание ДПЧ (так называемое испытание индуктированным напряжением). Относительные значения ОПЧ и ДПЧ одинаковы для всех уровней напряжений.

Требования к электрической прочности изоляции в стандартах Канады [12, 13] аналогичны нормам США [11]; отличие заключается лишь в иной ранжировке уровней изоляции в зависимости от наибольшего рабочего напряжения (ряд А включает в себя  $U_{\max}$  от 5 до 300 кВ, ряд В — от 362 до 765 кВ), в ряду В каждому  $U_{\max}$  соответствуют два - три значения ВІЛ.

Для сравнения за базу принималось наибольшее рабочее напряжение ( $U_{\max}$ ). При этом относительные уровни изоляции при разных видах испытаний определены как:

$$K_{\text{ОПЧ}}(K_{\text{ДПЧ}}, K_{\text{СГИ}}, K_{\text{КИ}}) = \frac{U_{\text{исп}}}{U_{\max} / \sqrt{3}},$$

где  $U_{\text{исп}}$  - нормированное испытательное напряжение ОПЧ, ДПЧ;  $U_{\text{ПГИ}}, U_{\text{СГИ}}, U_{\text{КИ}}$  - то же, деленное на  $\sqrt{2}$ .

Рассчитанные по значениям испытательных и наибольших рабочих напряжений, принятым в рассматриваемых стандартах [4 - 6, 8, 11 - 13], относительные уровни изоляции  $K = f(U_{\max})$  для наибольших рабочих напряжений от 242 до 1200 кВ приведены на рис. 1 - 3 и далее анализируются для каждого вида испытаний.

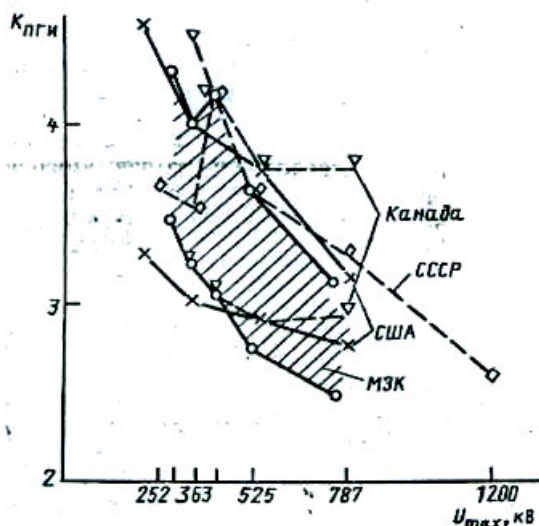


Рис 1. Сравнение испытательных напряжений полного грозового импульса по действующим нормам СССР ( $\diamond$ ), США ( $\times$ ), Канады ( $\nabla$ ) и МЭК ( $\circ$ ). Заштрихована зона разброса значений по МЭК

**Испытание полным грозовым импульсом** в СССР применяется как типовое для трансформаторов всех классов напряжения и как приемосдаточное для трансформаторов 750 – 1150 кВ и блочных трансформаторов для АЭС. По стандартам США [11] и Канады [13] для трансформаторов 115 – 765 кВ испытание ПГИ проводится совместно с испытанием СГИ в качестве приемосдаточного, а для трансформаторов 72,5 кВ и ниже – в качестве типового.

Согласно МЭК [8] как по методу 1, так и по методу 2 испытание ПГИ является приемосдаточным, а для трансформаторов с  $U_{\max} < 300\text{кВ}$  - типовым. Испытание СГИ специальное, проводимое по согласованию между изготовителем и потребителем.

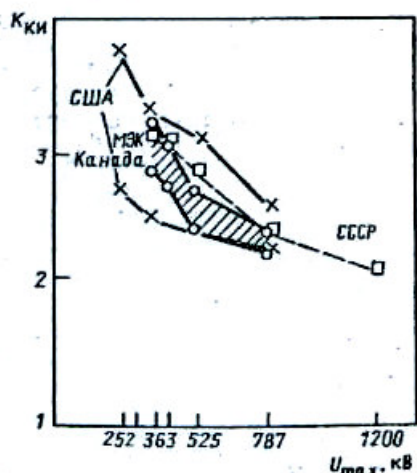


Рис. 2. Сравнение испытательных напряжений коммутационного импульса по действующим нормам СССР (◇), США (x), Канады (▽) и МЭК (o)

