

## ДЛИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Инж. А.Ф. ГОРБУНЦОВ, канд. техн. наук В.В. ГУРИН, инж. В.В. СОКОЛОВ  
ПО «Запорожтрансформатор»

В последние годы на трансформаторных заводах в дополнение к испытаниям одноминутным напряжением внедрено длительное испытание на частичные разряды (ДИ) изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения. Длительные испытания позволяют полнее выявлять состояние изоляции и ее способность к длительной работе в эксплуатации, чем одноминутное испытание (ГОСТ 21023-75, 20690-75, 1516.1-76, [Л. 1]). Наряду с усовершенствованием конструкции, изготовления, монтажа и эксплуатации внедрение таких испытаний способствовало практическому устранению отказов изоляции трансформаторов в эксплуатации, имевших место 10—15 лет назад. Опыт проведения длительных испытаний на Запорожском трансформаторном заводе может оказаться полезным при внедрении таких испытаний после ремонтов трансформаторов в эксплуатации. Кроме того, проведение ДИ может потребоваться иногда непосредственно в условиях эксплуатации трансформаторов [Л. 2].

Основными параметрами длительных испытаний являются: испытательное напряжение  $U_{дл}$ , длительность испытаний  $t_{дл}$ , методика испытаний (схема соединения обмоток, метод подъема и снижения напряжения, метод измерения ч. р. и др.), нормы отбраковки.

На тех ремонтных заводах, где имеется испытательный генератор повышенной частоты, длительные испытания должны проводиться при величинах  $U_{дл}$  и  $t_{дл}$ , установленных ГОСТ 21023-75, 20690-75, 1516.1-76. В табл. 1 приведены величины  $U_{дл}$ , применяемые в настоящее время.

Длительность испытаний  $t_{дл}$  по ГОСТ 21023-75 должна быть 60 мин при типовых и периодических испытаниях и не менее 30 мин при приемо-сдаточных испытаниях. Как следует из [Л. 3], длительность испытаний не должна зависеть от частоты испытательного напряжения, сама частота быть в пределах от 100 до 400 Гц (ГОСТ 1516.1-76).

В тех случаях, когда испытательный генератор повышенной частоты отсутствует и длительные испытания проводятся при напряжении частотой 50 Гц (например, при испытаниях непосредственно в условиях эксплуатации), испытательное напряжение и длительность испытаний не должны быть больше допустимых согласно ГОСТ 11677-75 превышений напряжения (табл. 2). Величины напряжений и длительность испытаний будут при этом существенно меньше, чем требуемые ГОСТ 21023-75, 20690-75, 1516.1-76. Так, допустимые превышения напряжения в течение 20 мин в эксплуатации составляют всего (1,09—1,10)  $U_{н.р.}$  (табл. 2) по сравнению с (1,40—1,51)  $U_{н.р.}$ , соответствующих испытательному длительному напряжению (табл. 1). Поэтому рекомендуется дополнительно провести тест при наибольшем рабочем напряжении в течение 12—24 ч. Ограничения в увеличении напряжения при таких испытаниях вызваны условиями возбуждения магнитопроводов. Для некоторых конструкций трансформаторов по согласованию с заводом-изготовителем могут быть приняты большие значения  $U_{дл}$ , чем указанные в табл. 2.

Таблица 1

Класс напряжения, кВ	Наибольшее рабочее напряжение (линейное) $U_{н.р.}$ , кВ	Испытательное длительное напряжение $U_{дл}$ , кВ	$\frac{\sqrt{3}U_{дл}}{U_{н.р.}}$	Испытательное одноминутное напряжение $U_{1м}$ , кВ
150	172	150*	1,51	230
220	252	220**	1,51	325
330	363	295**	1,41	460
500	525	425**	1,40	680
750	787	} 590***	1,30	} 800
		636****	1,40	

\* В стандартах не указано, на ЗТЗ проводится в качестве испытания.

\*\* ГОСТ 1516.1-76. \*\*\* ГОСТ 20690-75. \*\*\*\* Практика ЗТЗ.

Таблица 2

Класс напряжения, кВ	Наибольшее рабочее напряжение $U_{н.р.}$ , кВ	Допустимое напряжение при длительности, кВ, не более		$\frac{U_{20мин}}{U_{н.р.}}$	$\frac{U_{20с}}{U_{н.р.}}$
		20 мин	20 с		
150	172	190	210	1,10	1,22
220	252	275	310	1,09	1,23
330	363	400	450	1,10	1,24
500	525	575	650	1,09	1,24
750	787	865	975	1,10	1,24

Представляет интерес соображения, положенные в основу выбора величин  $U_{\partial л}$  и  $t_{\partial л}$ , и возможные изменения этих величин в будущем.

