

Координация изоляции сухих трансформаторов 110 кВ¹

ЛАРИН В.С.

Сухие трансформаторы наиболее полно отвечают современным требованиям взрыво- и пожаробезопасности и экологической чистоты, и в настоящее время достигнут заметный прогресс в деле повышения их класса напряжения вплоть до 35 кВ. Вместе с тем дальнейшее повышение класса напряжения и создание сухих трансформаторов класса напряжения 110 кВ сдерживается существующими нормами электрической прочности изоляции, установленными более 50 лет назад для масляных трансформаторов. Рассмотрены основы принятого в отечественной практике метода координации изоляции и вопросы снижения уровней изоляции сухих трансформаторов. Сделан анализ зарубежной стандартизации в части испытаний изоляции трансформаторов на наибольшее рабочее напряжение 121–126 кВ. Рассмотрены характеристики современных защитных аппаратов и предложены уровни изоляции линейных зажимов и нейтралей сухих трансформаторов 110 кВ. Приведены предложения по объему и методам испытаний электрической прочности изоляции сухих трансформаторов класса напряжения 110 кВ.

Ключевые слова: сухие трансформаторы, прочность изоляции, напряжение, методы испытаний

В последнее время в мире наметилась тенденция к ужесточению экологических требований, требований к взрыво- и пожаробезопасности, а также снижению расходов на эксплуатацию электрооборудования и создание необслуживаемых цифровых подстанций. Наиболее полно этим требованиям соответствуют сухие трансформаторы с воздушно-барьерной изоляцией (далее — сухие трансформаторы).

Сухие трансформаторы, как правило, применяют на классы напряжения 6–35 кВ, что связано с низкой электрической прочностью атмосферного воздуха, являющегося основной изоляцией этих трансформаторов. В последнее время в мире активно ведутся работы по повышению класса напряжения сухих трансформаторов; сравнительно недавно разработан сухой трансформатор традиционной конструкции на наибольшее рабочее напряжение 72,5 кВ [1].

Дальнейшее повышение класса напряжения сухих трансформаторов вплоть до 110 кВ затруднено сложившимися нормами на электрическую проч-

Dry-type transformers meet the modern explosion-and-fire safety and environment protection requirements to the fullest extent, and noticeable progress has been achieved in raising their voltage class up to the 35 kV level. At the same time, the existing standards specifying the requirements for electric strength of insulation, which were established more than 50 years ago for oil-immersed transformers, create obstacles for further increase of the voltage class and development of dry-type transformers for the 110 kV voltage class. The principles of the insulation coordination method adopted in the Russian electric power industry are considered together with matters concerned with decreasing the insulation levels of dry-type transformers. Foreign standards on testing the insulation of transformers designed for the maximal operating voltage equal to 121–126 kV are analyzed. The characteristics of modern protective apparatuses are considered, and the insulation levels for the line and neutral terminals of dry-type 110-kV transformers are proposed. Proposals on the scope and methods of testing the electrical strength of the insulation of dry-type transformers for the 110 kV voltage class are given.

Key words: dry-type transformers, insulation strength, voltage, test methods

ность изоляции трансформаторов 110 кВ. Эти нормы были установлены более полувека назад применительно к защищаемым вентильными разрядниками масляным трансформаторам и с тех пор не пересматривались, в том числе из-за того, что их снижение в обоснованных пределах не влечет за собой существенного повышения технико-экономических показателей масляных трансформаторов 110 кВ [2, 3].

Иначе дело обстоит с сухими трансформаторами, основные габариты и технико-экономические показатели которых во многом определяются размерами изоляции. Для создания сухих трансформаторов 110 кВ большое значение имеет введение уровня изоляции (совокупности испытательных напряжений), сниженного при должном обосновании относительно принятого в ГОСТ 1516.3–96 [4].

Развитие характеристик защитных аппаратов и их отражение в требованиях к электрической прочности изоляции электрооборудования. За прошедшее столетие аппараты для защиты от перенапряжений непрерывно улучшались и совершенствовались. В разное время для защиты оборудования использовали (в хронологическом порядке): защитные искровые промежутки, разрядники трубчатые, разрядники вентильные (РВС), разрядники вентиль-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Государственный контракт № 16.526.12.6010 «Разработка экологически чистых силовых трансформаторов 110 кВ с воздушно-барьерной изоляцией»).

ные с магнитным гашением (РВМГ), разрядники вентильные комбинированные (РВМК), ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), в том числе ограничители типа ОПНИ и ОПНГМ-Ф (с искровыми промежутками для более глубокого ограничения грозовых и коммутационных перенапряжений, предназначенные для защиты оборудования со сниженным уровнем изоляции).

Развитие защитных аппаратов сопровождалось улучшением их защитных характеристик (табл. 1) и, как следствие, более глубоким ограничением перенапряжений.

Таблица 1

Номинальное напряжение, кВ	Остающееся напряжение $U_{ост}$, кВ (%), при грозовом импульсе тока 5 кА (не более) для защитных аппаратов		
	РВС ¹	РВМГ ²	ОПН ³
110	335 (100)	265 (79)	255 (76)
150	465 (100)	370 (80)	350 (75)
220	670 (100)	515 (77)	505 (75)

¹ Разрядники группы III по ГОСТ 16357 [5].

² Разрядники группы II по ГОСТ 16357.

³ Типовые значения для ОПН на наибольшее длительно допустимое напряжение 77, 110 и 157 кВ для классов напряжения 110, 150 и 220 кВ.

Развитие защитных аппаратов и улучшение их характеристик находило отражение в постепенном снижении испытательных напряжений электрооборудования, нормированных в ГОСТ 1516 – основном стандарте на требования к электрической прочности электрооборудования высокого напряжения.

Рассмотрим подробнее этот вопрос применительно к двум основным испытательным напряжениям – напряжению полного грозового импульса (ПГИ) и кратковременному (одноминутному) переменному напряжению промышленной частоты (ОПЧ).

