

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕРМЕТИЧНЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ВВОДОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Носулько Д. Р., Соколов В. В., Назаров А. И., кандидаты техн. наук
(Днепроэнерго — ПО Запорожтрансформатор)

Профилактический контроль эксплуатационного состояния маслonaполненных вводов — одного из основных узлов силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов, направлен на выявление и при возможности своевременное устранение развивающихся дефектов или уже возникших локальных повреждений, могущих привести к нарушению работоспособности вводов к электрооборудованию в целом.

В Днепроэнерго установлено более 1200 вводов с бумажно-масляной изоляцией напряжением 110—750 кВ, многие из которых находятся в эксплуатации около 30 лет.

В настоящее время основой профилактического контроля всех вводов являются директивные материалы и нормативные документы [1 2], а также инструкции завода-изготовителя, направленные главным образом на оценку состояния изоляции остова измерением ее традиционных электрических характеристик и изоляционного масла во вводах конструкции негерметичного исполнения.

В последние годы введен дополнительно тепловизионный контроль нагрева контактных соединений вводов и в соответствии с рекомендациями Техуправления Минэнерго УССР внедрен выборочно хроматографический анализ содержания растворенных в масле газов.

Опыт эксплуатации показал, что традиционный объем контроля совместно с известными способами уменьшения степени увлажнения позволяет практически исключить повреждаемость вводов негерметичных конструкций как наиболее подверженных влиянию эксплуатационных факторов. Объем их отбраковки в Днепроэнерго составил за период с 1981 по 1985 г. в среднем 2 — 3% от числа испытанных при полном отсутствии повреждаемости.

Однако в последние годы стали появляться неполадки во вводах напряжением 150 кВ герметичной конструкции по причинам, ранее не возникающим. Под рабочим напряжением во вводе происходят перекрытия его внутренней изоляции от потенциальных элементов, как правило, с подпорной гайки изоляционного остова, по поверхности нижней фарфоровой крышки до заземленной соединительной втулки. Наибольшая интенсивность отказов вводов в работе отмечена после 5—6 лет их эксплуатации.

Указанный изоляционный промежуток каждого ввода испытывается в условиях завода напряжением 340 кВ промышленной частоты, поэтому для его повреждения в эксплуатационных условиях запасы электрической прочности внутренней изоляции должны быть снижены; по меньшей мере в 3,5 раза.

Детальное изучение поврежденных вводов позволило установить следующие особенности их состояния: наличие в масле взвешенного мелкодисперсного осадка желтого цвета; увеличение тангенса угла диэлектрических потерь масла $tg\delta_m$ до 20—40% и проводимости до $(1-5) \cdot 10^{-9}$ Ом·м при температуре 90°C; возникновение на внутренней поверхности нижней крышки, а в некоторых случаях и на поверхности изоляционного остова налета характерных желтых оттенков; появление следов частичных разрядов на металлических деталях, внутренней поверхности фарфоровой крышки и в некоторых случаях бумажной подмотки изоляционного остова в зоне расположения края заземленной обкладки, имеющих вид обуглероженных дорожек.

Кроме того, при отборе пробы масла через нижнюю пробку ввода вместо наибольшего скопления осадка обнаружено снижение его пробивного напряжения $U_{проб,м}$ до 35—16 кВ. После фильтрации указанного масла через фильтр с тонкостью фильтрации 1 мкм $U_{проб,м}$ увеличивается, а $tg\delta_m$ значительно уменьшается.

Для предотвращения повреждаемости электрооборудования было принято решение о внеочередном обследовании состояния изоляции герметичных вводов напряжением 150 кВ включающем: измерение емкости C_I и $tg\delta_m$ всего изоляционного остова; определение емкости C_I и $tg\delta_m$ участка изоляции между последней заземляемой обкладкой остова и соединительной втулкой;

анализ проб масла из средней части ввода с определением $tg\delta_m$, $U_{проб,м}$, влагосодержания W_m , температуры вспышки t_n , содержания механических примесей и кислотного числа, проведение хроматографического анализа растворенных в масле газов.

Дополнительная отбраковка вводов осуществлялась на основании рекомендаций [2] и рекомендаций завода-изготовителя, установившего предельно допустимые значения $tg\delta_m \geq 3\%$ и $tg\delta_m \geq 10\%$ при температуре масла $t_m = 90^\circ\text{C}$.