Выбор величин  $U_{\partial л}$  и  $t_{\partial л}$  был затруднен тем, что еще недостаточно полно исследованы процессы разрушения электрической изоляции<sup>1</sup> трансформаторов (особенно при наличии дефектов) при воздействиях напряжения в течение нескольких десятков и сотен часов и тем более при воздействиях напряжения в течение единиц или десятков лет. При этом особенно важно было знать, имеют ли эти процессы случайный или кумулятивный характер и сохраняется ли этот характер при изменении времени воздействия напряжения от 1 мин до 20—30 лет.

Известные подходы к обоснованию  $U_{\partial л}$  и  $t_{\partial л}$  были основаны на:

- использовании вольт-секундной характеристики изоляции;
- различии в напряжениях начала ч. р. в изоляции на заводе и в эксплуатации с учетом разброса (статистический подход).

Первый подход представлялся наиболее предпочтительным, однако имевшиеся отечественные и известные зарубежные данные по прочности моделей изоляции трансформаторов и попытки построения вольт-секундной характеристики [Л. 4—6] не могли еще служить однозначным основанием для экстраполяции вольт-секундной характеристики в область времен 20—30 лет и выбора величины  $U_{\partial л}$  и  $t_{\partial л}$ .

В [Л. 7] был применен статистический подход к выбору  $U_{\partial л}$ , однако при этом рассматривались только ч. р. типа пробоя масляных каналов. Для изоляции трансформаторов особенно применительно к условиям эксплуатации могут также представлять опасность ч. р. других типов (например, ч. р. в газовых включениях). Образование газовых включений в трансформаторах в условиях эксплуатации может быть вызвано различными причинами (см., например, [Л. 81]). Опасность этого явления подтверждается случаями повреждений изоляции из-за ч. р. в газовых включениях [Л. 9, 10], возникающих, например, вследствие кавитации при работе циркуляционных насосов и затянутых в обмотку [Л. 9].

Прямых экспериментальных данных по статистическим характеристикам, ч. р. разных типов применительно к условиям эксплуатации практически не имелось. Величину коэффициента вариации  $K_v$  напряжения начала ч. р. в газовых включениях в условиях эксплуатации можно было оценить косвенным образом, если в первом приближении принять, что она равна коэффициенту вариации напряжения начала ч. р. при заводских испытаниях трансформаторов 35—110 кВ, заливаемых маслом без вакуума. По нашим данным  $K_v$  для трансформаторов 35 кВ составляет около 25% (получено на 16 трансформаторах),  $K_v$  для трансформаторов 110 кВ составляет 20% (получено на 28 фазах трансформаторов).

Нельзя не учитывать, что коэффициенты вариации напряжения начала ч. р. при заводских испытаниях трансформаторов 220—750 кВ также существенно выше 8% (хотя результаты измерений и представляют собой смешение внутренних ч. р. в изоляции и разного рода неопасных ч. р., например коронирование крепления вводов НН, магнитных шунтов и т. п.). Поэтому при оценке коэффициентов вариации для трансформаторов необходимо было ориентироваться на значение  $K_v$  выше, чем 8—10%.

<sup>1</sup> Следует указать, что под термином «изоляция трансформатора» понимается вся изоляционная конструкция трансформатора (главная и продольная изоляция, изоляция отводов и внешних изоляционных промежутков, междуфазовая изоляция, изоляция вводов и переключающих устройств и т. д.).

При этом расчеты по предлагаемой в [Л. 7] методике теряли смысл (приняв, например  $K_v=20\%$  для условий испытаний и эксплуатации, получим при прочих равных условиях  $U_{\text{дл}}=2,5U_{\text{ф}}$ , что выше, чем  $U_{1,м}$ ). Далее имелись данные, показывающие, что для  $U_{\text{ч.р.}}$  более подходящим является распределение минимальных значений типа I, чем нормальное [Л. 11]. Итак, приведенные в [Л. 7] статистические соображения также не могли служить основанием для выбора величины  $U_{\text{дл}}$ .

Таким образом, имевшиеся данные исследований на моделях были недостаточными для обоснованного выбора  $U_{\text{дл}}$  и  $t_{\text{дл}}$  и для этой цели был использован опыт испытаний изоляции трансформаторов [Л. 1].

