

ВОПРОСЫ ИЗОЛЯЦИИ

УДК 621.315.626.027.3.004.6

О ПРИЧИНАХ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕРМЕТИЧНЫХ ВВОДОВ С БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПА

Евсеев Ю. А., канд. техн. наук, Кассихин С. Д.,
Куликов И. П., Савина Е. И., инженеры

СКБ завода «Изолятор»

Статистика аварийности силовых трансформаторов за последние годы (1984—1987 гг.) показала, что около 50 % повреждений трансформаторов связано с маслонаполненными высоковольтными вводами. По имеющимся данным удельная повреждаемость трансформаторных вводов незначительна и не имеет тенденции к увеличению. Однако задача определения причин выхода из строя вводов с целью повышения их надежности весьма актуальная, так как снижение повреждаемости вводов может дать заметный экономический эф-

фект, особенно с ростом единичных мощностей электрооборудования.

Установить непосредственную причину повреждения ввода весьма затруднительно из-за значительного разрушения как самого ввода, так и элементов трансформатора в месте установки ввода. Первоначально предполагалось, что повреждения вводов связаны в основном с нарушениями технологии их изготовления либо с их конструктивными особенностями. Однако в результате исследований конструкции и технологии не было установлено явной связи между технологическими и конструктивными особенностями вводов и их повреждаемостью в эксплуатации. Вместе с тем было отмечено изменение характера зависимости повреждаемости вводов от длительности эксплуатации. Если до середины 70-х годов до 60 % всех повреждений вводов из-за пробоя внутренней изоляции происходило в первые 2—3 года эксплуатации, то в 80-е годы наибольшая интенсивность отказов сместилась на более поздний период. Это

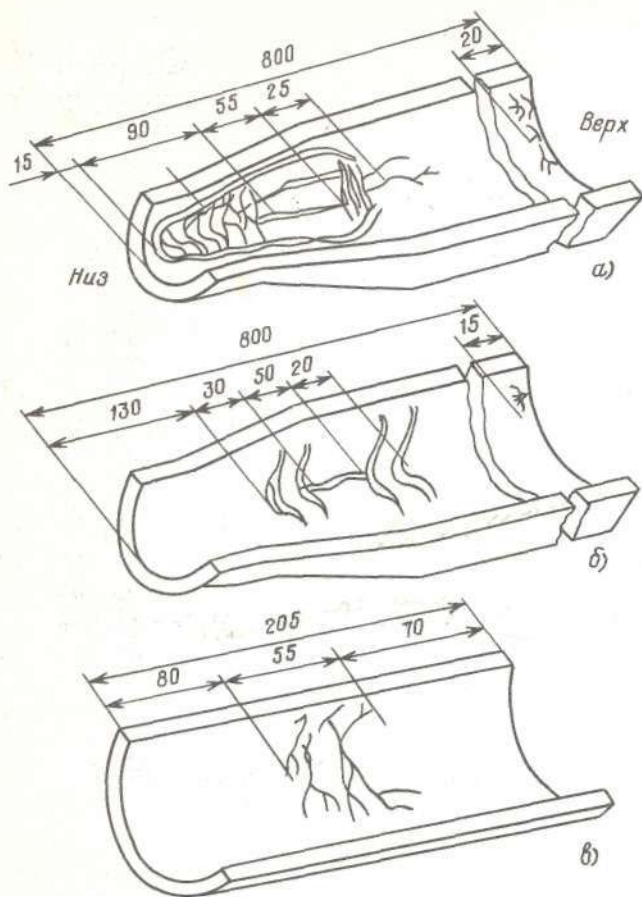


Рис. 1. Следы разрядов на внутренних поверхностях нижних фарфоровых покрышек вводов и модели: а — ввод после 11 лет эксплуатации; б — после 7 лет; в — модель после 1000 ч испытаний

дает основание полагать, что повреждения связаны не с дефектами изготовления вводов, а с ухудшением изоляционных свойств в процессе эксплуатации.

