

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

Соколов В. В., Ванин Б. В., Носулько Д. Р.,
Назаров А.И., кандидаты техн. наук

Запорожтрансформатор — ВНИИЭ — Днепроэнерго

Задачи контроля состояния высоковольтного оборудования вытекают из необходимости оценки вероятных причин его отказов и должны корректироваться по результатам опыта эксплуатации с учетом особенностей конструкции и условий работы.

Случаи повреждения изоляции герметичных трансформаторных вводов 110—150 кВ в последние годы и результаты обследования характеристик вводов в энергосистемах [1] показывают необходимость совершенствования нормированной системы их профилактических испытаний.

Традиционно испытания аппаратов с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа направлены на выявление дефектов в изоляционном остова посредством измерения его электрических характеристик. Однако принятые меры по улучшению технологии изготовления вводов и совершенствования их конструкции при практически неизменных за последние 30 лет предельных электрических рабочих нагрузках на изоляцию обусловили весьма малую вероятность повреждения бумажного остова в эксплуатации. Кроме того, специальные опыты показали, что в конструкциях аппаратов сверхвысокого напряжения начальное повреждение, возникающее в одной-двух обкладках, развивается весьма быстро (часы, десятки минут), что практически исключает его выявление при периодических профилактических испытаниях, так что эффективным средством диагностики оказывается лишь устройство типа КИВ, а также анализ растворенных в масле газов.

Отказы внутренней изоляции вводов за последние 15 лет в основном связаны со снижением электрической прочности на участке «токоведущий стержень — поверхность остова — масло — внутренняя поверхность фарфора» (рис. 1) в результате проникновения воды в масло (в негерметичных вводах пробой в нижней части остова), оседания на поверхности остова металлической пыли (разряды по поверхности), образования в масле проводящего осадка и отложения его на внутренней поверхности крышки (перекрытие по нижней фарфоровой крышке).

С точки зрения диагностики в механизме таких повреждений важно выделить две стадии.

На первой стадии происходит сравнительно медленное снижение электрической прочности участка изоляции вследствие увеличения проводимости, тангенса угла диэлектрических потерь масла $tg\delta_m$, поверхностной проводимости остова и фарфора, а также снижения прочности масла и образования условий для ионизационных явлений. Следовательно, о степени ухудшения изоляции на этой стадии можно судить по изменению характеристик масла, поверхностной проводимости остова и фарфора.

На второй стадии возникают частичные и скользящие разряды, завершающиеся при некоторых условиях полным перекрытием с потенциальнонесущих на заземленные детали ввода. Эта стадия отличается образованием в масле горючих газов.

С учетом изложенного далее сделана попытка определить эффективные методы диагностики некоторых характерных дефектов преимущественно во вводах без измерительного конденсатора, у которых заземление последней обкладки выполнено через измерительный вывод снаружи ввода.

Оценка диэлектрических характеристик масла на вводе без отбора пробы. В [1] показано, что для оценки состояния масла с точки зрения контроля появления в нем мелкодисперсных и растворенных проводящих примесей достаточно определение $tg\delta_m$.

Малый объем масла во вводах 110—220 кВ существенно затрудняет регулярный контроль путем отбора и анализа проб. Полная отдача сильфонов, компенсирующих температурное изменение объема масла в конструкциях серийных вводов 110—150 кВ, составляет 1,5—2 л, так что после отбора пробы (0,5 л) возникает необходимость последующего трудоемкого долива масла. Характеристика пробы масла не всегда соответствует его фактическому состоянию в оборудовании, поскольку часть примесей может не попасть в пробу.

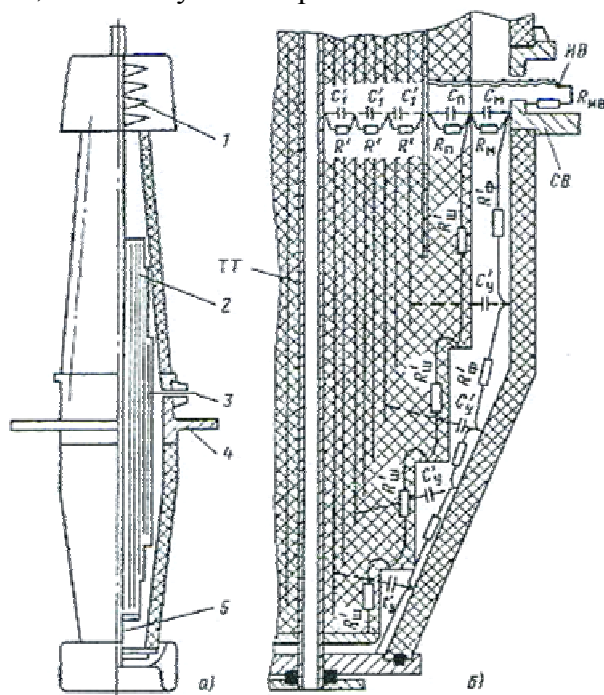


Рис. 1. Типичная конструкция маслонаполненного ввода конденсаторного типа и ее схема замещения:

а – осевой разрез герметичного ввода; 1 – компенсирующие сильфоны; 2 – остов изоляционный; 3 – измерительный вывод (ИВ); 4 – соединительная втулка (СВ); 5 – токоведущая труба (ТТ); б – осевой разрез нижней части ввода; C_1 – емкость изоляционного слоя бумаги между двумя соседними обкладками остова; R – сопротивление этого слоя; C_m – емкость масляного промежутка между бумажной подмоткой и заземленными частями; R_m – сопротивление этого слоя; $R_{ив}$ – сопротивление пути утечки от измерительного вывода на заземленные части; $R_{ш}$, C_v – сопротивление участка проводящего отложения на поверхности остова и емкость этого участка на внутреннюю поверхность фарфора; $R_{ф}$ – сопротивление участка, проводящего отложения на внутренней поверхности фарфора

Указанные недостатки могут быть устранены, если оценку характеристик масла осуществлять непосредственно в оборудовании, используя в качестве электродов элементы его конструкции.

