

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ВВОДОВ

Ванин Б. В., Соколов В. В., кандидаты техн. наук
ВНИИЭ — Запорожтрансформатор

Для высоковольтных вводов, входящих в состав ответственного электрического оборудования подстанций высших классов напряжения, актуален контроль состояния изоляции в процессе работы [1]. При этом существенно определить характеристики изоляции, позволяющие выявлять ее дефекты, обусловленные первоначальными повреждениями ее при заводских испытаниях либо возникающие в эксплуатации из-за ухудшения состояния составляющих ее материалов и могущие затем развиваться под рабочим напряжением. Было бы правильно не просто перенести на рабочее напряжение формальное измерение электрических характеристик, нормированных применительно к традиционным профилактическим испытаниям, но подобрать виды испытаний, специально ориентированные на характерные разряды, развивающиеся в высоковольтных вводах в эксплуатации. Попытка этого сделана в настоящей работе.

Электрическая схема замещения для изоляции ввода строится в соответствии с теоретической моделью ввода, имеющего типичные дефекты внутренней изоляции (рис. 1). На этом рисунке изображена в разрезе нижняя часть ввода без специального измерительного конденсатора. В конструкциях с таким конденсатором имеется дополнительная обкладка, играющая в рассматриваемом приложении роль заземляемого экрана для электрода, которым является последняя обкладка остова. В схеме замещения (рис. 2,а) эти обкладки соответственно обозначены как электроды 2, 1. Комплексное (емкостное) сопротивление этого конденсатора обозначено символом Z_n . При отсутствии измерительного конденсатора в конструкции в схеме замещения (рис. 2) электроды 1, 2 должны быть замкнуты накоротко, а заземление электрода 2 снято. Модель и схема замещения учитывают ухудшение изоляции вследствие образования на поверхностях остова и фарфора распределенных слоев проводящих загрязнений. В схеме замещения они представлены условно в виде сосредоточенных сопротивлений R_u, R_ϕ , имеющих емкостные связи C_u, C_ϕ с измерительным выводом. Модель также позволяет учесть типичный развивающийся местный дефект в изоляции остова, представляющий собой небольшой участок с нарастающей проводимостью, шунтирующий две или несколько соседних обкладок.

Местный дефект в изоляции остова в части влияния его на электрические характеристики может быть анализирован с помощью схемы замещения рис. 2, б, получающейся из схемы рис. 2, а, если дефекты, символизируемые наличием R_u, R_ϕ отсутствуют ($R_u, R_\phi \rightarrow \infty$). Учитывая малое внутреннее сопротивление ИП сравнительно с емкостными сопротивлениями Z_m, Z_ϕ или Z_n , проводимостью последних пренебрегаем. Тогда емкость остова при отсутствии дефекта равна $C_0 = CC_1 / (CC + CC_1) = \alpha C / (1 + \alpha)$, где $\alpha = C_1 / C$.

Ток \dot{I} , протекающий через ИП под действием напряжения $\dot{U} = U$ представляется в виде

$$\dot{I} = \frac{\omega C_0 U (1 + \alpha) [\alpha \tau + j(1 + \alpha + \tau^2)]}{(1 + \alpha)^2 + \tau^2}, \quad (1)$$

где $\tau = 1 / \omega RC$ представляет собой тангенс угла потерь зоны дефекта.

Модуль тока $I(\tau) = |\dot{I}|$, протекающего через ИП, отнесенный к начальному значению $I_0 = I(\tau = 0) = \omega C_0 U$ равен

$$I^* = \frac{I(\tau)}{I_0} = \frac{\sqrt{\alpha^2 \tau^2 + (1 + \alpha + \tau^2)^2} (1 + \alpha)}{(1 + \alpha^2) + \tau^2}, \quad (2)$$

а его приращение в процессе развития дефекта

$$\Delta I^* = I^* - I = \frac{\alpha(2 + \alpha)\tau^2}{[(1 + \alpha)^2 + \tau^2] + (1 + \alpha)\sqrt{\alpha^2\tau^2 + (1 + \alpha + \tau^2)^2}}. \quad (3)$$

При $0 < \tau < \infty$ эта величина монотонно возрастает от нулевого значения до $\alpha: 0 \leq \Delta I^* < \alpha$.