Анализ состояния герметичных вводов 110—150 кВ, эксплуатируемых в некоторых энергосистемах, показал, что тангенс угла диэлектрических потерь масла $\text{tg} \delta_m$ в ряде случаев превышает предельно допустимые нормы, предусмотренные действующими ПТЭ. Отмечено даже увеличение значения $\text{tg}_{90^\circ} \delta_m$ вплоть до 100 % при низком значении кислотного числа и сохранении высокого значения пробивного напряжения $U_{пр}$.

Разборка и осмотр около 100 герметичных высоковольтных вводов, забракованных по $\text{tg} \delta_m$, показали следующее:

в большинстве случаев на внутренних поверхностях нижних фарфоровых покрышек вводов имелся смывающийся желто-бурый осадок разной интенсивности. На верхних покрышках осадка не было;

у пяти вводов имелись следы незавершенных ползущих разрядов по желто-бурому осадку. Характер следов этих разрядов показан на рис. 1. Эти следы удалялись при смывании осадка с по-

верхности покрышки. Максимальная концентрация разветвленных следов ползущих разрядов наблюдалась на поверхности покрышек, где расчетная напряженность электрического поля на 10—20 % выше средней, но тем не менее значительно меньше принятых допустимых значений для масляного промежутка;

у трех вводах из указанных пяти со стороны заземленного фланца у края внутренней поверхности фарфора имелись также и слабые следы поверхностных разрядов, развивающихся навстречу нижним. Причем при расчетных условиях в этой области электрическое поле практически отсутствует.

Сопоставление этих фактов с результатами расследования аварий свидетельствует об однотипности сопутствующих признаков, а именно: пробой внутренней изоляции фиксировался при рабочем напряжении;

наибольшая интенсивность отказов отмечается после эксплуатации в течение 5—10 лет;

на нижних покрышках разрушенных вводов на внутренних поверхностях имеется осадок в виде желто-бурого налета и есть следы поверхностных разрядов. Следов разрядов на чистых покрышках без желто-бурого налета не наблюдалось.

В то же время электрические испытания в объеме типовых со специально отобранными вводами 150 кВ с наиболее высокими значениями $\text{tg}_{90^\circ} \delta_m$ показали, что вводы успешно выдержали все испытания, хотя после их разборки на нижних покрышках также был обнаружен желто-бурый налет различной степени интенсивности. Результаты этих испытаний приведены в табл. 1.

Представленная совокупность фактов свидетельствует о том, что процессы, приводящие к аварии, определяются рабочим напряжением со специфическими механизмами нарушения изоляции, не воспроизводимыми при кратковременных воздействиях испытательных напряжений.

К фактам, которые обращают на себя внимание, относится и наличие определенной связи с условиями эксплуатации и установкой вводов в трансформаторе, а именно, относительно высокая повреждаемость вводов на определенных типах трансформаторов. Например, 75 % аварий с вво-

Таблица 1

Параметр	№ ввода		
	1	2	3
$\text{tg}_{90^\circ} \delta_m$, %	75,5	71,8	99,9
$U_{пр}$, кВ	66	59	54
Испытательное напряжение 340 кВ частотой 50 Гц в течение 1 мин	Выдержали		
$\text{tg} \delta$ изоляции при $U_{исп}$ до $2U_{ф}$ (200 кВ)	Норма		
Уровень ЧР при $U_{исп}$ до $2U_{ф}$ (200 кВ), К	<10 ⁻¹¹		
Сопротивление фарфора (поверхностное) и внутренней изоляции, МОм	>4000		

дами 150 кВ вследствие разряда по поверхности нижней покрышки произошли на фазах А и С трансформаторов ТРДН 63 000, составляющих 20 % парка трансформаторов, на которых установлены эти вводы. Причем эти трансформаторы эксплуатировались в УССР. В то же время не наблюдалось повреждений этих вводов по данной причине в регионах страны с холодным климатом. Это указывает на связь как с температурным режимом, так и с напряженностью электрического поля E . Для фаз А и С напряженность поля во вводе по сравнению с напряженностью фазы В приблизительно на 20 % выше из-за условий установки.