На рис. 1 показана типичная конструкция ввода и на рис. 2 — упрощенные электрические схемы замещения существенных элементов изоляции, из которых видно, что оценка $tg\delta_m$ может быть выполнена путем измерения тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_3$ участка изоляции между заземляемой обкладкой и соединительной втулкой (рис. 2,б), представляющего тонкий слой бумажной подмотки и слой масла

$$tg\delta_3 = tg\delta_m \frac{1}{1 + \alpha} + tg\delta_{\delta.n.} \frac{\alpha}{1 + \alpha} + tg\delta_{\delta.n.}, \quad (1)$$

где $\delta_{\delta.n.}$ — тангенс угла диэлектрических потерь подмотки; $tg\delta_{\delta.n.}$ — добавка за счет загрязнения изолятора измерительного вывода (ИВ), а также некомпенсированных внешних помех; $\alpha = C_m/C_{\delta.n.}$ — отношение емкостей масляного промежутка и подмотки.

Рассмотрим температурную зависимость $tg\delta_3$.

Зависимость $tg\delta_m$ от температуры в интервале $(t_1 — t_2)$ представляется выражением

$$tg\delta_m(t_1) = tg\delta_m(t_2)e^{\beta(t_1-t_2)}, \quad (2)$$

где ϵ — температурный коэффициент.

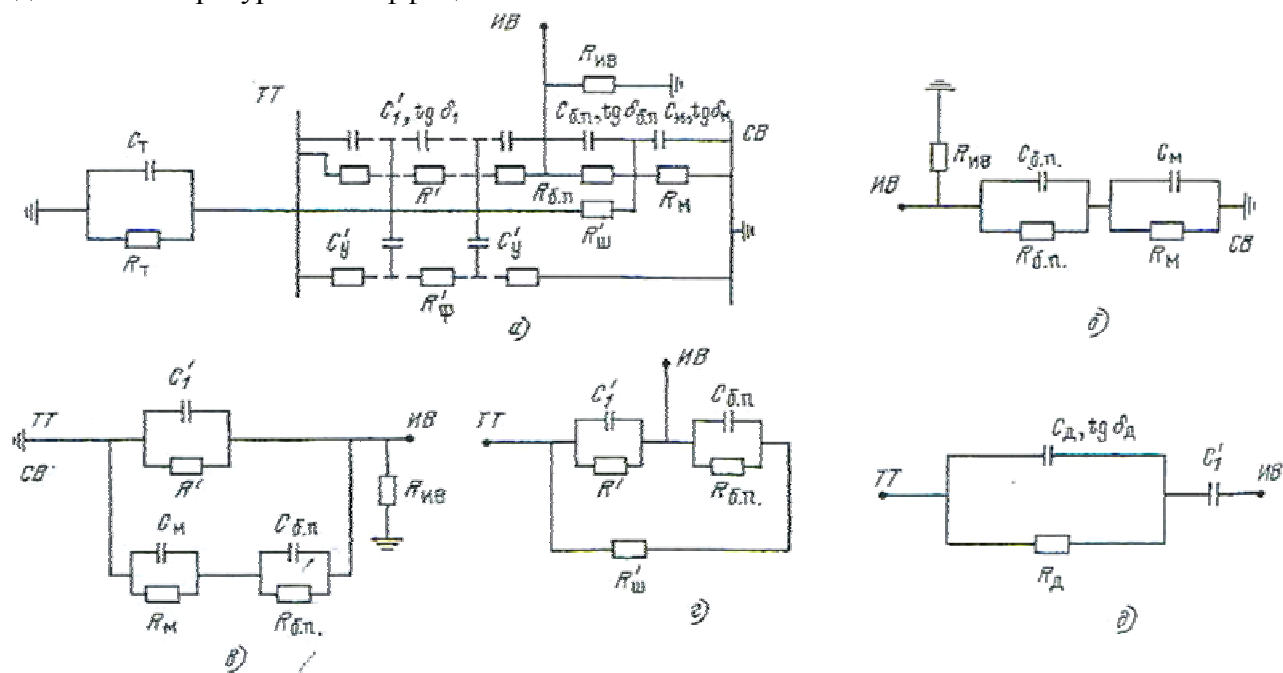


Рис.2. Схема замещения растекания токов утечки во внутренней части ввода:
 а — общая схема замещения; C_T , R_T — емкость и сопротивление изоляции обмотки трансформатора; C'_1 , $\text{tg} \delta_1$ — эквивалентные емкость и тангенс угла диэлектрических потерь остова; $R_{\text{ш}}$ — поверхностное сопротивление отложенного проводящего слоя; $C_{\text{б.п.}}$, $\text{tg} \delta_{\text{б.п.}}$ — эквивалентные емкость и тангенс угла диэлектрических потерь бумажной обмотки; б — схема замещения участка 3 при измерении эквивалентных C_3 , $\text{tg} \delta_3$ (экран и ТТ объединены); в — схема замещения участка 3г при измерении эквивалентных $C_{3\text{г}}$, $\text{tg} \delta_{3\text{г}}$ (без расшиновки трансформатора, ТТ и СВ объединены); г — схема замещения участка ввода при наличии проводящего слоя на поверхности остова; д — схема замещения участка ввода при наличии внутреннего дефекта; C_d , $\text{tg} \delta_d$ — емкость и тангенс угла диэлектрических потерь дефектного участка.

Анализ проб масла из вводов, имеющих характерный осадок в масле и на поверхности фарфора показал, что в интервале их температур 20—50, 50—70°C среднее значение $\bar{\beta}$ и его стандартное отклонение σ составили величины 0,04 и 0,011 соответственно. В интервале температур 70—90°C $\bar{\beta}$ оказалось существенно ниже 0,028, а разброс σ увеличился (0,03) по причине изменения состояния осадка в масле. В некоторых случаях $\text{tg} \delta_m$ при 90°C оказывался ниже, чем при 70°C, а длительная выдержка при 90—100°C приводила к существенному снижению $\text{tg} \delta_m$ (видимо, из-за коагуляции и выпадения осадка).

Последнее обстоятельство показывает, что в эксплуатации значение $\text{tg} \delta_m$ целесообразно нормировать при рабочих температурах оборудования 20, 50, 70°C, а не при 90°C, как это установлено для масла при его изготовлении.

Тангенс угла диэлектрических потерь пропитанной маслом целлюлозной изоляции при небольшом содержании в ней влаги (менее 1 %) при изменении температуры в интервале 10—80°C не превышает 0,6 %, что позволяет ориентироваться на эту величину как на допустимую для герметичных вводов, находящихся в эксплуатации, и не вносить какие-либо температурные поправки.