В первый стандарт [6] требования к импульсной прочности электрооборудования не были включены, и появились они в следующей редакции стандарта [7], в которой испытательные напряжения ПГИ трансформаторов классов напряжения до 220 кВ включительно были выбраны исходя из защитных уровней вентильных разрядников типа РВС (группы III по ГОСТ 16357). Позднее в редакции [8] испытательные напряжения трансформаторов классов напряжения 150 и 220 кВ были снижены (примерно на 16 и 20% соответственно), что учитывало переход на координацию изоляции этих трансформаторов с характеристиками вентильных разрядников с магнитным гашением типа РВМГ (группа II по ГОСТ 16357).

Нормы на испытательные напряжения для классов напряжения 330 и 500 кВ появились в стандарте [8]; практически без изменений они перешли в стандарты [9 и 10]. При выборе испытательных напряжений классов напряжения 330 и 500 кВ были использованы остающиеся напряжения разрядников типа РВМГ. Нормы на испытательные напряжения для класса напряжения 750 кВ были установлены в [11] исходя из применения разрядников типа РВМК (комбинированные разрядники по ГОСТ 16357).

Дальнейшее развитие средств защиты от перенапряжений и применение ОПН позволило обеспечить более глубокое ограничение грозовых перенапряжений до уровня 1,8–2,0 амплитудного значения наибольшего рабочего фазного напряжения $U_{н.р.ф}$ и, соответственно, дополнительно снизить уровни изоляции защищаемого с помощью ОПН электрооборудования. Это нашло отражение в стандарте [4], где для классов напряжения 330–750 кВ введено разделение на два уровня испытательных напряжений – уровни изоляции *a* и *b*, соответствующих применению ОПН и вентильных разрядников. Испытательные напряжения для уровня *b* в основном соответствуют стандартам [10] (330–500 кВ)

Таблица 2

Стандарт	Испытательное напряжение (кВ) для классов напряжения					
	полного грозового импульса			(одноминутное) переменное напряжение (относительно земли)		
	110 кВ	150 кВ	220 кВ	110 кВ	150 кВ	220 кВ
ГОСТ 1516-42	–	–	–	230	320	460
ГОСТ 1516-60	480	660	945	200	275	400
ГОСТ 1516-68	480	550	750	200	230	325
ГОСТ 1516-73	480	550	750	200	230	325
ГОСТ 1516.1-76	480	550	750	200	230	325
ГОСТ 1516.3-96	480	550	750	200	230	325

и [11] (750 кВ) с округлением некоторых значений до стандартных значений [12].

Изменение испытательных напряжений силовых трансформаторов классов напряжения 110–220 кВ отражено в табл. 2. Для иллюстрации общего тренда на рис. 1 показана динамика изменения нормированных в стандартах значений напряжений ПГИ и ОПЧ, отнесенных к амплитудному и действующему значению наибольшего рабочего фазного напряжения $U_{н.р.ф}$ соответственно; для 1996 г. за основу взят уровень изоляции a по [4].

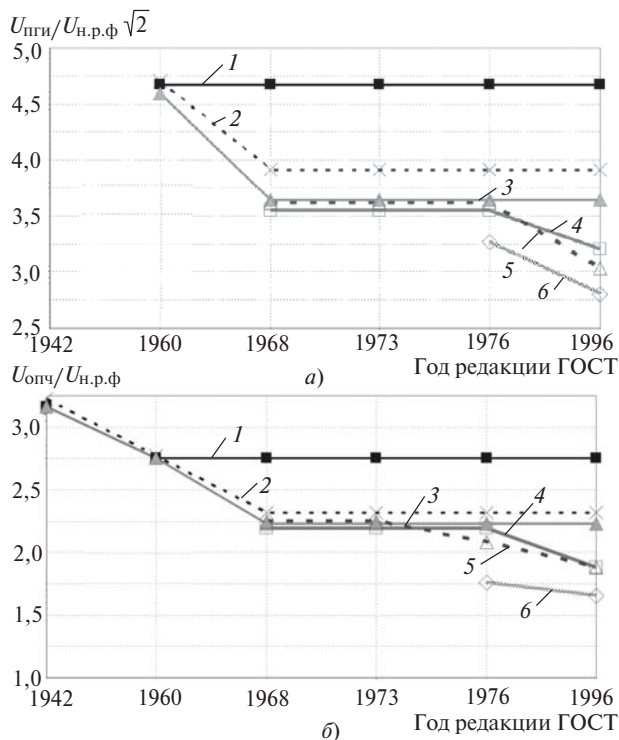


Рис. 1. Динамика изменения испытательных напряжений: а – ПГИ; б – ОПЧ; 1 – 110 кВ; 2 – 150; 3 – 220; 4 – 330; 5 – 500; 6 – 750

Как видно из табл. 2 и рис. 1, испытательные напряжения трансформаторов класса напряжения 110 кВ не подвергались корректировке и уточнению уже более 50 лет, несмотря на достигнутый значительный прогресс в средствах защиты от перенапряжений. Несмотря на переход в редакции стандарта [8] к сниженным испытательным напряжениям для классов напряжения 150 и 220 кВ, аналогичного снижения для класса напряжения 110 кВ при разработке этой редакции (и последующих редакций) сделано не было. Одной из причин тому была неочевидность экономического эффекта от снижения испытательных напряжений для класса 110 кВ. Как отмечается в [2], для оценки эффекта были выполнены эскизные проекты нескольких типов масляных трансформаторов на сниженные уровни изоляции и проведены соответствующие экономические расчеты, которые не выявили зна-

чимого снижения стоимости и увеличения КПД трансформаторов, при том, что обеспечение сниженных уровней изоляции требовало применения более дорогостоящих на тот момент разрядников типа РВМГ. Другим немаловажным аргументом было стремление избежать какого-либо снижения надежности работы оборудования, заложить больший запас электрической прочности изоляции, облегчить работу оборудования при аварийных режимах, связанных с выделением части сети без заземленной нейтрали и др.