На влияние температуры, при которой эксплуатировались вводы, указывает и факт высокой повреждаемости вводов 500 кВ, установленных на группе трансформаторов, работающих с повышенной температурой верхних слоев масла (примерно 80 °С).

Изложенные обстоятельства свидетельствуют о необходимости более глубоких исследований электрической прочности высоковольтных герметичных вводов при их длительной работе.

В связи с тем, что исследования механизма нарушения изоляционных свойств в натуральных условиях работы вводов крайне затруднительны, было признано целесообразным проведение подобных исследований на моделях вводов.

Модели ввода включали все основные конструктивные элементы герметичного высоковольтного ввода с реальными соотношениями между объемом бумаги, длиной краев конденсаторных обкладок, площадью соприкосновения резины и медесодержащих деталей с маслом. Конструкция модели представлена на рис. 2.

Испытания проводились на стенде длительных испытаний (СДИ), который позволял моделировать условия, близкие к условиям реальной работы вводов.

Намотка изоляционных остовов, их технологическая подготовка, а также сборка и заполнение моделей маслом осуществлялась по принятой на заводе «Изолятор» технологии изготовления герметичных высоковольтных вводов. Использовались трансформаторные масла марок Т-750 и ГК.

Испытания моделей проводились при температуре 70, 90 и 110 °С и при средних напряженностях в изоляции остова 3,7 и 4,5 кВ/мм. Длительность таких испытаний составляла 1000 ч. По окончании испытаний моделей производились измерения характеристик их изоляции, затем модели разбирались и тщательно осматривались.

Установлено, что на фарфоровых покрышках моделей как с маслом марки Т-750, так и марки ГК за время испытаний на СДИ образуется желто-бурый осадок. Интенсивность осадка с ростом температуры увеличивается. Если при 70 °С осадка практически не наблюдалось, то при 90 °С появлялся осадок желто-бурого цвета, а при 110 °С — коричневый. Практически характеристики внут-

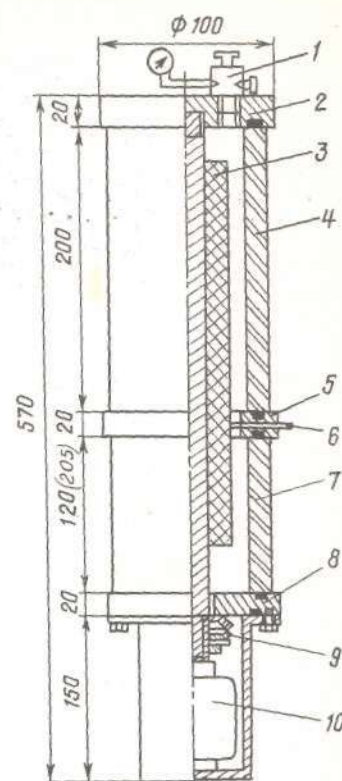


Рис. 2. Модель герметичного высоковольтного ввода с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа:

1 — вентиль с манометром; 2, 5, 8 — верхний, средний и нижний фланцы; 3 — изоляционный остов; 4, 7 — верхняя и нижняя фарфоровые покрышки; 6 — измерительный вывод; 9 — стяжной узел; 10 — компенсатор давления

ренней изоляции моделей, за исключением $\text{tg } \delta_m$, после испытаний оставались в пределах норм.

В табл. 2 приведены результаты испытаний моделей с маслами марок Т-750 и ГК при температуре 90 °С и средней напряженности 4,5 кВ/мм, сгруппированные по признаку интенсивности осадка.