Серьезную трудность в процессе выполнения указанных экспериментальных исследований представляла необходимость доливки герметичных вводов свежим дегазированным маслом после отбора пробы масла, поскольку его слив в объеме около 1 л из ввода ГБМТ-150/630 снижает избыточное давление $P_{изб}$ на 1,1—1,2 кгс/см².

Наиболее удобным конструктивным решением выполнения указанной работы явилось использование для доливки бачка давления от вводов напряжением 330, 500 или 750 кВ, предварительно заполненного сухим дегазированным маслом до достижения $P_{изб} \approx 3$ кгс/см². Полезная отдача сильфонов бачка давления ввода напряжением 500 кВ при изменении $P_{изб}$ от 3 до 1,2 кгс/см² составляет примерно 50 л, что дает возможность осуществлять подпитку нескольких десятков герметичных вводов напряжением 10—150 кВ.

Всего в Днепроэнерго было обследовано более 500 герметичных вводов ГБМТ-150/630 и ГБМТ-150/2000, из которых 100 находились в эксплуатации более 10 лет.

Распределение числа обследованных герметичных вводов в зависимости от времени их эксплуатации показано на рис. 1.

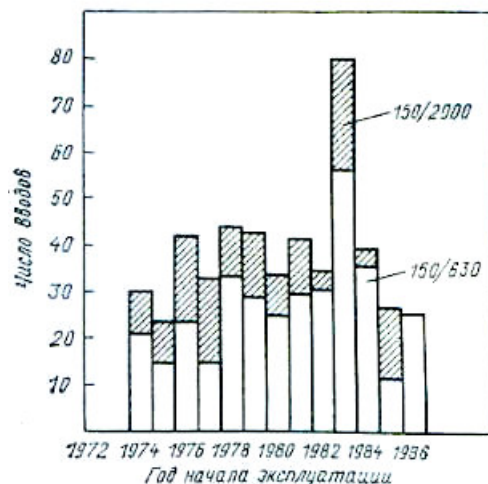


Рис. 1. Распределение числа обследованных герметичных вводов в зависимости от времени их эксплуатации.

Результаты обследования показали, что состояние вводов не связано с общим старением изоляции. Содержание углекислого газа CO_2 в масле не превышало 0,2% в 93% вводов, причем зависимости содержания указанного газа от времени эксплуатации вводов не выявлено. В масле вводов также не замечено накопления кислот, так как кислотное число не превышало 0,05 г на 1 мг КОН, а водорастворимые кислоты отсутствовали вообще.

Данные определения W_m показали независимость изменения влаги в масле от длительности эксплуатации вводов. Так, среднее значение W_m 135 вводов, работающих до 3 лет, составило 19,1 г/т при среднеквадратичном отклонении $y = 9,06$ г/т, а 84 вводов с периодом работы 10—13 лет — 18,6 г/т при $y = 8,45$ г/т. Примерно в половине общего числа вводов значение W_m не превышало 15 г/т. Вместе с тем в 19 % вводов с разным временем эксплуатации содержание влаги определено на уровне 25—40 г/т. Можно предполагать, что повышения значений W_m были связаны прежде всего с возможным попаданием влаги в пробы из-за непригодности конструкции маслоотборника, а также в некоторых случаях с исходным состоянием изоляции. Например, повторная проверка партии вводов показала снижение среднего значения W_m от 22 до 9,6 г/т и сокращение разброса от 10,2 до 3,4 г/т. Полученные результаты убедили в нецелесообразности

последующего контроля указанной характеристики.

Особое внимание уделялось оценке электрических характеристик изоляции. На рис. 2 показаны интегральные кривые распределения значений $tg\delta_1$ и $tg\delta_3$, а также $tg\delta_m$ при температуре 90°C . Последняя приведена в полулогарифмическом масштабе. Из кривой $tg\delta_1$ видно, что 50 % вводов имели $tg\delta_1 \leq 0,4$ %, а у 90 % — $tg\delta_1$ не превышал 0,8 %. Значение, превышающее нормы и составляющее 1,2 %, выявлено только у 2 % вводов. Однако повторные измерения и их анализ показали отсутствие дефектов в этих вводах и обосновали первоначальные повышенные значения указанного параметра недостаточным учетом методических погрешностей измерения.