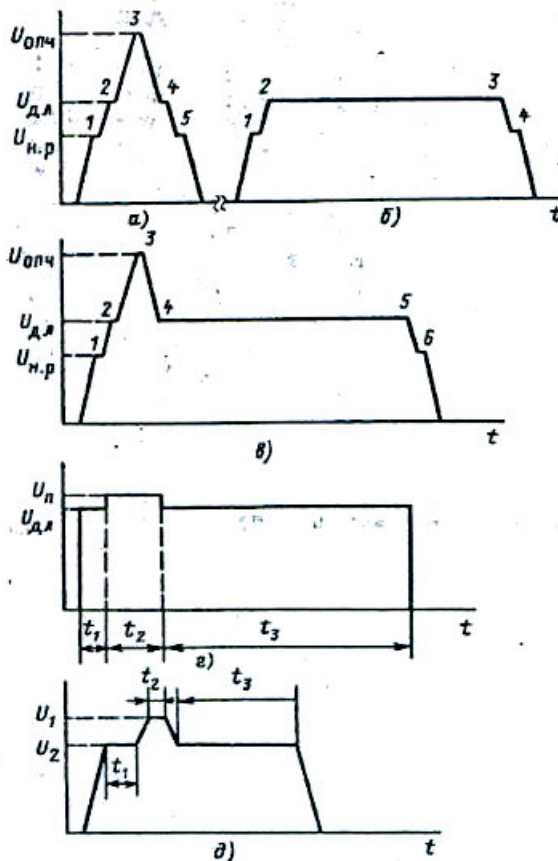


Рис. 3. График испытаний изоляции трансформаторов переменным напряжением: а – в – по ГОСТ [28]; г – по ANSI [11] и CSA [13]; д – по МЭК [8].

Во всех нормах стандартизован импульс 1,2/50 мкс отрицательной полярности. Количество импульсов ПГИ 100%-й амплитуды по стандартам [4-6, 8] — три, по [13, 14] — один. В случае порчи осциллограмм ГОСТ [15] допускает приложение двух дополнительных импульсов. В стандартах США [11, 14, 16] и Канады [13] нет указания по этому вопросу. Стандарт МЭК [8] разрешает прикладывать еще один импульс, если в схеме или на искровом промежутке ввода произойдет разряд или будет испорчена осциллограмма. Кроме того, в [8]

рекомендуется повторить импульсное испытание (три новых импульса ПГИ 100%-й амплитуды), если имеются сомнения в расшифровке возможных расхождений между осциллограммами.

В стандартах СССР [15, 17, 18], США [14, 16, 20], Канады [13] и МЭК [21] имеются отличия в методике проведения испытаний грозowymi импульсами (значения пониженного импульса; способы обнаружения повреждений, включая количество осциллограмм; длительность разверток и др.), рассмотрение которых выходит за рамки статьи.

Опыт испытания ПГИ показывает, что в качестве прямо-сдаточного это испытание может быть наиболее эффективным при выявлении дефектов продольной изоляции. Однако при частичном повреждении главной изоляции требуется повышение чувствительности метода детекции.

На рис. 1 приведены уровни изоляции ПГИ (в отношении к  $U_{\max} / \sqrt{3}$ ), принятые в стандартах разных стран.

**Испытание срезанным грозowym импульсом.** Стандартный срезанный грозовой импульс представляет собой полный грозовой импульс, срезанный при предразрядном времени 2—3 мкс по ГОСТ [18], не менее 3 мкс по ANSI и CSA [U, 13] и 2-6 мкс по МЭК [8]. ГОСТ, кроме того, допускает применение импульса, срезанного на фронте шаровым разрядником (при 0,75—0,9 амплитуды несрезанного импульса с увеличенной длительностью фронта).

Имеются также существенные различия между ГОСТ и ANSI, CSA и МЭК в схемах испытаний и значении коэффициента перехода через нуль  $K_0$  (отношение максимального значения первого, полупериода колебаний после среза к максимальному значению СГИ). В [8; 14] рекомендуется располагать срезающее устройство (управляемый разрядник или простой стержневой разрядник) так, чтобы коэффициент  $K_0$  не превышал 0,3. В случае превышения этого значения включается дополнительное (демпфирующее) сопротивление. Однако, в более поздних документах АЕР [22] значение  $K_0$  увеличено до 0,4. В ГОСТ [15] сохраняется традиционно сложившаяся детальная регламентация так называемой петли среза. Параметры петли среза (расстояние между разрядником и объектом испытания, высота подвесок провода над ними) разбиты на пять групп в зависимости от класса напряжения испытываемой обмотки. В [15] допускается включением демпфирующего сопротивления снижать  $K_0$  до 0,6 для трансформаторов до 330 кВ включительно и до 0,3 для трансформаторов 500 кВ и выше.