Таким образом, температурное изменение $\text{tg} \delta_3$ в (1) определяется в основном $\text{tg} \delta_m$. Учитывая, что емкость масляного промежутка существенно меньше емкости бумажной подмотки (обычно $\epsilon = 0,1—0,5$), абсолютное значение $\text{tg} \delta_3$ в основном определяется величиной $\text{tg} \delta_m$.

Для проверки этого утверждения в Днепроэнерго было проведено исследование температурных зависимостей характеристик вводов 150 кВ. снятых с эксплуатации.

На рис. 3, а, б показаны полученные температурные зависимости $\text{tg} \delta_1$ и $\text{tg} \delta_3$ соответствующих участков изоляции вводов с ухудшенными и нормальными

характеристиками масла, а также температурные зависимости $tg\delta$ проб масла из этих вводов. На рис. 3, в приведена корреляционная зависимость $tg\delta_3$ и $tg\delta_m$.

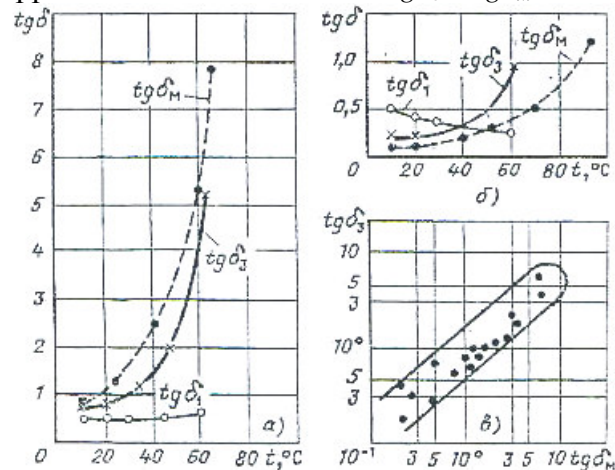


Рис. 3. Влияние температуры на тангенс угла диэлектрических потерь участка 3, масла и остова ввода:

а — «плохое» масло; б — «хорошее» масло; в — корреляция тангенсов угла диэлектрических потерь масла и участка 3 для шести обследованных вводов

Из рис. 3 видно, что значения $tg\delta_3$ четко следуют изменению $tg\delta_m$. Вместе с тем при температурах масла во вводе ниже 20—30°C (обычные условия при профилактических испытаниях) влияние $tg\delta_m$ из-за сравнительно малых абсолютных значений оказывается значительно слабее. Неучет температуры, по-видимому, — основная причина неопределенности в оценке $tg\delta_3$ в эксплуатации.

Другой важный фактор, влияющий на значение $tg\delta_3$, — состояние изоляции измерительного вывода. Возможное увеличение $tg\delta$ от потерь на сопротивление изоляции $R_{ИВ}$ можно оценить из выражения

$$\Delta tg\delta_{3ИВ} = \frac{1}{\pi C_3 R_{ИВ}}. \quad (3)$$

Значение $R_{ИВ}$ нормируется на уровне ≥ 1500 МОм при изготовлении, ≥ 1000 МОм при монтаже и ≥ 500 МОм в эксплуатации, что оправдано для случаев измерения объектов с большой емкостью (более 3000—5000 пФ), но недостаточно для случаев измерения $tg\delta_3$ вводов емкостью 110—200 пФ, C_3 которых составляет 200—600 пФ. Так, для вводов ГМТА-110/2000 с емкостью $C_3 = 200$ пФ возрастание $\Delta tg\delta$ даже при заводской норме $R_{ИВ}$ может достигнуть 3 %.

Специальная проверка влияния $R_{ИВ}$ на $tg\delta_3$, выполненная на вводах 150 кВ C_3 — 800-1000 пФ посредством увлажнения изолятора ИВ подтвердила, что при нормированных $R_{ИВ}$ погрешность определения $tg\delta_3$ может превышать основную величину. Так, при $R_{ИВ} = 3000$ МОм величины $tg\delta_3$ составили 0,5—0,7%, при 1500 МОм — (1 — 1,5)% и при 500 МОм (1,7—2,0) %.

Очевидно, что значения $R_{ИВ}$ целесообразно нормировать с учетом величины емкости C_3 , например, с помощью графика на рис. 4, а, где область выше кривой 2 соответствует $tg\delta_{3ИВ} \leq 0,2\%$ и удовлетворяет требованиям надежного измерения $tg\delta_3$; область между кривыми 1 и 2 соответствует $0,5 \geq \Delta tg\delta_{3ИВ} \geq 0,2$ % и может быть принята для индикации дефекта, приводящего к повышению $tg\delta_3$; при сложности достижения высоких значений $R_{ИВ}$ (например, из-за погодных условий) при значениях $R_{ИВ}$ в области ниже кривой 1 измерять $tg\delta$ без чистки изоляций нецелесообразно.

Влияние $tg\delta_{o.n}$ на $tg\delta_3$ может быть существенно лишь при сильном увлажнении (при непосредственном контакте остова с атмосферой в процессе сборки на заводе или ремонта). Так, при температуре 40°C значения $tg\delta_{o.n}$, равные 1, 2, 10% примерно соответствуют влажности бумаги 2; 4; 5.3 %. Очевидно, что даже при снижении влажности до уровня ≤ 2 %,

например, посредством вакуумной обработки при остаточном давлении $P \leq 1$ мм рт. ст., влияние $tg\delta_{б.н}$ на $tg\delta_3$ может быть незначительным.

С учетом изложенного на рис. 4, б построены кривые ориентировочно допустимых величин $tg\delta_3$ в эксплуатации из следующих условий: $\delta = 0,1$, $tg\delta_{б.н} = 1\%$, $tg\delta = 0,5\%$, наибольшего допустимого значения $tg\delta_M$ равно 7% при 70° и удовлетворительного значения $tg\delta_M \leq 3,0\%$ при 70°C . В области значений $tg\delta_3$ выше кривой 1 можно ожидать недопустимое повышение $tg\delta_M$, что требует более детальной проверки, в области между кривыми 1 и 2 можно ожидать прогрессирующее увеличение $tg\delta_M$, что требует проведения повторной проверки, например, через год эксплуатации.

Значение $tg\delta_M$ при достаточно ограниченных внешних влияниях может быть оценено из (1)

$$tg\delta_M \approx tg\delta_3(1 + \alpha) - tg\delta_{б.н} \alpha \quad (4)$$

где $tg\delta_M \approx tg\delta_1$.