Перспективы снижения испытательных напряжений силовых трансформаторов класса напряжения 110 кВ. Необходимо отметить, что к настоящему времени разрядники типа РВС и РВМГ практически не применяются. На новых подстанциях для защиты трансформаторов 110 кВ применяют исключительно ОПН как для защиты линейных выводов, так и для защиты нейтрали обмоток трансформаторов. При идентичных условиях и расстояниях от защитных аппаратов до защищаемых трансформаторов это приводит к существенному увеличению координационного интервала между остающимся напряжением защитных аппаратов и испытательными напряжениями грозовых импульсов защищаемых трансформаторов. При прочих равных условиях координационный интервал теперь может составлять свыше 100%, в то время как при разработке ГОСТ 1516 необходимым и достаточным был принят интервал 25–45% и именно такие значения интервала положены в основу испытательных напряжений, нормированных ГОСТ 1516.

Не секрет, что завышенные уровни изоляции ведут к излишним запасам электрической прочности изоляции электрооборудования, которые не всегда влияют на повышение надежности работы электрооборудования, и потому эти запасы могут быть уменьшены в обоснованных пределах.

Вопросы возможности и обоснования снижения уровней изоляции масляных трансформаторов 110 кВ и свыше весьма подробно раскрыты в работах А.К. Лоханина. Так, в [3] предложены пути снижения уровней изоляции и испытательные напряжения силовых трансформаторов для различных уровней защиты. Для случая применения защитных аппаратов с уровнем ограничения грозовых перенапряжений 2,3 амплитудного значения $U_{н.р.ф}$ для класса напряжения 110 кВ предложены испытательные напряжения ПГИ и ОПЧ, равные 380 и 150 кВ соответственно. Необходимо отметить, что предложенные в [3] наряду с этим уровни изоляции для классов напряжения 330–750 кВ спустя почти два десятилетия нашли отражение в [4] (уровень

изоляции а) и ныне применяются в качестве основных уровней изоляции силовых трансформаторов.

В [13] был вновь поднят вопрос о целесообразности снижения испытательных напряжений масляных трансформаторов класса напряжения 110 кВ. Проведенные сопоставительные расчеты силовых трансформаторов мощностью 16000 и 63000 кВА этого класса напряжения показали, что переход к предложенным сниженным испытательным напряжениям обеспечивает снижение стоимости активных материалов на 6–8%; снижение потерь холостого хода на 6–8%; снижение суммарных потерь на 2–3%. Такое повышение технико-экономических показателей для масляных трансформаторов вряд ли можно считать существенным.

Вместе с тем, как отмечено ранее, снижение уровня изоляции открывает возможность создания экономически оправданных сухих трансформаторов класса напряжения 110 кВ с воздушно-барьерной изоляцией.

Ввиду того что электрическая прочность атмосферного воздуха при нормальных условиях более чем на порядок меньше прочности трансформаторного масла, основные габариты и технико-экономические показатели сухих трансформаторов 35 кВ и выше определяются главным образом изоляционными расстояниями. В неоднородных электрических полях и воздушных промежутках порядка сотен миллиметров, характерных для сухих трансформаторов 35 кВ и выше, напряжение полного разряда практически линейно зависит от размера воздушного промежутка. В этом случае указанное ранее снижение уровня изоляции позволило бы значительно сократить размеры основных изоляционных промежутков сухих трансформаторов 110 кВ. Дополнительного обоснованного снижения уровня изоляции без снижения надежности работы оборудования можно достичь за счет применения ОПН с более низкими остающимися напряжениями для более глубокого ограничения перенапряжений и при их установке в непосредственной близости от трансформатора.

Таблица 3

Стандарт	$U_{н.р.}$, кВ	Полный грозовой импульс, кВ	Переменное напряжение, кВ		
			приложенное одноминутное	индуцированное одноминутное, относительно земли (между фазами)	длительное, относительно земли (между фазами)
ГОСТ 1516.3-96	126	480	100 ¹⁾	200 (200)	—
IEC 60071-1:2011 IEC 60076-3:2000	123	450 550	Согласно уровню изоляции нейтрали. При этом уровень изоляции нейтрали в стандарте не нормирован, выбирается пользователями исходя из способа заземления нейтрали.	185 (185) 230 (230)	$1,5U_{н.р.}/\sqrt{3}$ ($1,3U_{н.р.}$ или $1,5U_{н.р.}$) ²⁾
CAN/CSA-C88-M90	123	450 550	$1,5U_{ном}$ ^{3, 4)}	$1,7U_{ном}/\sqrt{3}$ ($1,7U_{ном}$)	$1,5U_{ном}/\sqrt{3}$ ($1,5U_{ном}$)
IEEE Std C57.12.00-2006	121	350 450 550	140 ⁴⁾ 185 ⁴⁾ 230 ⁴⁾	120 (208) ⁵⁾	105 (182) ⁶⁾
IEEE Std C57.12.00-2010	121	350 450 550	34/95/17 ⁷⁾	120 (208)	105 (182)

¹ Прикладывают испытательное напряжение зажима нейтрали.

² В зависимости от схемы испытаний: $1,5\sqrt{3}U_{н.р.}/\sqrt{3} = 1,3U_{н.р.}$ при однофазном питании и $1,5U_{н.р.}$ при трехфазном питании.

³ $U_{ном}$ — номинальное напряжение обмотки высшего напряжения; испытание приложенным напряжением может быть заменено испытанием индуцированным напряжением при заземлении одного из неиспытываемых линейных зажимов обмотки ВН.

⁴ В стандарте нормированы только значения для обмотки с полной изоляцией нейтрали; для обмоток с неполной изоляцией — согласно выбранному уровню изоляции нейтрали.

⁵ Напряжение относительно земли определяют как $1,05\sqrt{3}U_{ном}/\sqrt{3} = 1,8U_{ном}/\sqrt{3}$.

⁶ Напряжение относительно земли определяют как $1,05\sqrt{3}U_{ном}/\sqrt{3} = 1,58U_{ном}/\sqrt{3}$.