Испытание СГИ в СНГ является типовым. Амплитуда СГИ на 6 – 10 % выше амплитуды ПГИ (табл. 1). Количество прикладываемых импульсов 100 %-й амплитуды — три. Согласно [15] это испытание, как правило, должно проводиться после испытаний ПГИ. Однако, на ЗТЗ (г. Запорожье) имеется многолетний положительный опыт проведения испытаний СГИ до испытаний ПГИ, что помогло в отдельных случаях избежать неправильной отбраковки трансформаторов [23].

Таблица 1

#### Отношение амплитуд СГИ к ПГИ

Страна, стандарт	$U_{\max}, кВ$			
	363	525	787	1200
СССР, [4 – 6]	1,1	1,06	1,7	1,1
США, [11] Канада, [13]	1,1			
МЭК, [8]	1,0			

По ANSI [11] и CSA [13] испытание СГИ является прямо-сдаточным. Принята

следующая последовательность подачи импульсов: ПГИ пониженной амплитуды, два СГИ 100%-й амплитуды, один ПГИ 100%-й амплитуды. Промежуток времени между приложениями второго СГИ и ПГИ должен быть минимальным. Кроме того, в [11] сохранена американская практика испытания фронтом волны ("front-of-wave") — импульсом, срезанным на фронте с предразрядным временем 0,5—1 мкс и амплитудой, несколько большей амплитуды СГИ — в качестве специального испытания. Амплитуда этого импульса в [11] не нормирована, а устанавливается по соглашению между потребителем и изготовителем. Если, это испытание проводится, то два импульса фронта волны прикладываются перед первым импульсом СГИ. Отметим, что в документе АЕР [22] это испытание не нормировано.

По МЭК [8] испытание СГИ относится к специальным, амплитуда СГИ равна амплитуде ПГИ, последовательность подачи импульсов регламентирована: один ПГИ пониженной амплитуды — один ПГИ 100 %-й амплитуды — один или более СГИ пониженной амплитуды — два СГИ 100 %-й амплитуды — два ПГИ 100 %-й амплитуды.

В настоящее время в разных странах нет единой точки зрения на необходимость испытания СГИ (мнения экспертов [7] в оценке этого испытания диаметрально различны). Это испытание по ГОСТ в большинстве случаев является более жестким, чем по ANSI и МЭК, как правило; СГИ имеет большее значение  $K_0$  и большее количество импульсов 100 %-й амплитуды. Учитывая положительный опыт эксплуатации трансформаторов, испытанных СГИ, а также распространение в энергосистемах элегазового оборудования (КРУЭ), пробой которого приводит к воздействию на изоляцию трансформатора волн с крутым фронтом, нет оснований отказываться в ГОСТ от испытания СГИ, которое должно оставаться типовым.

Вместе с тем, опыт испытаний СГИ, в том числе более 20 трансформаторов по методике МЭК, показывает целесообразность рассмотрения вопроса о разрешении уменьшения амплитуды СГИ до уровня ПГИ. За последние годы в практике ЗТЗ было три случая, когда из-за неправильной работы управляемого разрядника на трансформаторы подавались полные импульсы вместо срезанных. При этом два трансформатора (220 и 330 кВ) выдержали испытание, а один трансформатор 220 кВ был пробит и потребовались его разборка и ремонт. Представляется, что приравнивание амплитуд СГИ к ПГИ, позволит применять, последовательность импульсов по МЭК, на чем настаивает большинство зарубежных заказчиков, однако это потребует изменения условий грозозащиты. Целесообразно также внести в ГОСТ разрешение повторять испытания ПГИ и СГИ в случае расхождения между осциллограммами, как это принято в МЭК [8], увеличить значение предразрядного времени СГИ до 2 — 5 мкс, ввести допуск на значение  $K_0$  и исключить требование о деталях размера петли среза.

**Испытание коммутационным импульсом** в СССР [4—6] и Канаде [13] является типовым. В ANSI [11] оно отнесено к специальным. В МЭК по методу 1 оно не применяется, а по методу 2 является приемо-сдаточным, начиная с  $U_{\max} = 300\text{кВ}$  и выше [8].

В ГОСТ и МЭК [8, 15] стандартизован коммутационный импульс отрицательной полярности со временем подъема не менее 20 мкс, временем превышения 90 %-й амплитуды не менее 200 мкс, длительностью импульса не менее 500 мкс; количество импульсов 100 %-й амплитуды — три. Согласно ANSI [24] стандартным является импульс 250/2500, но допускается применение модифицированного импульса со временем подъема более 100 мкс, временем превышения 90 %-й амплитуды не менее 200 мкс, длительностью не менее 1000 мкс. Полярность может быть положительной или отрицательной, либо могут применяться обе полярности, количество импульсов 100 %-й амплитуды — два [14]. Стандарт Канады [13] ссылается в этой части на ANSI [14].