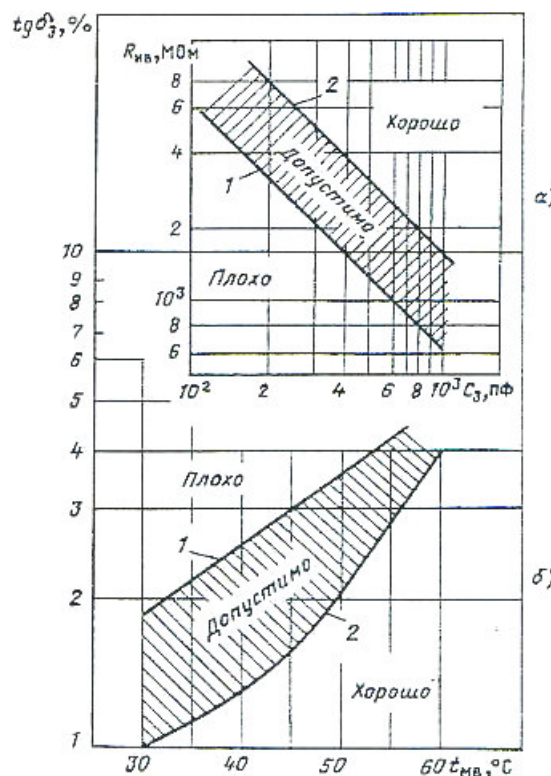


Рис. 4. Примерная оценка сопротивления пути утечки на заземленные части от емкости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от температуры (б) при различном состоянии масла (для участка 3)

Обязательное условие при оценке масла по выражению (4) — подогрев ввода до температуры $t_{мв} \geq 30^\circ\text{C}$; которая может быть определена по данным температуры верхних слоев масла в трансформаторе $t_{в.с.м.}$ и окружающего воздуха $t_{окр}$ из выражения

$$t_{м.в} = mt_{окр} + (1 - m)t_{в.с.м}, \quad (5)$$

где m — коэффициент, зависящий от соотношения поверхностей и тепловых сопротивлений участков ввода, погруженного в масло и находящегося на воздухе. По данным СКТБ ВВ современным конструкциям вводов 110—220 кВ лучше всего соответствует $m = 0,5$.

Значение $t_{м.в}$ может быть оценено по величине давления масла с помощью известной зависимости давления от температуры, что позволяет учесть, кроме того, подогрев ввода от солнечного излучения и других факторов.

Однако оценить и устранить внешние влияния на $tg\delta_3$ сложно, поэтому для более надежной оценки предложено измерять $tg\delta_3$ при двух температурах и определять разницу

$\Delta tg\delta_3 = tg\delta_3(t_1) - tg\delta_3(t_2)$. В этом случае $tg\delta_m$ при большей температуре t_1 может быть вычислен из выражения

$$tg\delta_m(t_1) = (1 + \alpha)K\Delta tg\delta_3, \quad (6)$$

где

$$K = \frac{1}{1 - e^{-\beta(t_1 - t_2)}}. \quad (7)$$

Разница температур ($t_1 - t_2$) в небольшом интервале 10—20°C пропорциональна изменению давления и может быть определена по данным его измерений.

Для реализации указанной методики трансформатор нагревается перед отключением нагрузочными потерями до $t_{в.с.м} = 60-70$ °С с помощью отключения части вентиляторов в системе охлаждения ДЦ либо перекрытия части радиаторов в системе Д. При прогреве контролируются $t_{в.с.м}$, давление масла во вводах и его уровень в расширителе. После измерения $tg\delta_3$ при температуре t_1 и соответствующем давлении масла во вводе включается полное охлаждение, температура масла во вводе снижается на 10—20° (контроль по манометру и $t_{в.с.м}$) и выполняются повторные измерения. Затем по выражению (6) рассчитывается $tg\delta_m$ при t_1 , причем значение K при $\alpha = 0,04$ для удобства определяют по графику рис. 5, а результат $tg\delta_m(t_1)$ — приводится к температуре 70 °С по выражению (2).

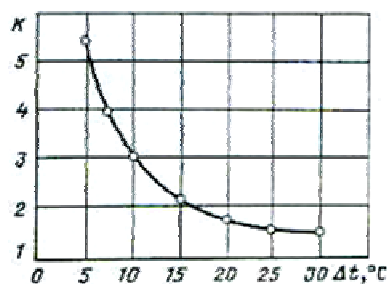


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента K в формуле (6)

В табл. 1 приведены некоторые результаты обследования вводов и оценки $tg\delta_m$, с помощью измерения $tg\delta_3$ по формуле (4) при температуре t_1 и измерения $tg\delta_3$ по формуле (6). Там же приведены значения $tg\delta_m$ проб масла из средней части ввода.

Таблица 1

№ п/п	Тип ввода	Температура ввода, °С		tg д ₃ при температуре		tg д _м при 70°С по формуле		tg д _м пробы
		t ₁	t ₂	t ₁	t ₂	(4)	(6)	
1.	ГБМТ-110/2000	51	37	1,7	1,5	4,0	1,1	0,45
2.		51	37	5,3	2,5	12,6	15,6	9,3
3.		30	24	3,8	2,9	21,0	23,0	18,6
4.		30	21	3,2	2,8	17,6	10,3	11,6
5.	ГБМТ-150/630	48	29	4,0	1,3	15,2	18,3	16,4
6.		49	34	6,9	4,2	17,7	15,9	10,0
7.		49	34	6,2	3,2	15,9	15,9	9,8
8.	ГБМТ-500/1000	46	27	1,6	0,9	3,7	4,2	5,2

Данные полевых испытаний подтвердили эффективность методики. Расчетные значения $tg\delta_m$ в большинстве случаев оказывались несколько выше $tg\delta_m$ проб, что может не противоречить фактическому состоянию масла во вводе. Однако во всех случаях выявления дефектность ввода не оказывалась ложной.

Следует отметить, что в большинстве случаев внешние влияния эффективно устранялись, так что результаты оценки по формулам (4) и (6) оказались близкими. Вместе с тем, при наличии неустранимых влияний (пример 1, табл. 1) оценка по формуле (4) может приводить к необоснованной отбраковке. Использование методики измерения $Dtg\delta_3$ позволяет оценить состояние масла с большей определенностью.