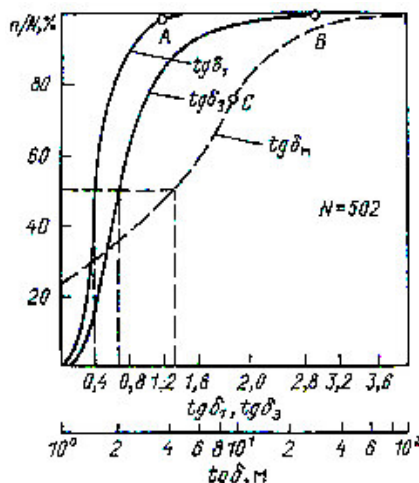


Рис.2. Интегральные кривые распределения значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции $tg\delta_1$, участка заземленная обкладка – втулка $tg\delta_3$ и масла $tg\delta_m$ при температуре 90°C .

Наиболее часто повышенные значения $tg\delta_1$ выявлялись на вводах блочных трансформаторов главным образом из-за влияния намагничивающих потоков силового трансформатора. Закорачивание выводов всех обмоток трансформатора практически исключило эти помехи при повторных измерениях.

Теоретический анализ показывает, что в конструкциях вводов без измерительных конденсаторов на повышение значения $tg\delta_1$, может влиять поверхностная проводимость изоляционного остова, в частности из-за старения масла. Однако при напряжении 10 кВ этот фактор практически не проявляется. Так, во вводах, имеющих $tg\delta_m$ при температуре 90°C выше 10 %, среднее значение $tg\delta_1$, составило только 0,49 %.

Дополнительно выявилось, что в некоторых случаях о наличии дефектов во вводе может свидетельствовать пониженное или даже отрицательное значение $tg\delta_1$, появившееся из-за влияния токов, обусловленных емкостями уступов изоляционного остова на заземленные части трансформатора при увеличении поверхностной проводимости фарфора. Значения $tg\delta_1 < 0,3\%$ были выявлены в процессе обследований у 8 % вводов. Последующая проверка указанных вводов показала, что среднее значение $tg\delta_m$ у них составляет 5,5 %. У ввода со следами разряда по внутренней поверхности фарфоровой крышки было зафиксировано отрицательное значение $tg\delta_1$.

В целом результаты обследования показали, что в герметичных вводах современных конструкций эффективность традиционных измерений C_1 и $tg\delta_1$ для эксплуатационного контроля их состояния значительно снижена из-за малой вероятности повреждения изоляционного остова. Следовательно, задачи и нормы контроля состояния вводов должны быть пересмотрены.

В настоящее время величине $tg\delta_3$, определяющей состояние изоляционного участка между измерительным выводом и соединительной заземленной втулкой, придается традиционное значение как характеристике состояния изоляции только последних слоев изоляционного остова. Фактически в герметичных вводах напряжением 110, 150, 220 кВ и ряде других электроаппаратов параметры C_3 и $tg\delta_3$ характеризуют участок изоляции, включающий последовательно соединенные бумажную подмотку изоляционного остова и масляный промежуток между изоляционным остовом и заземленной соединительной втулкой с учетом изоляции измерительного вывода и

поверхности фарфора. Состояние бумажной изоляции оказывает существенное влияние на увеличение $tg\delta_3$ только при значительном увлажнении до 4—5 %, что нереально при эксплуатации герметичных вводов.

Результаты обследования показали, что основной причиной повышения $tg\delta_3$ является увеличение $tg\delta_m$. Так, значениям $tg\delta_m \geq 10$ % при температуре 90 °С соответствовало в среднем увеличение $tg\delta_3$ до 1,7% при температуре масла 15-25°С. Значение $tg\delta_3$, превышающее 3%, было выявлено у 1,6 % вводов.

Причинами явились: возрастание $tg\delta_m$ до 60— 100 %, наличие науглероженных следов от электрических разрядов на внутренней поверхности фарфора, появление осадка на поверхности изоляционного остова и фарфора и повреждения изоляции измерительных выводов.

Таким образом, параметр $tg\delta_3$ оказался наиболее эффективным показателем, характеризующим состояние вводов, по сравнению с другими электрическими характеристиками.

Вместе с тем необходимо отметить, что в ряде конкретных случаев было обнаружено явное несоответствие между величинами $tg\delta_3$ и $tg\delta_m$. Главными причинами этого несоответствия явились неправильный учет влияния t_m на $tg\delta_m$ и $tg\delta_3$ из-за отсутствия достаточных методических рекомендаций в нормативных документах, известной литературе и четких рекомендаций по методике измерений.