Из данных табл. 2 следует, что масло Т-750 по сравнению с маслом ГК по интенсивности осадка и $\text{tg } \delta_m$ имеет значительно худшие значения. Однако испытания с добавкой в масле Т-750 деактивирующей присадки БЕТОЛ-1 дали положительные результаты по снижению $\text{tg } \delta_m$.

Таблица 2

Масло	Визуальная интенсивность осадка на нижней покрышке	Число моделей	$\text{tg } \delta, \%$		Влагодержание масла, г/т
			изоляции	масла	
Т-750	Сильная	15	0,35/0,71	0,44/4,6	5,0/15,2
	Средняя	5	0,38/0,95	0,44/14,2	5,0/19,3
	Слабая	4	0,33/0,86	0,44/7,75	5,0/20,5
	Отсутствует	0	—	—	—
ГК	Сильная	0	—	—	—
	Средняя	5	0,3/0,42	0,04/2,1	3,6/9,1
	Слабая	7	0,3/0,53	0,04/4,8	3,6/12,1
	Отсутствует	12	0,34/0,87	0,04/3,58	3,6/15,0

Примечания: 1. Приведены средние значения $\text{tg } \delta$ и влагосодержания.

2. Числитель — первоначальные данные; знаменатель — после старения в течение 1000 ч.

3. Измерения $\text{tg } \delta$ изоляции проводились для моделей в собранном виде с заземленного фланца, на который выведена последняя обкладка остова. В измеренную величину $\text{tg } \delta$ изоляции входят электрические потери как собственно изоляционного остова, так и фарфора с маслом.

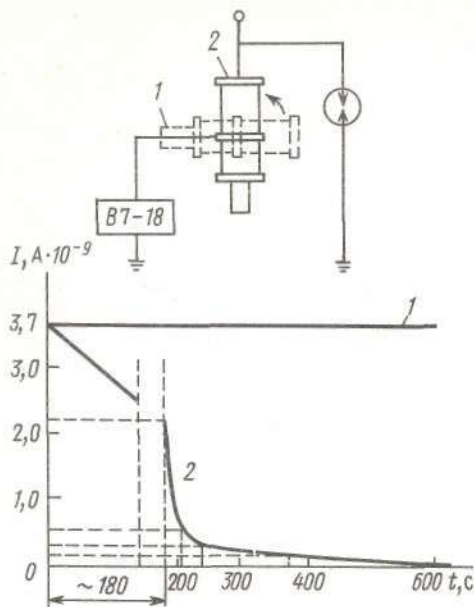


Рис. 3. Схема измерения токов проводимости в модели со слитым маслом и график зависимости тока проводимости от времени при $U=4$ кВ:
1 — модель расположена горизонтально; 2 — вертикально

На рис. 3 изображены схема измерений и график зависимости тока проводимости осадка на фарфоровой крышке модели от времени при высокостабилизированном постоянном напряжении, из которого следует, что сам осадок (без соприкосновения с маслом) не проводящий.

В табл. 3 и на рис. 4 представлены характерные результаты химического анализа осадков из моделей и вводов, выполненного в Физико-химическом институте им. Карпова и ВНИИ НП.

Результаты свидетельствуют о том, что по составу элементов осадки во вводах и моделях идентичны и содержат много серы, которая находилась либо в самом масле, либо вымывалась из резины, используемой во вводах и моделях в качестве

Таблица 3

Осадок	Zn	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe	Cu	K
Из ввода 150 кВ после 9 лет эксплуатации:									
собранный с нижней крышки	+	++	+++	+++	++	++	++	++	+
выделенной фильтрацией масла, слитого из ввода	+	++	+	+++		+	+	++	-
Собран с нижней крышки ввода 110 кВ после 6 лет эксплуатации	+	++	+	+++			+	++	-
Собран с крышки модели после испытаний на СДИ	+		+	+++	++	+	+	++	+

Примечание. + — мало; ++ — среднее количество; +++ — много.

уплотнений. Входной контроль заливаемого масла в модели не выявлял в нем содержания серы. Поэтому для установления факта взаимодействия масла с резиной были проведены специальные опыты, в которых искусственно исключался непосредственный контакт отдельных конструктивных материалов, в том числе и резины, с маслом.