⁷ Для случая глухозаземленной, заземленной через сопротивление и изолированной нейтрали трансформатора ответственно.

Анализ зарубежных стандартов в части требований к изоляции силовых трансформаторов на наибольшее рабочее напряжение 121–126 кВ. В свете снижения уровня изоляции силовых трансформаторов 110 кВ представляет интерес анализ зарубежных опыта и существующих норм, в частности стандартов МЭК, IEEE и др. (табл. 3).

В стандартах МЭК [12 и 14] для трансформаторов с наибольшим рабочим напряжением $U_{н.р} = 123$ кВ нормированы два уровня изоляции, по отношению к которым нормированный в ГОСТ 1516 уровень занимает промежуточное положение.

В канадском стандарте [15] и американском стандарте [16] на масляные трансформаторы с наибольшим рабочим напряжением 121–123 кВ в явном виде нет испытания индуктированным одноминутным переменным напряжением, как это принято в ГОСТ и МЭК. Проводят совмещенное испытание при трехфазном питании кратковременным и длительным переменным напряжением с измерением уровня частичных разрядов (ЧР), при котором в начале испытаний в течение 7200 периодов промышленной частоты (аналогично испытанию кратковременным переменным напряжением по ГОСТ и МЭК) прикладывают повышенное напряжение. В стандарте [15] значение повышенного напряжения относительно земли составляет 1,7 номинального фазного напряжения обмотки. В стандарте [16] нормировано значение напряжения относительно земли $1,05 \times 1,7 = 1,8$ номинального фазного напряжения обмотки, что составляет 120 кВ, при этом между фазами испытательное напряжение составляет 208 кВ. В части испытательного напряжения ПГИ в стандарте [16] в дополнение к имеющимся в МЭК и [15] уровням установлен еще один, более низкий – 350 кВ.

Сравнение практик испытаний трансформаторов с $U_{н.р}^3$ 121 кВ, принятых в стандартах ГОСТ 1516 и [16], наглядно показывает возможность снижения испытательных напряжений при должном уровне технологий и более надежного контроля качества изоляции путем внедрения приемосдаточных испытаний грозowymi импульсами и длитель-

ным переменным напряжением с измерением интенсивности ЧР (см. табл. 4).

Выбор уровня изоляции линейных зажимов сухих трансформаторов 110 кВ. Основой для определения уровня изоляции электрооборудования являются расчетные гроззовые и внутренние перенапряжения, принимаемые при координации изоляции и определяемые исходя из условий работы питающей сети и применяемых защитных аппаратов.

Как отмечается в [1], силовые трансформаторы 110 кВ – это, в первую очередь, распределительные трансформаторы, предназначенные для преобразования электрической энергии от сети 110 кВ к потребителю с номинальным напряжением 10 (20) кВ. Наиболее оправданным и целесообразным является применение сухих трансформаторов 110 кВ для обеспечения глубоких вводов в мегаполисах, на закрытых (в том числе подземных) и интеллектуальных необслуживаемых подстанциях – там, где применение масляных трансформаторов ограничено по соображениям взрыво- и пожаробезопасности. При этом сухой трансформатор 110 кВ будет работать в кабельной сети 110 кВ, питаемой от подстанции, например 220/110 кВ или 330/110 кВ. Такая кабельная сеть 110 кВ и установленное в ней электрооборудование не будут подвержены воздействию гроззовых перенапряжений, а потому в этой сети возможна установка электрооборудования с облегченной изоляцией.

Вместе с тем нельзя исключать возможность применения сухих трансформаторов 110 кВ на традиционных открытых распределительных устройствах, связанных с воздушными линиями (ВЛ) 110 кВ. В этом случае наибольший уровень гроззовых перенапряжений на сухом трансформаторе 110 кВ будет несколько выше, чем остающееся напряжение защитного аппарата.

Наибольший уровень коммутационных перенапряжений на сухом трансформаторе 110 кВ в общем случае не будет превышать остающегося напряжения применяемого ОПН.

Для сетей 110 кВ обычной практикой является применение ОПН с наибольшим длительно допус-

Таблица 4

Вид испытания	ГОСТ 1516	IEEE Std C57.12.00-2010 [16]
Испытания гроззовыми импульсами	Типовое испытание (за исключением автотрансформаторов 750 кВ и блочных трансформаторов для атомных станций)	Приемосдаточное
Испытание кратковременным индуктированным переменным напряжением	Приемосдаточное	Приемосдаточное для трансформаторов 115 кВ и выше. Совмещено с испытанием длительным переменным напряжением
Испытание длительным переменным напряжением	Приемосдаточное для трансформаторов 220 кВ и выше	Приемосдаточное для трансформаторов 115 кВ и выше

тимым напряжением $U_{нд}$, равным 77 кВ. ОПН с большим напряжением $U_{нд}$ могут потребоваться в особых случаях, когда в результате аварийной и плановой коммутации возможно выделение участка сети, на котором все нейтрали трансформаторов разземлены, а также в случае блочных и полублочных передач, когда трансформаторы коммутируются вместе с линией.

Оценка напряжений на ОПН при коммутационных и грозовых перенапряжениях может быть выполнена исходя из значений остающегося напряжения при импульсе тока 30/60 и 8/20 мкс соответственно, при токе координации, принимаемом 0,5 и 5 кА соответственно. В табл. 5 приведены характеристики современных ОПН разных производителей.

Как видно из табл. 5, для ограничителей одного напряжения $U_{нд}$ разных производителей характерны в целом близкие значения остающихся напряжений, отличаясь в большую или меньшую сторону в зависимости от энергоемкости ОПН.

На основании обобщения данных табл. 5 для целей координации изоляции можно принять следующие значения остающегося напряжения:

$U_{ост.ки} = 210$ кВ при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс, 0,5 кА;

$U_{ост.ги} = 250$ кВ при грозовом импульсе тока 8/20 мкс, 5 кА.