В случае сомнений в оценке осциллограмм, МЭК [8] разрешает не принимать во внимание результаты испытания и прикладывать один дополнительный импульс; в ГОСТ, ANSI и CSA такого разрешения нет. Для обнаружения повреждений по ГОСТ и МЭК [8, 20]

должны осциллографироваться приложенный импульс и ток в нейтрали, по ANSI [19] — только приложенный импульс. Дополнительно к [15] в практике ЗТЗ применяется высокоэффективный метод измерения ЧР [25].

Относительные уровни КИ для разных стран, приведены на рис. 2. Учитывая, что применяемая в СССР техника испытаний обеспечивает получение импульса, близкого к импульсу 250/2500 [25, 26], и что прикладывается большее, чем по ANSI количество импульсов, можно полагать [19, 27], что испытание КИ является несколько более жестким, чем по ANSI, CSA и МЭК, при равенстве значений испытательных напряжений.

**Испытания переменным напряжением.** Для трансформаторов 220—1150 кВ применяются оба вида испытаний переменным напряжением — ОПЧ и ДПЧ [4 – 6]. Испытание ДПЧ проводится после испытания ОПЧ, либо отдельно (рис. 3, а, б), либо совместно (рис. 3, в) с этим испытанием. Значение ОПЧ (точки 3 на рис. 3, а, в) составляет от  $1,59$  до  $2,23 U_{\max} / \sqrt{3}$ , а значение ДПЧ -  $(1,3—1,5) U_{\max} / \sqrt{3}$ . Длительность ДПЧ (точки 2, 3 на рис. 3, б и точки 4, 5 на рис. 3, в) должна быть не менее 1 ч при типовых испытаниях трансформаторов всех классов напряжений и при приемо-сдаточных испытаниях трансформаторов 750—1150 кВ, а при приемо-сдаточных испытаниях трансформаторов 220-500 кВ - от 0,5 до 1ч. С 01.01.1982 г. в стандарты [4, 5] введены изменения, позволяющие проводить испытания изоляции большинства автотрансформаторов (с заземлением нейтрали) по графику рис. 3, в, что обеспечило возможность сравнения характера ЧР непосредственно до и после приложения ОПЧ. Кроме того, в практике ЗТЗ развита техника испытаний (экранировка вводов, фильтрация испытательного напряжения), позволяющая измерять ЧР при воздействии ОПЧ (точка 3 на рис. 3, в), что обеспечило регистрацию частичных повреждений изоляции [28, 29].

В отличие от СССР при введении испытаний ДПЧ в США и Канаде были резко снижены (до значения  $U_n = U_{\max}$ ) значения ОПЧ. Согласно ANSI [11] и CSA [13] испытание индуктированным напряжением проводится по графику, показанному на рис. 3, г, где длительность  $t_2$  равна времени воздействия 7200 периодов испытательного напряжения,  $t_3$  равна 1 ч, значение  $U_{\text{дл}}$  равно  $1,5 \cdot U_{\max} / \sqrt{3}$  (в новых нормах АЕР [22] значение  $U_{\text{дл}}$  увеличено до  $U_{\max}$ , а значение  $U_n$  до  $1,9 U_{\max} / \sqrt{3}$ ).

Согласно методу 1 МЭК [8] значения ОПЧ, проводимого как приемо-сдаточное испытание при  $U_{\max} = 245, 300$  и  $362$  кВ, выше, чем значения ОПЧ, установленные ГОСТ (рис. 4), а испытание ДПЧ не применяется. Согласно методу 2 МЭК не применяется испытание ОПЧ, а испытание ДПЧ проводится по графику рис. 3, д с повышением напряжения до  $U_1 = U_{\max}$  длительностью 5 с ( $t_2$ ); при этом значение ДПЧ ( $U_2$  на рис. 3, д) составляет  $1,3 \cdot U_{\max} / \sqrt{3}$  или  $1,5 \cdot U_{\max} / \sqrt{3}$  длительностью  $t_3 = 30$  мин.

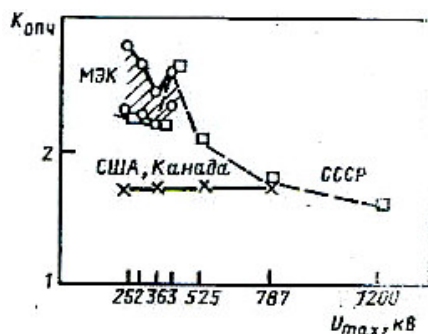


Рис 4. Сравнение испытательных одноминутных переменных напряжений по действующим нормам СССР (◇), США (x), Канады (∇) и МЭК (o). Заштрихована зона разброса значений по МЭК.