В условиях жестких ограничений времени отключения оборудования для предварительной оценки (индикации) состояния масла может быть использована упрощенная, но менее чувствительная схема (рис. 2,в), не требующая расшиновки трансформатора. При этом выводы всех фаз объединяются и заземляются, а значение $tg \delta_3$ в формуле (4) определяется по измеренному значению $tg \delta_3$ из выражения

$$tg \delta_3 \approx tg \delta_3' (1 + \alpha) - tg \delta_1 \alpha, \quad (8)$$

где $\alpha = C_1/C_3$.

Более надежная оценка может быть сделана при использовании температурной зависимости $tg\delta_3$. С учетом слабого влияния температуры на $tg\delta_1$ выражение для $tg\delta$ масла из (6, 8) в этом случае имеет вид

$$tg \delta_m(t_1) \approx (1 + \alpha) K \Delta tg \delta_3' (1 + \alpha). \quad (9)$$

Оценка состояния поверхностей фарфоровой покрышки и остова. Отдельную задачу составляет выявление дефектов на внутренних поверхностях фарфоровых покрышек (загрязнения, наличие обуглероженных следов разрядов). Наиболее актуальным дефектом в последние годы является отложение на поверхности нижней покрышки характерного желтого осадка с преимущественным содержанием серы, образующегося в некоторых случаях в масле в условиях его контакта с уплотнительной резиной при повышенной температуре.

Результаты обследования вводов [1] показали, что удаление из масла вещества осадка фильтрацией через тонкий мембранный фильтр (1 — 2 мкм) приводит к значительному снижению $tg \delta$ масла и повышению его прочности, что предопределяет увеличение проводимости поверхности при отложении на ней осадка. В некоторых случаях проводимость поверхности фарфора, покрытого желтым налетом, отличалась от проводимости незагрязненной зоны на 2—3 порядка. По другим данным проводимость фарфора с налетом увеличивалась до порядка проводимости масла.

Известно [2], что увеличение поверхностной проводимости фарфора усиливает влияние на электрические характеристики ввода токов, обусловленных емкостями уступов остова на землю (рис. 1), что может приводить к уменьшению $tg\delta_1$, измеренного по прямой схеме моста. Для количественной оценки влияния поверхностей проводимости фарфора на $tg\delta_1$ комплексную проводимость, а также на работу устройств КИВ и КИН требуется отдельный анализ. Однако на основании данных обследования вводов 150 кВ можно заключить, что получение $tg\delta_1$ ниже некоторого минимального значения, определяемого свойствами изоляции и равного примерно 0,3%, может указывать на загрязнение поверхности фарфора.

Для выявления вводов с осадками на фарфоре, учитывая фактически неравномерное распределение осадка по высоте нижней покрышки, нами была сделана попытка использовать для индикации дефекта измерение тока утечки при постоянном напряжении.

На шести вводах 150 кВ, снятых с эксплуатации, были исследованы зависимости тока утечки в цепи измерительного вывода от напряжения в пределах изменения последнего до 100 кВ.

При этом предполагалось, что наличие на поверхности покрышки участка повышенной проводимости вызовет перераспределение напряжения, так что большая его часть будет приложена к сравнительно меньшему участку меньшей проводимости, что при некоторых условиях может вызвать резкий рост тока.

Испытания четко выделили вводы, имеющие масло с повышенным $tg\delta_m$, а также, как выяснилось после разборки, отложение осадка на поверхности нижней покрышки с большей плотностью в нижней ее части. На рис. 6 приведены характерные результаты,

показывающие, что в дефектных вводах по сравнению с нормальными ток утечки при некотором напряжении (более 50—60 кВ) оказался выше на порядок и более.

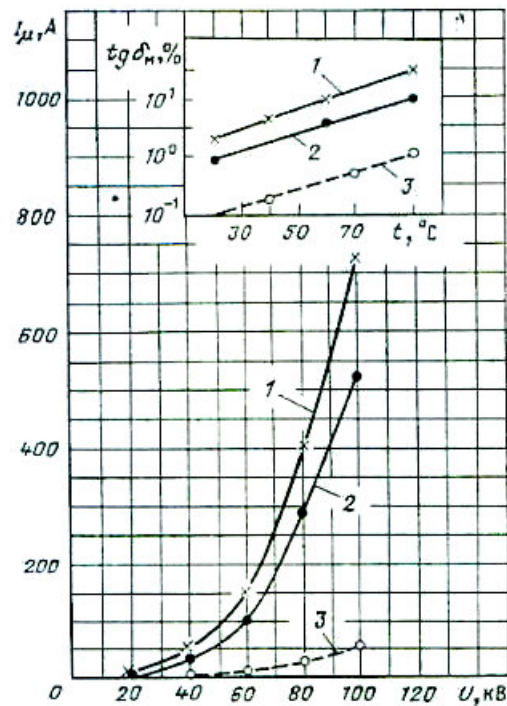


Рис. 6. Влияние испытательного выпрямленного напряжения на ток утечки ввода:
1, 2 – вводы с «плохим» маслом; 3 – ввод с «хорошим» маслом

Вместе с тем опыт показал, что данный метод из-за трудоемкости испытаний и большой длительности переходного процесса целесообразно использовать лишь в специальных случаях проверки вводов, демонтированных с оборудования.

Результаты разборок большого числа вводов показали, что практически, во всех случаях повышения $tg\delta_m$ из-за наличия в масле мелкодисперсного осадка на поверхности нижней крышки имелся характерный налет. Это означает, что для определения состояния ввода достаточно оценить $tg\delta_m$ по приведенной методике, затем, при повышенном его значении, измерить $tg\delta_m$ пробы и одновременно выяснить наличие осадка в масле путем фильтрации масла через тонкий фильтр, рассмотреть инфильтрат и, может быть, повторно измерить $tg\delta$ отфильтрованной пробы масла.

Зачастую осадок выпадает уже непосредственно в сосуде с отобранной пробой масла.

Влияние загрязнения поверхности остова на его электрические характеристики может быть проанализировано с помощью схемы замещения на рис. 2, з, где R'_{uo} — поверхностное сопротивление остова, $C_{o.n}$ — емкость бумажной подмотки относительно заземляемой обкладки.