В принятом в отечественной практике методе координации изоляции в случае применения ОПН [4] выбор испытательных напряжений полного грозового импульса проводят непосредственно по остающемуся напряжению защитного аппарата:

$$U_{пги} = K_3 U_{ост.ги},$$

где K_3 – коэффициент запаса, принятый 1,35 для классов напряжения 330–750 кВ включительно и 1,25 для класса напряжения 1150 кВ.

Для сравнения в [7] в случае применения разрядников РВС для классов напряжения 110–220 кВ отношение $U_{пги}/U_{ост.ги} = 1,42, 1,43$.

Таблица 5

Тип ОПН	Наибольшее длительно допустимое напряжение $U_{нд}$, кВ	Остающееся напряжение на ОПН $U_{ост}$ (не более), кВ		Производитель
		коммутационный импульс тока 30/60 мкс, 0,5 кА	грозовой импульс тока 8/20 мкс, 5 кА	
ОПН-РК-110/77-10-680 УХЛ1	77	191	226	Таврида Электрик
ОПН-У-110/77-2-УХЛ1	77	193	230	ЛМ Электро
ОПН-У-110/77-3-УХЛ1	77	190	220	ЛМ Электро
ОПНп-110/550/77-10-III(IV)-УХЛ1	77	174	207	Полимер-Аппарат
ОПНп-110/800/77-10-III(IV)-УХЛ1	77	184	208	Полимер-Аппарат
РЕХЛИМ R 096-УН123 (II)	77	198	235	ABB
РЕХЛИМ Q 096-XV123 (III)	77	185	215	ABB
ОПНп-110/78/10/500-III-УХЛ1	78	190	231	Позитрон
ОПНп-110/78/10/850-III-УХЛ1	78	197	233	Позитрон
ОПН-110/80-10/650(II)	80	206	252	Феникс-88
ОПН-110/80-10/900(III)	80	183	229	Феникс-88
ОПН-У-110/80-2-УХЛ1	80	201	239	ЛМ Электро
ОПН-У-110/80-3-УХЛ1	80	196	227	ЛМ Электро
РЕХЛИМ R 102-УН123 (II)	82,6	210	250	ABB
РЕХЛИМ Q 102-XV123 (III)	82,6	196	228	ABB
ОПН-РК-110/83-10-680 УХЛ1	83	209	248	Таврида Электрик
ОПНп-110/83/10/500-III-УХЛ1	83	202	245	Позитрон
ОПНп-110/83/10/850-III-УХЛ1	83	210	248	Позитрон
ОПН-У-110/84-2-УХЛ1	84	211	251	ЛМ Электро
ОПН-У-110/84-3-УХЛ1	84	206	238	ЛМ Электро
ОПНп-110/550/84-10-III(IV)-УХЛ1	84	190	226	Полимер-Аппарат
ОПНп-110/800/84-10-III(IV)-УХЛ1	84	201	227	Полимер-Аппарат

Необходимо отметить, что при большой удаленности защитного аппарата максимальное напряжение на силовом трансформаторе 110 кВ может превышать значение $1,35-1,45U_{\text{ост.ги}}$ и в схеме тупиковой подстанции теоретически может достигать $2U_{\text{ост.ги}}$ [17]. Вместе с тем, принятие коэффициента K_3 , большего 1,4, приведет к тому, что грозовой импульс будет определяющим в выборе главных изоляционных промежутков трансформатора, снижение же испытательного напряжения грозового импульса обмотки высокого напряжения дает возможность почти пропорционально уменьшить изоляционные промежутки. С учетом коэффициента $K_3 = 1,4$ значение испытательного напряжения полного грозового импульса $U_{\text{пги}}$ может быть принято равным 350 кВ. На основании общепринятой мировой практики испытательное напряжение срезанного грозового импульса $U_{\text{сги}}$ может быть принято на 10% большим чем $U_{\text{пги}}$, т.е. равным 385 кВ.

Наряду с принятием $K_3 = 1,4$ необходимо ограничение допустимого расстояния между трансформатором и ОПН – нормированные в ПУЭ [18] минимальные расстояния должны быть уменьшены не менее чем в $(480-325)/(1,4U_{\text{ост.ги}} - U_{\text{ост.ги}}) = 1,45$ раза, где 480 кВ – испытательное напряжение полного грозового импульса по [7]; 325 кВ – остающееся напряжение разрядника РВС при токе 5 кА. Результаты пересчета значений минимальных расстояний для наиболее тяжелого случая – тупиковой подстанции с одной постоянно включенной ВЛ – приведены в табл. 6.

Таблица 6

Тип опор на подходах ВЛ к РУ и подстанциям	Длина защищенного тросом подхода ВЛ, км	Расстояние до силового трансформатора, м	
		1' ОПН	2' ОПН
С горизонтальным расположением проводов	1,0	21	34
	1,5	34	55
	2,0	48	69
	2,5	62	114
	3,0 и более	69	124
С негоризонтальным расположением проводов	1,0	10	14
	1,5	21	38
	2,0	34	52
	2,5	45	69
	3,0 и более	55	97

Дополнительное снижение напряжения полного грозового импульса можно обеспечить путем применения ОПН с более низким остающимся напряжением. Так, в ФГУП ВЭИ специально для защиты изоляции линейных зажимов обмоток сухого трансформатора разработан ОПН с $U_{\text{нд}} = 84$ кВ и остающимся напряжением при грозовом импульсе

тока 5 кА не более 225 кВ. В расчете на применение этого ограничителя с учетом изложенного подхода испытательное напряжение полного грозового импульса может быть принято равным $1,4 \cdot 225 = 315 \approx 325$ кВ (с округлением до ближайшего стандартного значения), а напряжение срезанного грозового импульса – 360 кВ.