Как следует из данных табл. 1, отношение величин  $U_{\text{дл}}$  к наибольшему рабочему напряжению и к испытательному одномоментному напряжению различно для трансформаторов разных классов напряжения. Это отличие не имеет убедительного обоснования.

Учитывая то обстоятельство, что для трансформаторов 330 и 500 кВ отношение  $U_{1,м}/U_{\text{ф}}$  примерно такое же, как и для трансформаторов 220 кВ (в настоящее время уже имеется положительный опыт длительных испытаний последних трансформаторов при  $U_{\text{дл}}=1,5U_{\text{ф}}$ , целесообразно для трансформаторов 330 и 500 кВ увеличить  $U_{\text{дл}}$  от 1,4 до  $1,5U_{\text{ф}}$ . Такое увеличение будет способствовать более надежному выявлению дефектов, могущих приводить к развитию ч. р. опасной интенсивности при  $U_{\text{ф}}$ .

В будущем, особенно учитывая возможность отказа от испытания одномоментным напряжением,  $U_{\text{дл}}$  может быть еще увеличено. В докладе авторов на секции IV научного совета АН СССР на тему «Электрофизические проблемы старения, долговечности и надежности электрической изоляции при воздействии высоких электрических полей», проходившей в 1975 г. в Томске, предлагается, например, величина  $U_{\text{дл}}=1,7U_{\text{н.р.}}$  для трансформаторов до 500 кВ.

Учитывая, что отношение  $1,7 U_{\text{н.р.}}/U_{1,м} = 0,75 - 0,77$  для этих трансформаторов не превышает отношения  $U_{\text{дл}}/U_{1,м}=0,8$ , применяемого на практике в настоящее время для трансформаторов 750 кВ (см. табл. 1), такое увеличение представляется вполне возможным.

**Методика ДИ.** На тех ремонтных заводах, где имеется испытательный генератор повышенной частоты, методика ДИ должна соответствовать методике, применяемой на заводах Минэлектротехпрома (ГОСТ 21023-75 и [Л. 1]). Длительные испытания должны проводиться после испытаний изоляции одномоментным напряжением (рис. 1,а). На рис. 1,а точки 1, 5, 6 и 9 соответствуют наибольшему рабочему напряжению, 2, 4, 7, 8 — повышенному напряжению, точка 3 — одномоментному испытательному напряжению.

Допускается проводить длительные испытания при совмещении его с одномоментным испытанием (рис. 1,б). На рис. 1,б точки 1, 6 соответствуют наибольшему рабочему напряжению, 2, 4, 5 — повышенному напряжению, точка 3 — одномоментному испытательному напряжению.

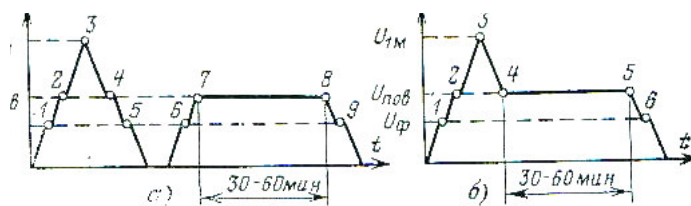


Рис. 1. Графики испытаний на ч. р. изоляции трансформаторов.

Совмещение длительного испытания с одномоментным допустимо только в случае отсутствия подпорного напряжения в схеме испытания одномоментным напряжением, т. е. при испытании по схеме х. х.

Длительное испытание трехфазных трансформаторов 330-500 кВ с  $U_{\text{дл}}/U_{\text{н.р.}}=1,4$  можно проводить, исходя из основ известного из теории надежности метода последовательных испытаний [Л. 14, 15] и ГОСТ 17331-71, согласно которому устанавливаются приемочные значения  $q_0$  интенсивности ч.р. (например  $q_0=3 \cdot 10^{-10}$  Кл) и браковочное значение  $q_1$  ( $q_1=3 \cdot 10^{-9}$  Кл). Если измерена интенсивность  $q \leq q_0$ , трансформатор принимается; если  $q > q_1$ , трансформатор бракуется; если  $q_0 < q \leq q_1$ , продолжают испытания. Применительно к ДИ для продолжения испытаний можно, увеличить  $U_{\text{дл}}$  и  $t_{\text{дл}}$ .