Основным критерием при оценке результатов испытаний ДПЧ во всех

рассматриваемые стандартах является интенсивность ЧР. Нормируемое допустимое значение равно  $3 \cdot 10^{-10}$  Кл по [4 — 6] 100 мкВ на частоте 1 МГц по ANSI [14] и CSA [13] (в США и Канаде сохраняется практика измерения ЧР в микровольтах, хотя в США существует проект стандарта на измерения ЧР в пикокулонах [30]), 300 пКл при  $1,3 \cdot U_{\max} / \sqrt{3}$  или 500 пКл при  $1,5 \cdot U_{\max} / \sqrt{3}$  по МЭК [8]. Во всех нормах простое превышение допустимой интенсивности ЧР не является основанием для немедленной браковки трансформатора, однако наиболее подробная процедура дальнейших действий, базирующаяся на большом опыте испытаний и эксплуатации трансформаторов с измеренными характеристиками ЧР [25, 31], регламентирована в [4, 5].

Испытание ОПЧ отечественных трансформаторов 330—500 кВ является значительно более жестким, чем по ANSI, CSA и методу 2 МЭК (рис. 4). Важно также, что благодаря измерению ЧР во многих случаях непосредственно при воздействии ОПЧ в СССР обеспечивается более достоверная оценка результатов испытаний, чем по ANSI, CSA и МЭК, где не требуется измерения ЧР.

Анализ приемо-сдаточных испытаний трансформаторов 330—750 кВ, изготовленных ЗТЗ в 1982—1990 гг., показывает достаточно высокое количество возвратов с испытаний. Относительное количество трансформаторов, не прошедших с первого раза испытания из-за каких-либо дефектов (в дальнейшем, после устранения дефектов, выдержавших испытания и успешно эксплуатируемых), составляет в процентах к годовому выпуску трансформаторов для каждого класса напряжения по всем видам испытания: 330 кВ - 1,8 %, 500 кВ - 2,8 %, 750 кВ - 4,6 %.

Анализ результатов испытаний показывает, что практически все дефекты, не выявленные во время испытаний ПГИ, выявляются при последующих испытаниях ОПЧ. Опыт изготовления и испытаний мощных трансформаторов приводит к выводу, что нет оснований для снижения ОПЧ и тем более для отказа от этого испытания (следует отметить, что при всех видах испытаний не было ни одного случая отбраковки из-за дефектов в изоляции между фазами).

Введение в 70-х годах испытания ДПЧ привело к появлению нового вида возврата с испытаний — из-за превышения допустимого уровня ЧР — составляющего около 15 % общего количества возвратов. Опыт измерения ЧР при ДПЧ на трансформаторах новых конструкций позволяет выявить ряд конструктивных дефектов (не выявленных при испытаниях ПГИ и ОПЧ), вследствие накопления газов и обнаружения их при ДПЧ (элементы с малым радиусом закругления, острые места на консоли, незаземленные стальные шпильки, ненадежные контакты и т. д.). Опыт испытаний показывает, что испытания ДПЧ с высокой чувствительностью выявляют также нарушения технологии изготовления или обработки изоляции.

Учитывая отечественный и зарубежный опыт эксплуатации трансформаторов, нет оснований для исключения испытаний ОПЧ из ГОСТ. Сближение с МЭК в части проведения испытаний ОПЧ и ДПЧ может идти по следующим направлениям:

включение в ГОСТ, аналогично МЭК [8], требования об определении значения испытательного напряжения обмоток с неполной изоляцией нейтрали при приемо-сдаточных испытаниях по обмотке с наибольшим значением  $U_{\max}$  как для трансформаторов, так и для автотрансформаторов, в том числе с трехстержневым магнитопроводом. Это позволит во всех случаях испытывать изоляцию по графику рис. 3, в, измеряя ЧР при воздействии ОПЧ и тем самым обеспечивая более тщательный контроль за развитием ЧР при испытаниях.

После накопления опытных данных может быть нормирована:

- интенсивность ЧР при ОПЧ;
- увеличение значения ДПЧ для трансформаторов с  $U_{\max} \geq 330$  кВ до  $1,5 U_{\max} / \sqrt{3}$  с сохранением нормы на ЧР, равной  $3 \cdot 10^{-10}$  Кл;
- проведение ДИ трехфазных трансформаторов по схеме трехфазного холостого хода;
- исключение из ГОСТ [15] требования о специальном нагреве трансформатора при типовых

испытаниях.

**Последовательность испытаний.** В настоящее время в нормах СССР [4—6] последовательность испытаний изоляции не регламентирована, но перечень испытательных напряжений дается в таком порядке: ГИ — КИ — ОПЧ — ДПЧ. В стандарте на методы испытаний [15] указано, что испытание КИ проводится после испытаний ГИ, но допускается и иная последовательность этих испытаний, а испытания ДПЧ проводятся после импульсных испытаний и испытаний ОПЧ.