Выбор испытательных одномоментных переменных напряжений в отечественном методе координации проводят исходя из расчетных коммутационных перенапряжений. Коммутационным перенапряжениям характерны более медленные изменения напряжения, в результате чего напряжения на ОПН и трансформаторе практически совпадают вне зависимости от того, установлен ли ОПН непосредственно на выводах трансформатора либо на некотором удалении от него. На основании этого испытательные одномоментные переменные напряжения $U_{\text{опч}}$ фазной изоляции выбирают по формуле

$$U_{\text{опч}} = U_{\text{ост.ки}} / (K_{\text{и}} K_{\text{к}} \sqrt{2}),$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент импульса, определяемый как отношение электрической прочности при кратковременных воздействиях к прочности при одномоментном воздействии напряжения 50 Гц; $K_{\text{к}}$ – коэффициент кумулятивности, учитывающий тот факт, что электрическая прочность внутренней изоляции в эксплуатации в условиях многократных воздействий может быть ниже прочности такой же изоляции, не находившейся в работе, в условиях испытаний.

В ГОСТ 1516 коэффициенты импульса и кумулятивности были приняты равными 1,35 и 0,9 соответственно, что соответствует случаю маслобарьерной изоляции силовых трансформаторов [2]. В случае сухих трансформаторов с основной воздушной изоляцией электрическая прочность коротких воздушных промежутков в рассматриваемом диапазоне длительностей воздействий почти не меняется и оба коэффициента могут быть приняты равными 1,0 [2]. Тогда испытательное одномоментное переменное напряжение может быть с некоторым запасом принято равным $210 / (1,0 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{2}) = 148,5 \approx 160$ кВ.

Для трехфазных двухобмоточных силовых трансформаторов 110 кВ испытательное одномоментное переменное напряжение междуфазной изоляции практически не определяет размеры основных изоляционных расстояний внутренней изоляции, и потому оно может быть принято в соответствии с [4] равным 200 кВ.

Выбор уровня изоляции нейтрали сухих трансформаторов 110 кВ. Особенностью силовых трансформаторов 110 кВ является возможность работы с

разземлением нейтрали, что требуется по условию ограничения токов короткого замыкания в сети. Изоляция разземляемой нейтрали этих трансформаторов должна быть защищена ОПН, к которым предъявляются следующие требования:

ОПН должны выдерживать в течение нескольких часов квазиустановившиеся перенапряжения при обрыве фазы линии (п. 4.2.152 [18]);

ОПН должны кратковременно в течение времени действия релейной защиты выдерживать напряжение, вызванное замыканием на землю.

В сети с эффективно заземленной нейтралью обрыв одной фазы приводит к появлению на нейтрали напряжения [19], равного в первом приближении половине наибольшего рабочего фазного, т.е. $0,5 \cdot 26/\sqrt{3} = 36,4$ кВ. Это определяет выбор ОПН с $U_{нд}$ не менее 37 кВ.

Напряжение на разземленной нейтрали U_0 при коротком замыкании на землю в сети без учета активных сопротивлений можно оценить как

$$U_0 = \frac{X_0}{X_1 + X_2 + X_3} U_{н.р.ф} = \frac{a}{a+2} U_{н.р.ф},$$

где X_1 , X_2 и X_0 – сопротивление сети прямой, обратной и нулевой последовательностей; $X_1 = X_2$; $a = X_0 / X_1$.

В сети с эффективно заземленной нейтралью a не превосходит 4, а установившееся напряжение на нейтрали при однофазном коротком замыкании не превышает $0,67 \cdot 26/\sqrt{3} = 48,5$ кВ; при $a \leq 3$ напряжение на нейтрали не превосходит 44 кВ (табл. 7).

Таблица 7

Значение а	Напряжение	
	U_0 , кВ/отн.ед.	$U_0/1,35$, кВ
2	36,4/0,500	26,9
3	43,6/0,600	32,3
4	48,5/0,667	35,9
5	52,0/0,714	38,5
6	54,6/0,750	40,4
7	56,6/0,778	41,9
8	58,2/0,800	43,1

ОПН способны выдерживать в течение короткого времени напряжение, превышающее длительно допустимое рабочее напряжение $U_{нд}$ (характеристика «напряжение–время»). Так, для времени воздействия до 10 с допустимое для современных ОПН напряжение составляет не менее $1,35 U_{нд}$. Исходя из этого для сети с эффективно заземленной по условию стойкости к кратковременному повы-

шению напряжения при однофазных коротких замыканиях длительно допустимое рабочее напряжение может быть выбрано равным не более 36 кВ.

Вместе с тем, при аварийных и нештатных режимах возможны повышения напряжения на нейтрали сверх указанных значений, которые нельзя не учитывать [2, 19], в частности, в следующих случаях:

выделение участка сети с неэффективно заземленной нейтралью (в результате оперативных переключений или от действия защит);

выделение участка сети с изолированной нейтралью (в результате оперативных переключений или от действия защит);

неполнофазные режимы включения трансформатора из-за неправильной работы коммутационных аппаратов.

В первом случае при $a \geq 5$ возможно появление на нейтрали трансформатора напряжения свыше 52 кВ, однако с учетом характеристики «напряжение–время» в широком диапазоне значений a следует считать допустимым применение ОПН с $U_{нд} = 44$ кВ (табл. 7).

В случае выделения участка сети с изолированной нейтралью и при включении трансформатора в сеть одной фазой напряжение на изолированной нейтрали трансформатора может достигать наибольшего рабочего фазного напряжения. При ограничении длительности такого режима до времени порядка секунд в этом случае может потребоваться применение ОПН с $U_{нд}$ не менее $126/\sqrt{3}/1,35 = 54$ кВ.

На основании изложенного представляется оправданным нормирование двух уровней изоляции нейтрали сухих трансформаторов 110 кВ:

уровень а1 – для участков сетей, в которых возможна работа с неэффективно заземленной нейтралью, при условии защиты ОПН с $U_{нд} = 44$ кВ;

уровень а2 – для участков сетей, в которых возможна кратковременная работа с изолированной нейтралью, при условии защиты ОПН с $U_{нд} = 56$ кВ.

Защитные характеристики ОПН с $U_{нд} = 44$ кВ и 56 кВ приведены в табл. 8.