Так, при температуре масла во вводе 10—20 °С значения $tg\delta_m$ даже весьма загрязненного масла, а следовательно, и $tg\delta_3$, оказываются соизмеримыми с тангенсом угла диэлектрических потерь бумаги $tg\delta_{бум}$ и не принимаются во внимание.

Далее, для измерений C_3 и $tg\delta_3$ следует применить перевернутую схему измерительного моста с подключением его вывода C_x к измерительному выводу герметичного ввода и подачей экранного напряжения на его токоведущую трубу. В эксплуатации во многих случаях измерения выполняют без экранировки изоляции остова ввода, получая суммарные значения C_3 и $tg\delta_3$ соответственно равные:

$$C'_3 = C_1 + C_3, \quad (1)$$

$$tg\delta'_3 = tg\delta_3 \frac{C_3}{C'_3} + tg\delta_1 \frac{C_1}{C'_3} \quad (2)$$

В этом случае значение $tg\delta_3$ следует определять из выражения

$$tg\delta_3 = tg\delta'_3 \left(1 + \frac{C_1}{C_3} \right) - tg\delta_1 \frac{C_1}{C_3} \quad (3)$$

Для герметичных вводов напряжением 150 кВ $C_1/C_3 \approx 1$, что упрощает указанный расчет.

Наиболее показательным параметром состояния вводов явился $tg\delta_m$. При анализе кривой значения $tg\delta_m$ (см. рис. 2) видно, что его значение, превышающее норму 10 % (точка С), имели 25 % вводов, а в 22,6 % вводов $tg\delta_m$ находился в пределах от 5 до 10 % и только 23,5 % вводов имели $tg\delta_m$ ниже 1 %.

Анализом не установлено существенной зависимости $tg\delta_m$ от длительности эксплуатации герметичных вводов, как показано на рис. 3. Отмечены случаи превышения $tg\delta_m$ установленных норм и после 1—2 лет эксплуатации вводов.

Выявлена недостаточность оценки $tg\delta_m$ при одной температуре 90°С. Такое ограничение не позволяет оценить значение при рабочих температурах в условиях эксплуатации и в момент измерений электрических характеристик, а также исключает возможность рассмотрения температурной зависимости указанного параметра.

Например, установлено, что в ряде случаев при наличии в масле осадков, увеличивающих $tg\delta_m$, значение последнего при температуре 70°С оказывалось выше, чем при температуре 90 °С. Выдержка масла при температуре 90—100 °С приводила к коагуляции и выпаданию части осадка, а, следовательно, и снижению $tg\delta_m$.

Выявилось также, что характеристика отобранного из ввода масла не соответствует в полной мере его состоянию во вводе. Так, в ряде случаев после длительного отстоя масла повторный анализ показывал значительное снижение $tg\delta_m$, вероятно, из-за изменения состояния осадка в нем.

Повторная проверка масла вводов, выполненная примерно через год после первого

обследования, показала, что в целом во вводах, где $tg\delta_m$ при первой проверке составлял 5—10%, имеется определенная тенденция к его увеличению. Так, в 13 вводах среднее значение $tg\delta_m$ составляло 6,7 % ($\sigma=4,1$ %), а через год оно увеличилось до 14,6 % ($\gamma=5,7$ %).

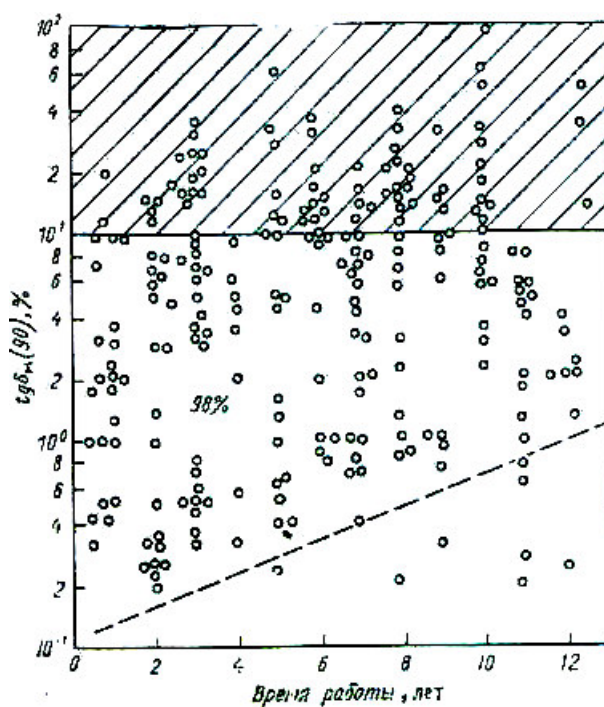


Рис 3. Зависимость $tg\delta_m$ в герметичных вводах напряжением 150 кВ от времени их эксплуатации.