Резина в моделях закрывалась лавсановой пленкой, а латунь — напылением оксидной изоляции. Результаты данных испытаний приведены далее.

Масло — бумага — резина (исключена латунь)	Осадок слабой интенсивности
Масло — бумага — латунь (исключена резина)	Осадок отсутствует, следы осадка в виде потеков только в местах неплотной замотки резины
Масло — бумага (исключены латунь и резина)	Осадок отсутствует
Латунь — резина (исключена бумага, площадь соприкосновения латуни с маслом значительно увеличена)	Осадок сильной интенсивности

Также были проведены исследования по взаимодействию масел марок Т-750 и ГК с резиной различных марок в присутствии медесодержащих материалов и без них только при тепловом воздействии. Опыты проводились при температуре 95 °С в течение 1000 ч с измерением $\text{tg } \delta_m$ в промежуточных точках. Результаты, представленные на рис. 5 и 6, показывают, что для резины типа УМ (ранее МТМ), рекомендуемых в настоящее время как маслястойкие согласно ГОСТ 12855-77 «Пластина резиновая для трансформаторов», в первые 200 ч происходит увеличение $\text{tg } \delta_m$ и появление в масле осадка в виде мелкодисперсных частиц. Затем частицы коагулируются, выпадают в осадок и $\text{tg } \delta_m$ снижается. Испытания масел с образцами различных марок резины показали, что только с резиной на основе фторсиликоновых каучуков

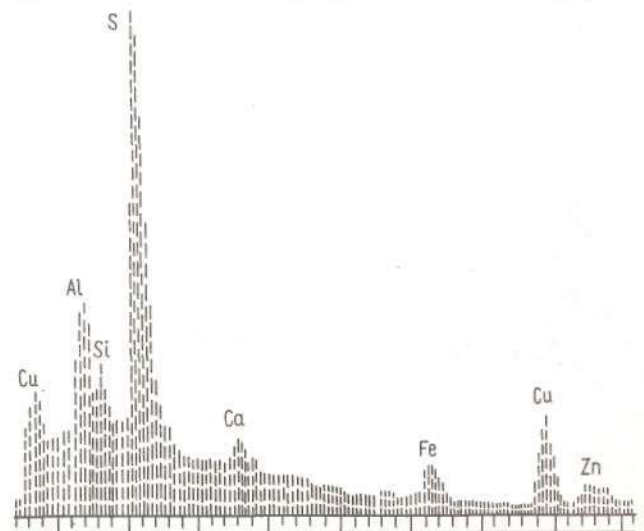


Рис. 4. Рентгеновская спектрограмма осадка, собранная с нижней крышки ввода

получены удовлетворительные результаты. Значение $\text{tg } \delta_m$ по сравнению с исходным практически не изменилось даже в присутствии медесодержащих материалов, осадков выпало значительно меньше, чем с резинами типа УМ. Необходимо отметить, что масло само в процессе длительного старения также дает осадок, на интенсивность выпадения которого оказывает большое влияние групповой состав масел.

Важным фактом испытаний моделей вводов явилось обнаружение в двух моделях (из общего числа испытанных около 150 шт.) на внутренней поверхности фарфора следов поверхностных разрядов по желто-бурому осадку (рис. 1). Эти разряды специально не были спровоцированы в отличие от ряда экспериментов, где искусственно создавались условия для возникновения частичных разрядов. Это непосредственно указывает на то, что осадок способствует развитию поверхностных ползущих разрядов. В моделях отсутствовали детали, покрытые лаком, грунтом, количество механических примесей было менее 5 г/т.

Таким образом, результаты испытаний подтверждают, что образование и отложение осадка на фарфоровых покрышках связано с процессами старения масла из-за взаимодействия с резиной в присутствии медесодержащих материалов, а не с конструктивными особенностями высоковольтных вводов и технологическими отклонениями при покрытии деталей лаком и грунтом.