Исходя из характеристик современных ОПН 110 кВ для защиты изоляции нейтрали трансформаторов и принимая с некоторым запасом ток координации при коммутационном и грозовом импульсе, равным 0,5 и 5 кА соответственно, для целей координации изоляции нейтрали можно принять следующие значения остающегося напряжения: $U_{ост.ки} = 20$ кВ и $U_{ост.ги} = 140$ кВ для $U_{нд} = 44$ кВ; $U_{ост.ки} = 140$ кВ и $U_{ост.ги} = 165$ кВ для $U_{нд} = 56$ кВ.

Таблица 8

Тип ОПН (производитель)	Значение $U_{нд}$, кВ	Остающееся напряжение на ОПН $U_{ост}$ (не более), кВ	
		коммутационный импульс тока 30/60 мкс, 0,5 кА	грозовой импульс тока 8/20 мкс, 5 кА
ОПНН-110/44-10(II) УХЛ1 (Феникс88)	44	109	127
ОПНН-П/ЗЭУ-110/44/10/550 УХЛ1 (ЗЭУ)	44	116	138
ОПН-РК-110/56-10-680 УХЛ 1 (Таврида Электрик)	56	139	165
ОПН - У - 110/56 - 3 УХЛ1 - III/A (ЛМ Электро)	56	134	160
ОПНН-110/56-10/900(III) 4 УХЛ1 (Феникс88)	56	138	163

Оценка требуемых испытательных напряжений по указанным значениям остающихся напряжений согласно принятому в отечественной практике методу координации [2] дает следующие результаты:

1) $U_{нд} = 44$ кВ: $U_{пги} = 1,21 \times 40 \approx 170$ кВ;
 $U_{опч} = 120 / (1,0 \times 0,0 \times \sqrt{3}) \approx 85$ кВ.

2) $U_{нд} = 56$ кВ: $U_{пги} = 1,21 \times 65 \approx 200$ кВ;
 $U_{опч} = 140 / (1,0 \times 0,0 \times \sqrt{3}) \approx 100$ кВ.

Необходимо отметить, что выпускаемые в настоящее время устройства РПН для сухих трансформаторов имеют испытательное одноминутное напряжение не выше 85 кВ, и до освоения РПН с испытательным напряжением 100 кВ и выше в сухих трансформаторах 110 кВ с регулированием напряжения в нейтрали возможно лишь применение вышеуказанного уровня $a1$.

Примечательно, что приведенные выше испытательные напряжения ПГИ 170 кВ и ОПЧ 85 кВ ранее уже имели место в 1950–1960 гг. для масляных трансформаторов 110 кВ. Применяемые в то время РПН также имели испытательное переменное напряжение не выше 85 кВ, и это значение было установлено ГОСТ 1516–60 в качестве испытательного напряжения нейтрали. Для защиты изоляции нейтрали требовался разрядник с низким пробивным напряжением. В первое время для этой цели применяли разрядник РВС-35, имеющий наибольшее допустимое напряжение (напряжение гашения) 40,5 кВ, и в эксплуатации отмечалось большое число повреждений таких разрядников, что связывалось с длительным воздействием напряжения, вызванного замыканием на землю или неполнофазными режимами и превосходящего напряжение гашения разрядника [2, 20, 21]. Для исключения повреждений было рекомендовано применение разрядника с большим напряжением гашения – составного из двух РВС-20 (напряжение гашения 48 кВ), что повлекло за собой увеличение для силовых трансформаторов 110 кВ испытательного переменного напряжения нейтрали до 100 кВ.

Испытание переменным напряжением с измерением интенсивности частичных разрядов. В связи с нормированием для сухих трансформаторов 110 кВ

сниженных уровней изоляции целесообразно помимо испытания одноминутным переменным напряжением установить испытание переменным напряжением с измерением характеристик частичных разрядов по процедуре МЭК [22] и по ГОСТ [23]. Процедура применяется для сухих трансформаторов классов напряжения до 35 кВ включительно и состоит в следующем. В начале испытания индуктированное междуфазное напряжение поднимают до значения $1,8U_N$ и выдерживают в течение 30 с, где U_N – номинальное напряжение. Затем напряжение плавно снижают до междуфазного значения $1,3U_N$ и выдерживают не менее 3 мин, в течение которых должны быть измерены характеристики частичных разрядов (рис. 2).

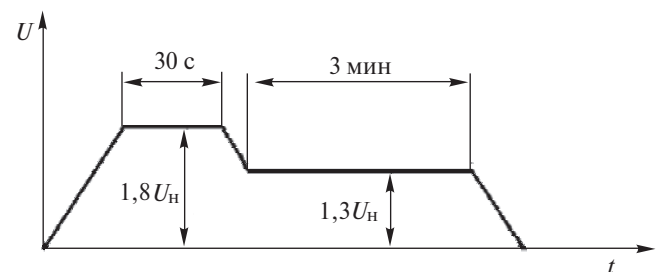


Рис. 3. Процедура испытаний с измерением характеристик частичных разрядов по ГОСТ Р 54827 (МЭК 60076-11)

Применительно к сухим трансформаторам класса напряжения 110 кВ в расчете на номинальное напряжение обмотки высшего напряжения $U_{ном.вн} = 115$ кВ, что является основным значением для первичных обмоток трансформаторов этого класса напряжения, уровни испытательных напряжений между линейными зажимами (относительно земли) могут быть приняты равными:

повышенному уровню напряжения $1,8 \times 115 = 207 \approx 200$ кВ (115 кВ);

уровню измерения интенсивности частичных разрядов $1,3 \times 115 = 150$ кВ (87 кВ).

В сухих трансформаторах широко применяют две конструкции обмоток – капсулированные обмотки и «открытые». В случае капсулированных обмоток с элементами литой изоляции допустимый

уровень частичных разрядов целесообразно ограничить на уровне 10–50 пКл, аналогично тому, как это было сделано для трансформаторов до 35 кВ включительно. Для открытых обмоток из обмоточного провода с коронистой изоляцией представляется возможным нормировать больший допустимый уровень частичных разрядов, который должен быть определен на основании опыта изготовления и испытаний сухих трансформаторов 110 кВ с такой изоляцией.