Разборка определенного числа забракованных вводов показала, что в большинстве вводов с повышенным $tg\delta_m$ был обнаружен на внутренней поверхности нижней крышки характерный осадок от светло-коричневого до желто-бурого цвета. В ряде случаев осадок был обнаружен также при значении $tg\delta_m$ 5—10 %, т.е. ниже допустимой нормы. Однако отмечены случаи, когда при значениях $tg\delta_m$ 50—100 % не было выявлено существенного выделения осадка или каких-либо примесей, снижающих $U_{проб.м}$. Отмеченные факторы, с одной стороны, свидетельствуют о наличии различных причин повышения $tg\delta_m$, а с другой стороны, подчеркивают, что сама по себе величина $tg\delta_m$ может рассматриваться, прежде всего, как определенный симптом ухудшения состояния герметичного ввода. Соответственно может быть допустима работа ввода с гораздо большими величинами $tg\delta_m$ по сравнению с существующими нормами.

Результаты анализа $U_{проб.м}$ подтвердили, что при отборе пробы масла из отстойной зоны ввода с наличием осадка оно может снижаться до 20—16 кВ. Однако при отборе пробы масла из средней части ввода этого не возникает и среднее значение $U_{проб.м}$ у 76 вводов, имеющих $tg\delta_m$ от 10 до 100 % при температуре 90 °С, оказалось равным не менее 56 кВ ($\gamma=12,4$ кВ). В связи с изложенным, а также учитывая необходимость значительного количества отбора масла для определения $U_{проб.м}$, в дальнейшем контроль этой характеристики был признан нецелесообразным.

В отличие от изложенных проверок, основной целью которых было определение условий, при которых может возникнуть повреждение, хроматографический анализ растворенных в масле газов должен давать ответ о наличии скрытого дефекта, могущего привести к повреждению ввода. По сравнению с силовыми трансформаторами, в которых о наличии дефектов судят только после выделения газа в объеме $10^3—10^4$ мл, в герметичных вводах благодаря малому объему масла имеется возможность эффективного контроля даже развивающихся дефектов, приводящих к выделению газов в объеме 1—10 мл. Однако это же обстоятельство затрудняет нормирование предельных концентраций газов из-за сложности обнаружения дефекта.

В процессе выборочного контроля удалось оценить состав газов во вводах, у которых позднее были обнаружены следы электрических разрядов, в том числе во вводе с полным развитием дефекта и его последующим повреждением. Некоторые данные о составе газов в масле

повредившихся вводов приведены в таблице.

Условный № ввода	Время работы, лет	Содержание растворенных в масле газов, мкл/л									Примечание
		O ₂	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	ΣC _x H _y	
1	10	0,11	230	1500	340	32	22	8	Отсутствует	62	Обуглероженные кольцевидные следы на фарфоре То же Следы электрических разрядов на фарфоре и латунных деталях За 30 дней до повреждения ввода. После отбора пробы доливалось масло объема 10% За 6 дней до повреждения ввода
2	10	0,1	190	1200	330	41	26	8	»	75	
3	4,5	0,44	250	1670	650	23	6	5	»	34	
4	4,4	0,13	220	1100	530	13	6	5,4	»	24,4	
	4,5	0,23	190	850	450	10	5,4	4,8	»	20,2	

Выявлено, что начальная стадия возникновения дефектов может характеризоваться составом газов, свойственных дефектам типа частичных разрядов малой энергии в масле, т. е. повышенным содержанием водорода H₂ сопутствующим метаном CH₄ с концентрацией примерно на порядок ниже и небольшими концентрациями углеводородов без ацетилена C₂H₂.

Также выявлено, что дефект изоляции может длительно не развиваться, а затем развиваться весьма быстро до ее полного пробоя (см. ввод № 4 в таблице).