В настоящее время продолжают исследования по изучению непосредственной причины возникновения поверхностных разрядов на границе жидкого и твердого диэлектриков (масло — фарфор с осадком). На основании уже имеющихся экспериментальных и расчетных данных можно полагать, что первопричиной ползущих разрядов

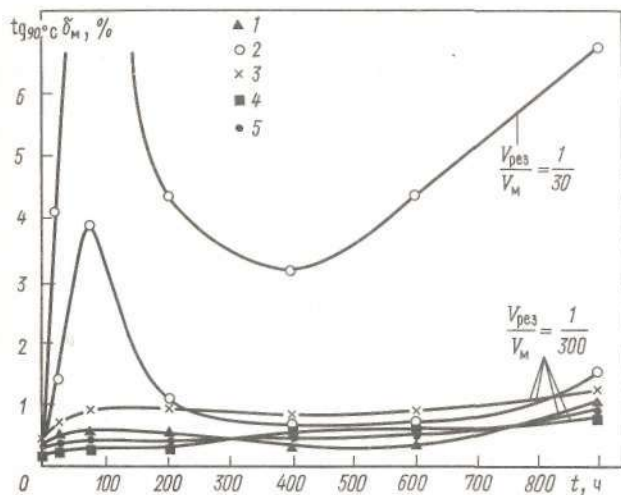


Рис. 5. График зависимости $\text{tg } \delta_m$ марки Т-750 от времени теплового старения:

1 — масло без резины; 2 — масло — резина Московского завода РТИ; 3 — масло — резина московского завода РТИ без пластификатора; 4 — масло — резина на основе фторсиликоновых каучуков; 5 — масло — резина на основе фторсиликоновых каучуков — латунь

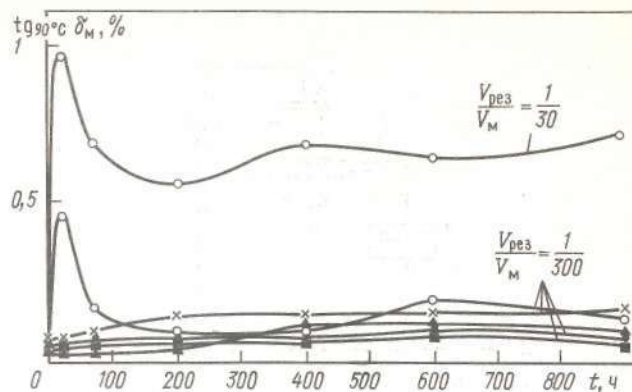


Рис. 6. График зависимости $\text{tg } \delta_m$ марки ГК от времени теплового старения (обозначения см. на рис. 5).

являются ЧР, возникновение которых может быть связано со следующими механизмами:

наличием примесных частиц в заливаемом масле или образовавшихся в процессе старения, их скоплением в местах с неоднородной конфигурацией электрического поля;

перераспределением электрических полей из-за резко отличающихся значений поверхностной проводимости изоляционного остова, покрышки с налетом и без него, объемной проводимости масла; электрохимической природой образования древовидных токопроводящих следов в осадке на поверхности фарфора.

Следует отметить, что только при наличии осадка на поверхности фарфора эти механизмы возникновения ЧР могут приводить к медленному развитию ползущего разряда.

В табл. 4 приведены характерные результаты хроматографического анализа масла Т-750 из моделей вводов после испытаний.