Типовые и приемосдаточные испытания электрической прочности изоляции сухих трансформаторов 110 кВ. Учитывая применение сниженных испытательных напряжений, с целью обеспечения более полной и тщательной проверки изоляции в объеме как типовых, так и приемосдаточных испытаний электрической прочности целесообразно установить следующие основные испытания:

напряжением полного и срезанного грозового импульса;

кратковременным (одноминутным) переменным напряжением;

переменным напряжением с измерением характеристик частичных разрядов.

Предлагаемые испытательные напряжения приведены в табл. 9.

Вывод обмотки ВН	Уровень изоляции	Испытательное напряжение внутренней и внешней изоляции, кВ			
		грозовых импульсов		кратковременное (одноминутное)	
		полный импульс	срезанный импульс	относительно земли	между линейными жазимами разных фаз
Линейный зажим	a1	325	360	160	200
	a2	350	385	160	200
Нейтраль	a1	170	—	85	—
	a2	200	—	100	—

Примечание. Уровни изоляции соответствуют применению ОПН с остающимися напряжением при коммутационном импульсе тока 0,5 кА и грозовом импульсе тока 5 кА соответственно (не более): линейный зажим: уровень 1 – 200 и 225 кВ, уровень 2 – 210 и 250 кВ; нейтраль: уровень 1 – 120 и 140 кВ, уровень 2 – 140 и 165 кВ.

Заключение. 1. Значения испытательных напряжений трансформаторов класса напряжения 110 кВ не подвергались корректировке и уточнению уже более 50 лет, несмотря на достигнутый значительный прогресс в средствах защиты от перенапряжений и широкое применение современных нелинейных ограничителей перенапряжений.

2. Практика испытаний, принятая в ряде зарубежных стран, показывает возможность снижения испытательных напряжений при должном уровне

технологий и более надежном контроле качества изоляции путем внедрения приемосдаточных испытаний грозowymi импульсами и переменным напряжением с измерением интенсивности ЧР.

3. Снижение уровня изоляции с учетом характеристик современных защитных аппаратов открывает возможность создания экономически оправданных сухих трансформаторов класса напряжения 110 кВ с воздушно-барьерной изоляцией.

4. Исходя из характеристик современных ОПН предложены уровни изоляции для линейных зажимов и нейтрали сухих трансформаторов класса напряжения 110 кВ. Целесообразно установить для сухих трансформаторов 110 кВ приемосдаточные испытания грозowymi импульсами, кратковременным (одноминутным) переменным напряжением и переменным напряжением с измерением характеристик частичных разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев С.И., Зенова В.П., Ларин В.С., Матвеев Д.А. О перспективе создания сухих трансформаторов 110 кВ. – Энергоэксперт, 2012, № 5, с. 68–73.

2. Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1969, 296 с.

3. Лоханин А.К. Перспективы снижения уровней изоляции и совершенствования методов испытаний силовых трансформаторов 110–750 кВ. – Электротехника, 1975, № 8, с. 32–34.

Таблица 9

4. ГОСТ 1516.3–96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М.: Изд-во стандартов, 1998, 54 с.

5. ГОСТ 15357–83. Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия, 2002.

6. ГОСТ 1516-42. Напряжения испытательные и разрядные высоковольтных трансформаторов, аппаратов и изоляторов, предназначенных для установок, связанных с воздушными сетями. – М.: Стандартгиз, 1942, 9 с.

7. ГОСТ 1516-60. Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытаний электрической прочности изоляции. – М.: Стандартгиз, 1960, 68 с.

8. ГОСТ 1516-68. Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытаний электрической прочности изоляции. – М.: Изд-во стандартов, 1968, 68 с.

9. ГОСТ 1516-73. Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытаний электрической прочности изоляции. – М.: Изд-во стандартов, 1973, 72 с.

10. ГОСТ 1516.1-76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М.: Изд-во стандартов, 1976, 60 с.

11. ГОСТ 20690-75. Электрооборудование переменного тока на напряжение 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции, 1995.

12. **IEC 60071-1.** Insulation co-ordination. Part 1: Definitions, principles and rules. Edition 8.1, 2011.

13. **Лоханин А.К., Пестряева Л.М., Шуняков В.С.** Технико-экономическая эффективность снижения уровня изоляции в силовых трансформаторах напряжением 110 кВ. — Сб. трудов VI Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности», Москва, 2010.

14. **IEC 60076-3 Ed.2.** Power transformers. Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air., 2000.

15. **CAN/CSA-C88-M90.** Power Transformers and Reactors, 2004.

16. **IEEE Std C57.12.00-2010.** IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, 2010.

17. **Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А.** Максимальные кратности грозовых перенапряжений на подстанции. — Изв. академии наук. Энергетика, 2012, № 2.

18. **Правила** устройства электроустановок. 7-е изд. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.

19. **Филатов А.А.** Обслуживание электрических подстанций оперативным персоналом. — М.: Энергоатомиздат, 1990, 304 с.

20. **Лихачев Ф.А.** Требования к уровням изоляции нейтралей трансформаторов 110-220 кВ. — Электрические станции, 1965, № 7, с. 54–60.

21. **Калиниченко И.С.** Защита изоляции разземленной нейтрали трансформаторов и защита от перенапряжений. — Электрические станции, 1965, № 7, с. 51–54.

22. **IEC 60076-11 Ed.1.** Power transformers — Part 11: Dry-type transformers, 2004.

23. **ГОСТ Р 54827-2011 (МЭК 60076-11:2004).** Трансформаторы сухие. Общие технические условия.

[02.09.13]

Автор: Ларин Василий Серафимович окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов». Начальник отдела трансформаторов ФГУП ВЭИ. Регулярный член Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в комитете А2 СИГРЭ, член рабочей группы МЭК 60076-3 («Уровни изоляции, испытания изоляции и внешние воздушные промежутки»).