Анализ показывает, что при увеличении R'_{uo} $tg\delta_l$ изменяется, причем добавка от активных потерь на сопротивлении поверхности $Dtg\delta(R'_{uo})$ меняется немонотонно и при некотором значении R'_{uo} достигает максимума. Значение R'_{uo} получается из уравнений

$$tg\delta_{uo} \approx \sqrt{1 + \alpha'}; \quad (10)$$

$$\alpha' = C_{o.n} / C'_1; \quad (11)$$

$$tg\delta_{uo} = \omega R'_{uo} C_{o.n}, \quad (12)$$

а соответствующий ему максимум — из выражения

$$\Delta tg \delta_1 (R_{ш})_{\max} \approx \frac{\alpha'}{2\sqrt{1+\alpha'}}. \quad (13)$$

Из (10, 13) следует, что загрязнение остова (продуктами разложения масла или проводящими частицами), появление поверхностных разрядов или сильное увлажнение поверхности могут вызвать значительное увеличение $tg \delta_1$ остова, что более вероятно при повышенном, например, рабочем напряжении.

Отметим, что увеличение $tg \delta_1$ от поверхностных потерь может быть намного больше увеличения от дефекта внутри остова.

Влияние последнего обычно оценивают помощью схемы замещения на рис. 2, д, где дефект представляется параметрами C_δ и $tg \delta$. Выражение $tg \delta_1 (C)$ в этой схеме имеет вид

$$tg \delta_1 (C_\delta) = \frac{tg \delta_\delta \alpha'}{tg \delta_\delta^2 + (1 + \alpha')}, \quad (14)$$

где $\delta' = C_1/C_\delta$ а максимальное значение при $tg \delta_\delta \rightarrow tg \delta_{\delta_{\max}} = \sqrt{1 + \alpha'}$ составляет

$$tg \delta_1 (C_\delta)_{\max} = \frac{\alpha'}{2\sqrt{1 + \alpha'}}. \quad (15)$$

Выражения (13) и (15) подобны, однако если δ' имеет порядок единиц, то при возникновении дефекта в одной-двух обкладках, δ' может быть порядка 0,01—0,1, что обуславливает в последнем случае значительно меньшее приращение $tg \delta_1$. Так, во вводе ГМТА-150/630 предельное приращение $tg \delta_1$ за счет снижения поверхностного сопротивления может быть до 100 % ($\delta' = 5$), а за счет дефекта в одной обкладке — до 5 % ($\delta' = 0,1$). На практике повреждение 10—20 % обкладок приводили к увеличению $tg \delta$ от 0,3—0,4 % до 0,84—1,4 %, а при поверхностном разряде — от 0,45 до 10,5 %.

Анализ некоторых случаев работы устройства КИВ показывает, что при наличии в остова дефекта, измеренный при напряжении 10 кВ $tg \delta_1$ может быть в 3—5 раз ниже, чем при рабочем напряжении, а изменение тока небаланса может с большей чувствительностью и надежностью (чем определение $tg \delta_1$ при 10 кВ) характеризовать дефект.

Следует отметить, что во вводах с измерительным конденсатором поверхностная проводимость остова на $tg \delta_1$ практически не влияет, так что при отсутствии внутреннего дефекта значения $tg \delta_1$ в эксплуатации должно оставаться на уровне исходного, т. е. $\leq 0,6\%$.

Выявление развивающихся повреждений. Электрическая прочность бумажно-масляной изоляции определяется ионизационными процессами, сопровождающимися газовыделением, что само уже предопределяет возможность эффективного использования метода анализа растворенных, в масле газов для контроля состояния вводов как в эксплуатации, так и при заводских испытаниях.

За последние годы накопился значительный опыт применения этого метода в отечественных энергосистемах и за рубежом [3], на базе чего появились предложения о введении периодического, один-два раза в год, хроматографического контроля вводов с использованием для диагностики по аналогии с силовыми трансформаторами некоторых значений предельных концентраций газовых компонентов и скорости их нарастания.

Сравнительно небольшой объем масла во вводах предполагает возможность обнаружения дефектов, при которых выделяются десятки или даже единицы миллилитров газа, в то время как в силовых трансформаторах обычно выявляют дефекты после выделения 10^3 — 10^4 мл газа. Очевидно, что определить очаг повреждения при столь малом его развитии весьма сложно и, следовательно, абсолютное значение браковочных концентраций во вводах должно быть существенно выше.

При определении норм следует учитывать, что из-за слабого перемешивания масла часть образовавшегося газа не успевает раствориться и скапливается в верхней части ввода, что особенно заметно при интенсивном газовыделении, приводящем обычно к резкому повышению давления масла. Кроме того, выделение в масле пузырьков газа даже в небольшом количестве может вызвать резкое ослабление электрической прочности и перекрытие по внутренней поверхности крышки. При определении периодичности

контроля следует также учитывать сложности отбора проб масла из вводов.

Указанные обстоятельства затрудняют определение каких-либо жестких граничных концентраций компонентов газа и скорости их нарастания.

Имеющийся опыт обследования вводов (около 2000) показывает, что в герметичных вводах, залитых маслом марки Т-750, в пределах эксплуатации до 15 лет состав газов практически не зависит от длительности работы и существенно меняется лишь при возникновении дефекта. Это указывает на отсутствие в изоляции при принятых электрических и тепловых нагрузках заметных ионизационных или термоокислительных процессов, приводящих к постепенному накоплению газов.

Опыт эксплуатации показывает целесообразность установления по меньшей мере двух уровней граничных концентраций газов в масле уровня начальных «безопасных» концентраций, превышение которого может вызывать подозрение о наличии неисправности и требовать повторного контроля и уровня «дефектности», превышение которого может свидетельствовать о наличии повреждения.

По данным обследования вводов, залитых маслом Т-750, уровень начальных концентрации вводов 110—150 кВ: $H_2 \leq 200$ мкл/л, сумма углеводородов $C_xH_y \leq 50$ мкл/л, $C_2H_2 < 5$ мкл/л; для вводов 330—500 кВ: $H_2 \leq 100$ мкл/л, $C_xH_y < 40$ мкл/л, C_2H_2 — отсутствуют. Этим данным соответствуют более 70 % обследованных вводов.

Наличие сравнительно высокой концентрации H_2 может быть объяснено процессами начальной ионизации при испытании изоляции стандартным одноминутным напряжением, величина которого установлена на весьма высоком уровне, превышающем в частности для вводов 110 — 220 кВ в 3—3,3 раза даже установленное ГОСТ 10693-81 напряжение при испытании на частичные разряды.