Согласно ANSI [14] испытания КИ (если проводятся) и ГИ должны предшествовать низкочастотным испытаниям.

В МЭК [8] последовательность испытаний не регламентирована, за исключением требования, чтобы испытание ДПЧ проводилось после всех других испытаний изоляции. Испытания перечисляются в таком порядке: ОПЧ — ПГИ — испытание нейтрали (метод 1) или КИ — ПГИ — испытание нейтрали — ДПЧ (метод 2).

Наш многолетний опыт испытаний показал, что предпочтительной (как для выявления дефектов, так и для минимизации затрат на испытания) является следующая последовательность: испытание приложенным напряжением обмотки НН и нейтрали обмотки ВН — ГИ (вначале СГИ, а затем ПГИ [23] или последовательность импульсов по МЭК [8]) - КИ - ОПЧ - ДПЧ. На практике наблюдались случаи, когда при подборе параметров ГИН при напряжении, равном примерно 60 % ПГИ, пробивалась витковая изоляция переплетенных обмоток ВН трансформаторов 330 и 750 кВ (дефекты провода). Эти пробои выявлялись однако не при испытаниях ПГИ (поскольку осциллограммы, снятые при 60 и 100 %, не отличались между собой), а при последующем испытании ОПЧ. Но эти повреждения могли бы быть "пропущены", если бы применялась последовательность испытаний, принятая по методике 1 МЭК [8].

Указанную последовательность испытаний целесообразно ввести в ГОСТ [15].

**Перспективы снижения уровней изоляцией трансформаторов.** В СССР введению в строй промышленных электропередач 750 кВ предшествовала успешная шестилетняя эксплуатация опытно-промышленной передачи 750 кВ Конаково — Москва, а введению в строй передачи 1150 кВ — успешная двенадцатилетняя эксплуатация опытно-промышленных трансформаторов 210 МВ·А, 1150 кВ. В настоящее время более 10 лет успешно эксплуатируется на Волжской ГЭС группа однофазных блочных трансформаторов 135 МВ·А, 500 кВ с резко сниженным уровнем испытательных напряжений на базе применения для защиты ограничителей перенапряжения (ОПН) [32, 33]. Разработаны и поставляются заказчикам блочные трехфазные трансформаторы 666 МВ·А, 500 кВ и однофазные трансформаторы 167 МВ·А, 500 кВ с уровнями изоляции, определенными из условия применения для защиты ОПН.

С учетом успешного опыта эксплуатации указанных трансформаторов в проекте ГОСТ, разрабатываемом в настоящее время взамен [4, 5], предусматривается для электрооборудования 330—750 кВ наряду с существующими уровнями изоляции введение сниженных уровней, рассчитанных на применение ОПН.

**Опыт эксплуатации.** Анализ опыта эксплуатации силовых трансформаторов, изготовленных ЗТЗ (более 90 % всех установленных в эксплуатацию трансформаторов) показывает, что в последнее десятилетие не наблюдается роста аварийности трансформаторов, причем резко снизилось количество повреждений главной и продольной изоляции (под повреждением понимается такой выход из строя трансформатора, когда для его ремонта требуется разборка со вскрытием бака). В табл. 2 приведена удельная повреждаемость трансформаторов по годам, определенная как процентное отношение количества трансформаторов, вышедших из строя в течение года, к общему количеству находящихся в рассматриваемом году в эксплуатации трансформаторов.

Повреждения главной изоляции происходили в трансформаторах, проработавших более 15—25 лет, и были вызваны, в основном, снижением электрической прочности изоляции из-за нарушений условий эксплуатации, недостаточно качественного ремонта



(выполненного не на заводе-изготовителе), загрязнения продуктами износа подшипников маслонасосов, увлажнения вследствие нарушения герметичности, например, уплотнений наконечников вводов или мембраны выхлопной трубы и др. Следует отметить отсутствие аварий с трансформаторами 750 кВ. Не было также аварий, которые можно было бы непосредственно отнести за счет недостаточности уровня изоляции.