Целесообразно, чтобы значение  $q_0$  было равно предельной допустимой интенсивности ч. р. при рабочем напряжении, которые в эксплуатации не вызывали бы остаточных повреждений, а  $q_1$  — предельной допустимой интенсивности ч. р. при  $U_{\text{дл}}$ , которые не вызывали бы повреждений при ДИ. Сами величины  $q_0$  и  $q_1$  требуют уточнения для отдельных узлов изоляции и для всего трансформатора. Этот метод представляется особенно перспективным, так как он учитывает динамику изменения ч. р. во времени, что особенно важно для изоляции, когда норму в виде одного значения  $q$  невозможно установить. Если за время продолжения испытаний интенсивность ч. р. имеет стабильный характер (не возрастет), то трансформатор принимается; при этом весьма желательно определить место нахождения источника ч. р. в трансформаторе. Если же при продолжении испытаний  $q$  увеличивается и в какой-то момент превышает  $q_1$  трансформатор бракуется и испытания сразу прекращаются, чтобы не повредить изоляцию.

Предложенный метод отбраковки при ДИ внедрен на трансформаторах 750 кВ. При этом временно установлены значения  $q_0=3\cdot 10^{-9}$  Кл,  $q_1 = 5\cdot 10^{-8}$  Кл,  $t_{\text{дл}}=1$  ч; продолжение испытаний в случае  $3\cdot 10^{-9}<q\leq 5\cdot 10^{-8}$  проводится при  $U_{\text{дл}}=1,4 U_{\phi}$  дополнительно в течение 1ч. На одном из трансформаторов была измерена при ДИ интенсивность  $q=10^{-8}$  Кл. В течение дополнительного часа выдержки интенсивность ч. р. оставалась неизменной. Трансформатор можно было выпустить с завода, однако для проверки этого вывода были проведены специальные исследования по локации ч. р., которые показали место нахождения источника ч. р. возле ввода ВН. Разборка трансформатора показала отсутствие предусмотренного в чертежах экрана на баке трансформатора напротив ввода ВН. Этот дефект не повлиял бы на пригодность трансформатора к эксплуатации, что подтверждает правильность оценки результатов испытаний.

## ВЫВОДЫ

1. Длительные испытания на частичные разряды рекомендуется включить в объем испытаний изоляции трансформаторов, проходящих ремонт на заводах Минэнерго, или трансформаторов, при эксплуатации которых отмечены какие-либо ненормальности.
2. Длительные испытания на частичные разряды трансформаторов 330—500 кВ рекомендуется проводить при напряжении 150% наибольшего рабочего. При оценке результатов ДИ рекомендуется применять предложенный ЗТЗ метод отбраковки.
3. В случае отсутствия испытательного генератора повышенной частоты ДИ рекомендуется проводить при напряжении частотой 50 Гц по изложенной в статье методике.

## Список литературы

1. Горбунцов А. Ф., Гурин В. В. Новый метод заводских испытаний изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения. — «Энергетика и электрификация», 1977, № 2.
2. Гурин В. В., Сви П. М. «Электрические станции», 1976. №5.
3. Калиниченко И. С. Математическая модель вольт-секундной характеристики изоляции. — «Электричество», 1973, №2.
4. Kaufmann R. B., Meador I. R. — IEEE Trans. Power App. and Syst., 1968, 87, №1.
5. Каплан Д. А., Лоханин А. К., Морозова Т. И. Вольт-секундная характеристика главной изоляции силовых трансформаторов. — «Электричество», 1971, №12.
6. Kamata Y., Yamaguchi H. — Hitachi Rev., 1973, 22, N 1.
7. Belezky Z. M. a. a. — CIGRE, 1974, N 12 — 05.
8. Zaky A., Hawley R. — Electr. Rev., 1966, 178, N 22.
9. Norris E. T. — Proc. Instn. Electr. Engrs., 163, 110, N 2.
10. Анализ газов, растворенных в масле, как средство диагностики трансформаторов и определения развивающихся дефектов. — «Экспресс-информация. Электрические машины и аппараты», 1971, № 5.
11. Горбунцов А. Ф., Гурин В. В. О вероятностной оценке электрических характеристик высоковольтной изоляции, — «Электричество», 1975, № 5.
12. Измерение частичных разрядов прибором К-3М в производственных условиях. — «Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы», 1971, вып. 16—17. Авт.: С. П. Андрюхин, В. П. Вдовико, А. Н. Гайдаш и др.
13. Сви П. М. Эксплуатационные измерения частичных разрядов в силовых трансформаторах. — «Электричество», 1972, № 2.
14. Базовский И. Надежность. Теория и практика. М., «Мир», 1965.
15. Справочник по надежности. Т. 1. М., «Мир», 1969.