Уровень «дефектности» может быть определен по условию возможности визуального обнаружения следов повреждения и зависит от вида последнего.

В табл. 2 по данным анализа отказов вводов за последние десять лет показаны некоторые виды повреждения и сопутствующие им характеристические газы, а в том числе примерное распределение концентраций относительно ключевого газа. На рис. 8 показано также несколько примеров количественного распределения концентраций при характерных повреждениях.

Особого внимания требуют вводы, состав газов в которых указывает на наличие частичных разрядов в масле (пример 1 табл. 2, рис. 8, а). По имеющимся данным этот вид повреждения может отличаться сравнительно невысокими концентрациями газов при отсутствии заметного нарастания до отказа. Так, кривая 1 на рис. 8, а иллюстрирует состав газа во вводе 110 кВ за три дня до повреждения, кривая 2 — состав газа во вводе 150 кВ, имеющего следы разрядов на внутренней поверхности нижней крышки.

Указанные примеры дают основание рассматривать как возможно дефектные вводы 110 — 150 кВ, в которых на фоне увеличения $tg \delta$ масла обнаружено свыше 400—500 мкл/л водорода при соотношении $0,05 < CH_4/H_2 < 0,2$, и снимать их с эксплуатации, не ожидая дальнейшего нарастания газов. Для вводов 330—500 кВ, имеющих существенно больший объем масла, критические концентрации H_2 при том же соотношении CH_4/H_2 могут быть в 1,5—2 раза ниже.

Следует отметить, что для вводов, залитых маслом ГК, имеющим по сравнению с Т-750 значительно более высокую термоокислительную стабильность, но меньшую устойчивость к воздействиям частичных разрядов, больший коэффициент газовыделения, предельное содержание H_2 характеризующего вероятность повреждения, может быть установлено на уровне 1000—2000 мкл/л. При этом распределение других газов остается таким же, как и для масла Т-750. Кривые 3, 4 рис. 8, а иллюстрируют примеры газовыделения во вводах 110 кВ, залитых маслом ГК. При разборке были обнаружены лишь небольшие следы отложения углерода на фарфоре.

Таблица 2

№	Вид повреждения	Характеристические газы	Характеристические соотношения концентрации	Кривые по рис. 7
1	Частичные и скользящие разряды в масле и по поверхности фарфора	H ₂ , CH ₄	0,5<CH/H ₂ <0,2 C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ >1	1
2	Искровые разряды по поверхности остова	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₂ , CO, C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂ ≤0,3-1 CO/CO ₂ >0,3	2
3	Емкостные разряды из-за нарушения изоляции измерительного вывода	H ₂ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , CH ₄	CH ₄ /H ₂ <0,2-1 C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ >1,0	3
4	Повышенный нагрев (искрение) конструктивных деталей	CH ₄ , H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆	CH ₄ /H ₂ <0,1-0,8 C ₂ H ₂ /C ₂ H ₆ <0,5-0,0 C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆ <1,0	4
5	Тепловой пробой части изоляции остова	C ₂ H ₄ , H ₂ , CH ₄ , CO, C ₂ H ₂	CH ₄ /H ₂ >0,5 CO/CO ₂ >0,2	5

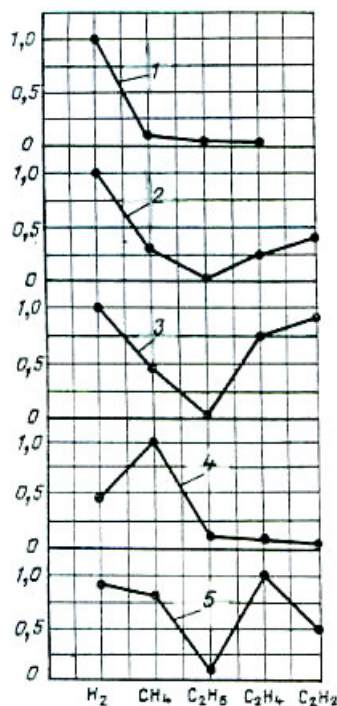


Рис. 7. Характерное распределение концентраций относительно ключевого газа

Состав газов при возникновении искровых разрядов по поверхности остова характеризуется заметным появлением ацетилена (табл. 2, пример 2; рис. 8,б), накоплением СО и увеличением отношения CO/CO_2 , как следствие разрушения бумаги, а также нарастанием концентрации во времени. Однако с момента появления C_2H_2 повреждение может развиваться за весьма короткое время, что иллюстрирует рис. 8, б, где показан состав газов во вводе 500 кВ за четыре дня до отказа и после отключения защитной КИВ.

Более интенсивное выделение H_2 , C_2H_2 и C_2H_4 отмечается при искрении в масле вследствие нарушения изоляций, обрыва измерительного вывода, проводников присоединения нулевой обкладки и др. (табл. 2, пример 3; рис. 8, в).

Повреждение характеризуется большими концентрациями и значительной скоростью их нарастания и наличие таких дефектов может быть уточнено с помощью измерения электрических характеристик.