Таблица 2

Узел повреждения	Класс напряжения, кВ	Наработка тыс. трансформаторо-лет	Повреждаемость силовых трансформаторов 330 – 750 кВ производства ЗТЗ									
			1982 г.	1983 г.	1984 г.	1985 г.	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1989 г.	1990 г.	
Главная изоляция	330	7,2	0,44	0,28	0,27	0,26	0	0,12	0	0,22	0	
	500	9,8	0	0	0,10	0,10	0	0	0,42	0	0,08	
	750	1,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Продольная изоляция	330	7,2	0,44	0,28	0,13	0,13	0,12	0	0,12	0,11	0,11	
	500	9,8	0,12	0,22	0	0	0,28	0,17	0,08	0	0,08	
	750	1,6	0	0	0	0	0,56	0	0	0	0	
Все узлы	330 - 750	18,6	1,11	0,64	0,54	0,77	0,63	0,73	0,96	0,55	0,63	

Между тем в энергосистемах 735 и 765 кВ Канады и США наблюдалось большое количество аварий из-за разрушения изоляции трансформаторов во время эксплуатации. Так, в энергосистеме АЕР США аварийность блочных трансформаторов 765/25 кВ составляет 2,3 %, а автотрансформаторы 765/345 кВ, 500 МВ·А повреждались не менее 54 раз [34, 35]. В энергосистеме Гидро — Квебек Канады только за последнее время были повреждены шесть блочных трансформаторов 735/13,8 кВ, 400 МВ·А [34]. Авторы [34-37] связывают эти аварии с недостаточностью уровней изоляции. Новая спецификация АЕР на силовые трансформаторы [22] устанавливает повышенные на 13—15 % уровни изоляции по сравнению с требованиями предыдущей и дополнительно к указанным "традиционным" вводит новые виды испытаний (коммутационным импульсом 1,2/4200 мкс; испытание СГИ с разомкнутой обмоткой НН; испытание индуктированным напряжением с работающими, маслонасосными и приложенным напряжением с нормированием интенсивности ЧР).

По нашему мнению, определяющими факторами в обеспечении надежности изоляции являются совершенство конструкции и технологии изготовления трансформаторов, методов испытания и условий эксплуатации.

## Выводы

1. Успешный опыт эксплуатации отечественных трансформаторов 330 – 750 кВ подтвердил обоснованность требований стандартов [4, 5] и правильность программы заводских испытаний изоляции, составленных на их базе. Нет необходимости в кардинальном изменении этих норм и введении новых видов испытаний.

2. Представляется обоснованным принятый в СССР подход к снижению уровней изоляции, базирующийся на анализе результатов многолетней эксплуатации опытно-промышленных трансформаторов.

3. Рекомендуется предложить в ТК 14 МЭК изменение Публикации 76—3 МЭК в части отражения практики СССР по сохранению испытания одноминутным напряжением и проведению его с измерением ЧР; испытаниям срезанным грозовым импульсом со значением  $K_0$ , большим 0,3; испытаниям коммутационным импульсом с параметрами, близкими к импульсу 250/2500; оценке результатов испытаний длительным напряжением; введению испытательных напряжений для электрооборудования с наибольшим рабочим напряжением  $U_{\max} = 1200 \text{ кВ}$ .

4. В целях сближения с МЭК целесообразно внести в стандарты [4, 5, 15] следующие изменения:

включить в [4, 5], аналогично МЭК, требование об установлении испытательных напряжений ОПЧ и КИ для обмоток с неполной изоляцией нейтрали по коэффициенту трансформации с обмоткой ВН;

проводить длительное испытание переменным напряжением трехфазных трансформаторов по схеме трехфазного холостого хода;

исключить из [15] требование о специальном нагреве трансформатора при типовых испытаниях;

увеличить значение испытательного длительного переменного напряжения для трансформаторов с  $U_{\max} \geq 330$  кВ до значения  $1,5 \cdot U_{\max} / \sqrt{3}$  с сохранением нормы на ЧР, равной  $3 \cdot 10^{-10}$  Кл.