Модуль $\left| \dot{I} - \dot{I}_0 \right|$ приращения комплекса тока отличен от приращения $I - I_0$ модуля $I = \left| \dot{I} \right|$

комплекса тока. Соответственно различны и их отношения $\dot{I}_0 = \left| I - I_0 \right| I_0$ и $\Delta \dot{I} = \left| I - I_0 \right| / I_0$ к начальному току. Существенно отметить, что ток небаланса, протекающий через заземленную ИП нейтраль соединенных в звезду ИВ трех одинаковых вводов, находящихся под действием симметричной системы напряжений, возникающий вследствие наличия дефекта в одном из вводов, совпадает с модулем приращения комплекса тока этого поврежденного ввода. Это обусловлено тем, что сумма токов неповрежденных вводов равна I_0 , а сумма всех трех токов равна $I - I_0$. Поэтому относительный модуль тока небаланса равен \dot{I}_0 и, будучи вычислен из выражения (1), представляется в виде

$$0 \leq \dot{I}_0 = \frac{\alpha\tau}{\sqrt{(1 + \alpha)^2 + \tau^2}} < \alpha. \quad (4)$$

Таким образом, относительный ток небаланса изменяется в тех же пределах, что относительное приращение (3) модуля тока в фазе с дефектной изоляцией. Сравнивая выражения (4) и (3), нетрудно убедиться в том, что $\dot{I}_0 > \Delta \dot{I}$ во всем диапазоне изменения τ .

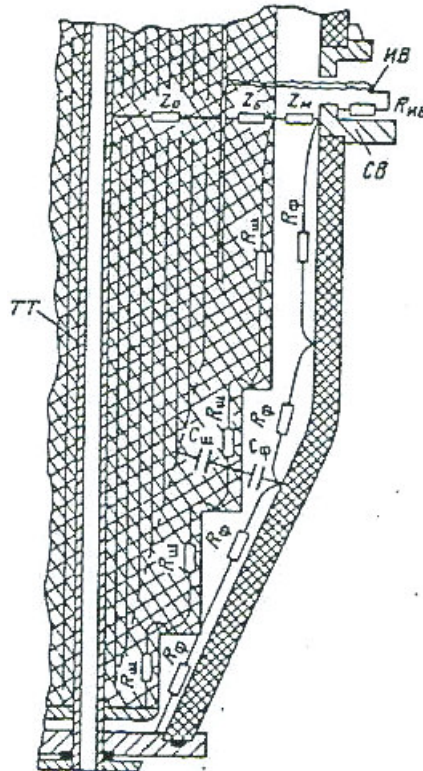


Рис. 1. Разрез нижней части высоковольтного ввода:

ТТ – токопроводящая труба; ИВ – измерительный вывод; СВ – заземляемая соединительная втулка; Z_0 – комплексное сопротивление остова ввода; $Z_б$ – то же бумажной подмотки; $Z_м$ – то же масла; $R_ф, R_ш$ – сопротивление слоев загрязнений на фарфоре и на поверхности остова; $C_ф, C_ш$ – емкостные связи проводящих слоев между собой и с проводящими обкладками остова.

Тангенс угла потерь ввода определяется из формулы (1)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\alpha\tau}{1 + \alpha + \tau^2}.$$

Изменение $\operatorname{tg} \delta$ согласно формуле (5) с развитием дефекта происходит немонотонно с переходом через максимум в точке $\tau_m = \sqrt{1 + \alpha}$, где он принимает значение $\operatorname{tg} \delta_m = \alpha / 2\sqrt{1 + \alpha} < \frac{1}{2} \alpha$. В отличие от этого приращение тангенса угла θ приращения комплекса тока происходит монотонно в соответствии с зависимостью