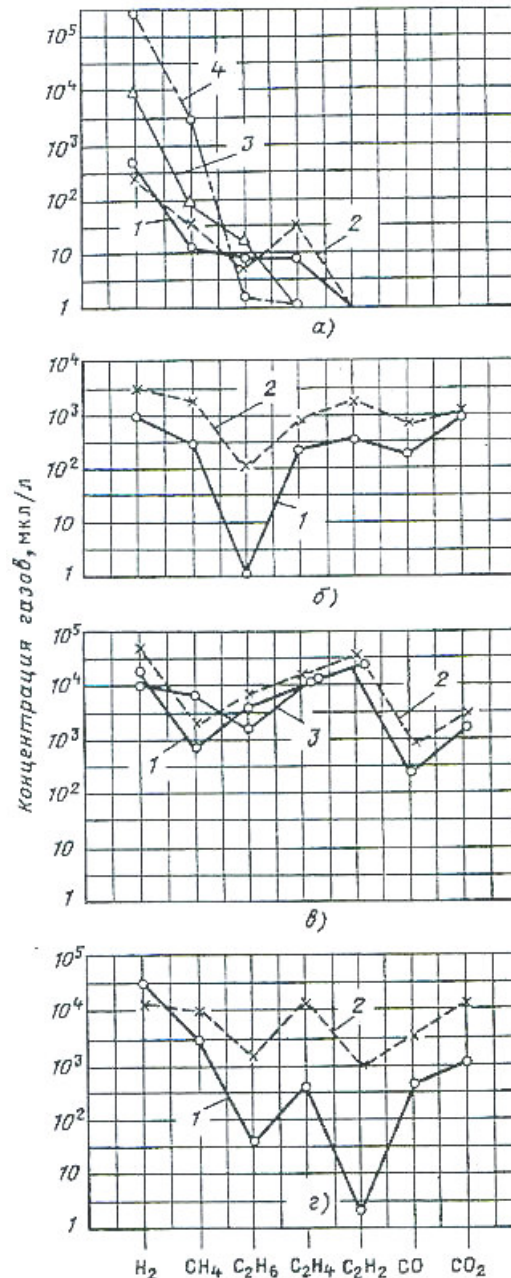


Рис. 8. Распределение концентраций газов в масле при различного вида дефектах:
 а – частичные разряды; 1 – масло Т-750, за три дня до перекрытия ввода; 2 – масло Т-750, обуглероженный след разряда на внутренней поверхности фарфора; 3,4 – масло ГК, слабые следы разряда на поверхности фарфора;
 б – скользящие разряды на поверхности остова ввода 500 кВ; 1 – за четыре дня до отказа по КИВ; 2 – после отказа по КИВ;
 в – нарушения в цепи ИВ; 1,2 – ввод 110 кВ, повреждение изоляции ИВ (1 – за 1 мес. до вывода из работы, 2 – непосредственно перед выводом из работы); 3 – обрыв ИВ ввода 220 кВ;
 г – тепловой пробой остова; 1 – ввод 750 кВ, прогорание 13% обкладок; 2 – ввод 500 кВ, прогорание 70% обкладок.

Результаты разборок вводов, имеющих состав газов, указывающих на местный нагрев в масле (табл. 2, пример 4), показали возможность возникновения такого нагрева, переходящего в искрение, в местах контактов компенсирующих пружин и сильфонов с корпусом, вероятно, вследствие воздействия циркулирующих токов при перегрузках или длительных КЗ в сети. В этих случаях можно ожидать медленное, эпизодическое накопление газа, допускающее возможность повторного контроля через сравнительно длинные промежутки (от шести месяцев до года).

Повреждения, возникающие в изоляционном остова, по имеющимся данным развиваются довольно быстро, что делает малоперспективной возможность периодического профилактического контроля.

Вместе с тем данный метод несравненно более надежный, чем измерение $\text{tg } d_1$ и C_1 и практически однозначно характеризует наличие или отсутствие повреждений в остова при отклонениях последних от нормы.

Отдельный интерес представляют случаи теплового пробоя изоляции (табл. 2, пример 5; рис. 8, г), при котором кроме газов, характерных для сильных разрядов, имеются газы, характерные для сильного нагрева масла и изоляции.

Следует отметить, что во вводах более эффективно, чем в силовых трансформаторах, может быть использовано критериальное отношение CO/CO_2 , характеризующее деструкцию твердой изоляции. При повреждении последней, по имеющимся данным, $\text{CO}/\text{CO}_2 > 0,2—0,3$.

Таким образом, анализ растворенных газов во вводах является наиболее эффективным средством выявления внутренних повреждений.

Состав анализируемых газов должен обязательно включать, кроме углеводородов и CO_2 , также H_2 и CO .

В малообъемных вводах 110—150 кВ такой контроль целесообразен лишь в случаях повышенной вероятности возникновения повреждения (увеличения $\text{tg } d$ масла, нарушение герметичности, повышение давления, длительное КЗ). Во вводах 330—1150 кВ может быть предусмотрен периодический контроль при текущих ремонтах с учетом особенностей эксплуатации.

Для диагностики целесообразно использовать данные о «безопасном» и «дефектном» уровне концентраций, сравнение распределения имеющихся концентраций с образцовыми. После предварительной оценки повреждения необходимо проанализировать скорости нарастания концентрации газов.

Выводы

1. Факты повреждений изоляции герметичных трансформаторных вводов в эксплуатации из-за образования осадка на внутренней поверхности фарфора требуют принятия мер в отношении повышения стабильности электрических характеристик масла и композиционной изоляции ввода в целом. В эксплуатации профилактический контроль вводов с бумажномасляной изоляцией как герметичного, так и негерметичного исполнения, должен быть направлен, в первую очередь, на своевременное выявление изменения изоляционных характеристик на участке «изоляционный остов — масло — фарфоровая крышка».

2. Результаты данной работы позволяют повысить эффективность эксплуатации и одновременно упростить систему профилактического контроля серийных вводов.

3. В герметичных вводах без измерительного конденсатора такой контроль целесообразно осуществлять посредством измерения $\text{tg } d$ участка изоляции между измерительной обкладкой и заземленными частями при температуре ввода выше 30—40°C, производи дополнительное обследование состояния ввода с отбором пробы масла, определением его $\text{tg } d$ и состава растворенных в нем газов только в том случае, когда выявляется значительное повышение упомянутого изоляционного участка. У вводов с измерительным конденсатором эффективный контроль возможен только при отборе пробы масла, определения его $\text{tg } d$ и состава растворенных в нем газов.

4. Предложенная диагностика развивающихся дефектов в композиционной изоляции вводов путем анализа растворенных в масле газов с учетом возможных видов повреждений на основе данных о «безопасном» и «дефектном» уровнях газовых концентраций, а также их сравнения с нормированными концентрациями позволяет более эффективно использовать возможности повышенной чувствительности газового анализа в малообъемных аппаратах и уменьшить вероятность ложной отбраковки.

5. Эффективность контроля электрических характеристик вводов и его

информативность могут быть повышены при непрерывных измерениях под рабочим напряжением с использованием измерительных выводов. Разработка методики такого контроля является актуальной задачей. В этом случае измерение традиционных электрических характеристик остова может проводиться лишь при наличии увеличения тока проводимости ввода либо тока небаланса в устройстве типа КИВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носулько Д. Р., Соколов Б. В., Назаров А. И. Опыт эксплуатации герметичных маслонаполненных вводов силовых трансформаторов. — Электрические станции, 1987, № 8.
2. Бажанов С. А. Причины повреждения маслонаполненных вводов 110—500 кВ.— Электрические станции, 1974, № 7.
3. Corvo A. M — C1GRE, 1982, rep. 12—14.