Указанные обстоятельства делают практически неэффективными ранее выданные технические рекомендации по контролю вводов [3], в которых не предусмотрено определение H₂, и о дефектах судят только по скорости нарастания углеводородов, начиная от их суммарной концентраций примерно 100 мкл/л и выше.

Результаты масляного обследования растворенных в масле газов приведены на рис. 4 в виде интегральных распределений наиболее характерных газов: H₂, CH₄ и суммы UC_xH_y=CH₄+C₂H₄ (ацетилен) + C₂H₆ (этан).

Следует отметить, что заметное содержание C₂H₂ с сопутствующими C₂H₄, C₂H₆ и CH₄ повышенных концентраций было выявлено только в одном вводе, у которого оказалась поврежденной изоляция измерительного вывода.

Из рис. 4 видно, что для основного числа вводов (свыше 90 %) характерен следующий состав газа: H₂ ≤ 300...400, CH₄ ≤ 30...50, ΣC_xH_y ≤ 50...70 мкл/л.

Предполагается, что приведенные объемы указанных газов могут быть приняты для начальной оценки вероятности повреждений во вводах напряжением 110—150 кВ.

Сопоставление содержания H₂ со значениями *tgd_m* согласно рис. 5 не выявило определенной закономерности. Следует отметить, что повышенные концентрации H₂ не наблюдаются в области наибольших значений *tgd_m*, однако они отсутствуют и в области малых значений указанного параметра. Не установлено также существенной корреляционной зависимости между содержанием H₂ и временем эксплуатации вводов.

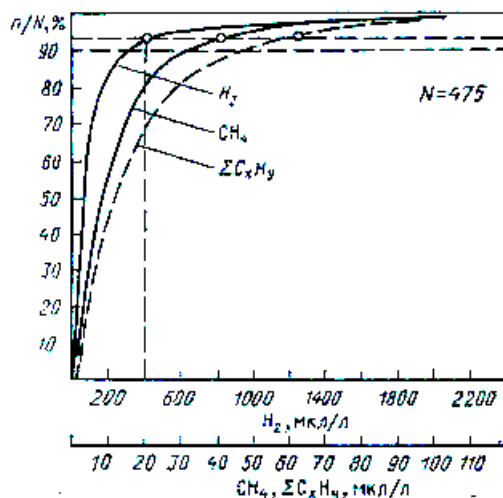


Рис. 4. Интегральные кривые распределения содержания растворенных газов в масле герметичных вводов напряжением 50 кВ.

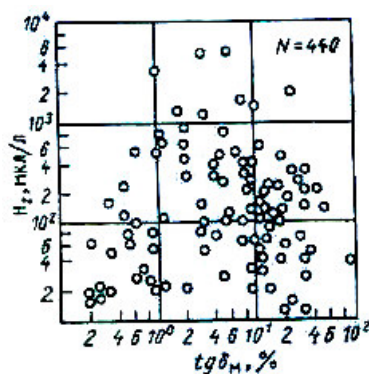


Рис. 5. Соотношение значений $\text{tg } \delta_m$ и концентрации растворенного в масле водорода

В заключение необходимо отметить, что выполнение указанной работы позволило практически устранить повреждаемость изоляции герметичных вводов напряжением 110—150 кВ в Днепроэнерго. Вместе с тем следует отметить, что уровень отбраковки указанных вводов мог бы быть существенно ниже при наличии более совершенных нормативов допустимости их состояния.

ВЫВОДЫ

1. В герметичных вводах наиболее вероятные причины снижения электрической прочности связаны со старением масла, выделением из масла и осаждением на поверхности фарфора и остова проводимого осадка, а также с частичными разрядами на участке изоляции: остов — масло — фарфор, эффективный контроль которых нормативными документами не предусмотрен.

2. Результаты обследования герметичных вводов напряжением 150 кВ в Днепроэнерго позволили предупредить критическое ухудшение изоляции вводов, а также определить целесообразные показатели их состояния: тангенс угла диэлектрических потерь масляного участка, а также состав растворенных в масле газов, включая водород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы испытания электрооборудования. М.: Атомиздат. 1978.
2. Типовая инструкция по эксплуатации маслонаполненных вводов на напряжение 110—750 кВ, ТИ 34-70-026-34. М.: Союзтехэнерго, 1984.
3. Мищенко Э. Н., Шинкаренко Г. В. Хроматографический контроль масла вводов силовых трансформаторов. — Электрические станции, 1986, № 3.