## Список литературы

1. ГОСТ 1516-42. Напряжения испытательные и разрядные высоковольтных трансформаторов, аппаратов и изоляторов, предназначенных для установок, связанных с воздушными сетями. М.: Изд-во стандартов, 1942.
2. Сапожников А. В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. М.: Энергия, 1969.
3. ГОСТ 1516-60. Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытаний электрической прочности изоляции. М.: Изд-во стандартов, 1960.
4. ГОСТ 1516.1-76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. М.: Изд-во стандартов, 1985.
5. ГОСТ 20690-75. Электрооборудование переменного тока на напряжение 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. М.: Изд-во стандартов, 1975.
6. РД 16.556-89. Электрооборудование переменного тока на напряжение 1150 кВ. Требования к электрической прочности изоляции и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1989.
7. Lampe W. D., Dietrich W. P. Experiences of the new dielectric tests (IEC 76-3) for power transformers // Report on the discussions at the Colloquium of Study Committee 12 (Transformers) in Helsinki (Finland), June 1985.
8. Публикация 76-3 МЭК. Силовые трансформаторы. Ч. 3. Уровни изоляции и испытания изоляции, 1980.
9. Публикация 71-2 МЭК. Координация изоляции. Ч. 2. Руководящие указания, 1976.
10. Публикация 71-1 МЭК. Координация изоляции. Ч. 1. Термины, определения, принципы и правила, 1976.
11. ANSI/IEEE C57.12.00-1987. IEEE Standard General Requirements for Liquid - Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.
12. CSA Standard Can3-C308-M85. The Principles and Practice of Insulation Coordination.
13. CSA Standard Can3-C88-M79. Power Transformers and Reactors.
14. ANSI/IEEE C57.12.90-1987. IEEE Standard Test Code for Liquid - Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.
15. ГОСТ 22756-77. Трансформаторы (силовые и напряжения) и реакторы. Методы испытаний электрической прочности изоляции. М.: Изд-во стандартов, 1985.
16. ANSI/IEEE C5758-1986, IEEE Guide for Transformer Impulse Tests.
17. ГОСТ 1516-73. Трансформаторы, реакторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности изоляции. М.: Изд-во стандартов, 1973.
18. ГОСТ 1516.2-76. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. М.: Изд-во стандартов, 1987.
19. Гурин В. В. Распределение вероятности пробоя изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения // Электротехника. 1986. № 6, С 8-11.
20. ANSI/IEEE Std 1122-1987. IEEE Standard for Digital Recorders for Measurements In High-Voltage Impulse Tests.
21. Публикация 722 МЭК. Руководство по испытаниям силовых трансформаторов и реакторов грозовыми и коммутационными импульсами. 1982.
22. Specification LPT-L Technical Requirement for Large Power Transformers. AEP, March 31, 1989.
23. Опыт заводских испытаний изоляции силовых трансформаторов срезанными грозовыми импульсами напряжения / А. С. Боченко, А. Ф. Горбунцов, В. В. Гурин, В. А. Федоренко // Электрические станции. 1982. №11. С. 52-56.
24. ANSI/IEEE C57.12.80-1978 (P 1986). IEEE Standart Terminology for Power and Distribution Transformers.
25. Глазунова Л. Л., Гурин В. В., Лоханин А. К. Опыт испытаний коммутационными импульсами и длительным напряжением изоляции силовых трансформаторов 330—1150 кВ // Третья международная

конференция по изучению проблем в силовых трансформаторах. Ч. 1. 1990. С. 209-218.

26. Гурин В. В., Лоханин А. К. Испытание коммутационным импульсом изоляции силовых трансформаторов с использованием установок фирмы ТУР // Междунар. коллоквиум по высоковольтной испытательной технике. Л.: 1988, доклад №1-17Д.

27. Вопросы координации электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов высших классов напряжения / А. К. Лоханин, Т. И. Морозова, Г. С. Кучинский, Д. С. Каплан // СИГРЭ. 1970. № 12-06.

28. ГОСТ 21023-75. Трансформаторы силовые. Методы измерений характеристик частичных разрядов при испытаниях напряжением промышленной частоты. М.: Изд-во стандартов, 1981.

29. Боченко А. С., Горбунцов А. Ф., Гурин В. В. Измерение частичных разрядов при испытаниях изоляции силовых трансформаторов, одномоментным напряжением переменного тока // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. М.: Информэлектро. 1975. Вып. 7(51). С. 25-27.

30. ANSI/IEEE C57.113 (1988). Draft American National Standard // IEEE Trial-Use. Guide for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors.

31. Совершенствование методов оценки результатов испытаний длительным напряжением изоляции силовых трансформаторов / В. В. Гурин, А. К. Лоханин, Л. Л. Глазунова, В. М. Погостин // Электротехника. 1988. № 1. С. 41-46.

32. Разработка и опыт эксплуатации силовых трансформаторов со сниженными уровнями изоляции / А. К. Лоханин, Т. И. Морозова, Е. Д. Сенкевич и др. // Третья международная конференция по изучению проблем в силовых трансформаторах. Ч. 1. 1990. С. 190-198.

33. Лоханин А. К. Перспективы снижения уровней изоляции и совершенствования методов испытания силовых трансформаторов 110-750 кВ // Электротехника. 1975. № 8.

34. V. L Kogan et al. Failure analysis of ENV transformers // Trans. Power Delivery. 1988. N 2. P. 672-683.

35. L. B. Wagenaar et al. Rationale and implementation of a new 765 kV generator step-up transformer specification // CIGRE. 1990. N 12-202.

36. R. Malewsky et al. Dielectric stress in 735 kV generator transformers under operating and tests conditions // CIGRE. 1990. N 12. P. 203.

37. Malewski R., Donville T., Lavallee L. Measurement of switching transients in 735kV substations and assessment of their severity for transformer insulation // IEEE Trans. Power Deliv. 1988. N 4. 1380-1390.