Модели № 9 — 12 испытывались со специально заложенными дефектами следующих видов: № 9 — острый край под полным потенциалом, касающийся фарфоровой покрышки; № 10 — фарфоровая покрышка с желто-бурым налетом от предыдущих испытаний; № 11 — металлическая

Таблица 4

№ п/п	Т, °С	Е, кВ/мм	Выделившиеся газы, мкл/л						
			H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
1	70	4,5	8,98	3,98	205,8	2109	Отс.	След	0,7
2	70	4,5	Отс.	2,96	149,7	2637	»	Отс.	Отс.
3	70	4,5	0,8	2,8	140,7	2300	»	След	Отс.
4	90	4,5	4,25	11,1	151,9	4070	»	1,03	Отс.
5	90	4,5	33,8	26,7	180,8	3140	»	9,6	0,18
6	90	4,5	Отс.	12,5	208,9	5754	»	Отс.	Отс.
7	70	3,6	20,3	5,4	320	3163	»	»	0,9
8	90	3,6	6,5	6,76	251	3756	»	»	Отс.
9	110	3,6	912	56,6	578,9	23 459	»	»	0,6
10	110	3,6	103,7	73,3	167,9	5215	4,06	36,7	Отс.
11	110	3,6	109,5	34,0	591,4	10 804	Отс.	Отс.	0,29
12	110	3,6	20 829	9538	5251	23 960	Отс.	4610,3	70,1

стружка под свободным потенциалом в масле; № 12 — острый край под полным потенциалом, фарфоровая крышка с желто-бурым налетом, увлажненный остов, влагосодержание заливаемого масла 83 г/т.

На основании проведенных исследований для предотвращения повреждений высоковольтных герметичных вводов, заполненных маслом марки Т-750 и ему подобным по групповому составу, можно рекомендовать следующее:

выявить вводы, у которых наблюдается динамика увеличения $\operatorname{tg} \delta_3$ за время эксплуатации, особенно у трансформаторов и реакторов, длительно работающих с температурой масла, превышающей 60 °С;

отобрать пробы масла для измерения $\operatorname{tg} \delta_m$ при температуре 20 и 90 °С и проведения хроматографического анализа растворенных газов из вводов, у которых значение $\operatorname{tg} \delta_m$ превышает значения, рекомендованные нормами испытания электрооборудования (1978 г.);

если для вводов $\operatorname{tg}_{90^\circ} \delta_m$ превышает 10 %, а содержание в масле $\text{H}_2 \geq 0,1$ %, сумма $\text{C}_x\text{H}_y \geq 0,01$ % и $\text{C}_2\text{H}_2 \geq 0,001$ %, то вводы подлежат замене;

если для вводов $\operatorname{tg}_{90^\circ} \delta_m$ превышает 10 %, а содержание в масле $\text{H}_2 < 0,02$ %, $\text{C}_x\text{H}_y < 0,01$ % и $\text{C}_2\text{H}_2 < 0,0001$ %, то во вводах необходимо произвести замену масла или ввести деактивирующую присадку БЕТОЛ-1 в количестве 0,02 % массы масла (только для вводов до 330 кВ) и произвести повторный контроль масла в течение года.

Выводы

1. Повреждения вводов выпуска 1970—1984 гг., заполненных маслом Т-750, как правило, происходили в результате развития ползущих разрядов по желто-бурому налету (осадку), отложившемуся в процессе эксплуатации на внутренней поверхности нижней фарфоровой крышки. Наличие осадка способствует возникновению и развитию разрядов при рабочем напряжении.

2. Основной причиной образования осадка и осаждения его на поверхность фарфоровых крышек является ускоренное старение трансформаторного масла из-за взаимодействия его с резиной марки УМ (ранее МТМ) в присутствии медесодержащих материалов.

3. Интенсивность осадка возрастает с повышением температуры в процессе эксплуатации вводов, определяемой режимами работы трансформаторов, а также влиянием электрических полей, связанных с установкой ввода в трансформаторе. В связи с этим необходимо обратить внимание на конструкцию места установки ввода в трансформаторе и условия эксплуатации трансформатора с целью исключения повышенных значений напряженности электрического поля и длительных превышений температуры масла в месте установки погружной части ввода.

4. Целесообразно для выявления развивающихся разрядов по фарфоровым крышкам контролировать состояние масла из вводов методом хроматографического анализа растворенных газов.