$$\operatorname{tg} \theta = (1 + \alpha) / \tau.$$

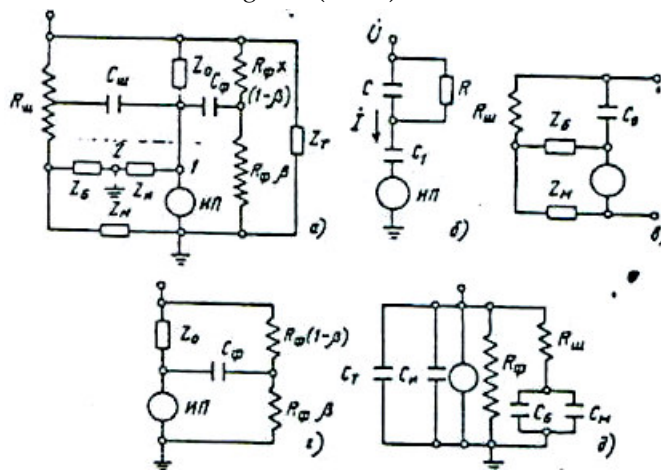


Рис. 2. Электрическая схема замещения изоляции ввода, соответствующая теоретической модели:

\dot{U} - напряжение на ТТ ввода относительно земли; Z_t, Z_m, Z_b, Z_n, Z_o - комплексные (емкостные) сопротивления главной изоляции трансформатора, масляного промежутка, бумажной подмотки, измерительной обкладки и остова ввода; ИП - измерительный прибор; $R_{ш}, R_f$ - сопротивления шунтирующих слоев загрязнений на остова и на фарфоре; $C_{ш}, C_f$ - элементы условной емкостной между шунтирующими слоями и последней обкладкой остова; β - условный коэффициент распределения сопротивления шунтирующего слоя загрязнения на фарфоре относительно емкостной связи; а - общая модель; б - модель местного дефекта в изоляции остова; в - модель загрязнения поверхности остова; г - модель загрязнения поверхности фарфора; д - схема измерения для оценки состояния поверхности остова и фарфора с использованием постороннего источника

Значения относительного изменения тока изоляции и особенно небаланса таких токов всегда выше амплитуды тангенса угла потерь. Нетрудно показать, что в точке максимального значения $\operatorname{tg} \delta_m \Delta \dot{I}$ из выражения (3) составляет $\Delta \dot{I}(\operatorname{tg} \delta_m) = \alpha / (1 + \sqrt{1 + \alpha}) > \operatorname{tg} \delta_m$, модуль тока небаланса принимает значение $I_0(\operatorname{tg} \delta_m) = \alpha / \sqrt{2 + \alpha} > \Delta \dot{I} > \operatorname{tg} \delta_m$. Преимущество контроля тока небаланса перед $\operatorname{tg} \delta$ в процессе развития дефекта в остова иллюстрирует также рис. 3, показывающий, что при отсутствии изменения тока небаланса попытки диагностировать наличие дефекта посредством измерения $\operatorname{tg} \delta$ при рабочем напряжении и тем более при принятом напряжении 10 кВ нецелесообразны.

Также представляется малоперспективной альтернатива измерению $\operatorname{tg} \delta$ путем измерения фазового угла приращения тока φ (дополняющего угол θ до $\pi/2$), так как, хотя его величина поначалу растет от нулевого значения пропорционально степени развития дефекта, но происходящие при этом изменения активной и реактивной составляющих тока, через которые и определяется φ , весьма малы и трудно уловимы измерительным прибором. На последующих же стадиях развития дефекта скорость роста φ замедляется, стремясь к нулю.

Наличие определенного предела α для величины реакции измеряемой характеристики I_0 на развивающийся дефект ставит объективно необходимую границу чувствительности измерений по этому методу. Она определяется указанным пределом α , который в свою очередь определяется характеристиками конструкции ввода — отношениями емкостей C_1/C , не затронутой дефектом и включающий дефект частей остова, причем минимальное значение это отношение принимает, когда дефект локализован на некотором участке между двумя соседними обкладками.

Из этих условий целесообразно определять нормативы контроля характеристик конкретной

конструкции. На рис. 4 для наиболее распространенных конструкции вводов 110 — 750 кВ приведены максимальные приращения тока небаланса, а также $\text{tg } \delta$ при локализации и максимальном развитии дефекта в одном слое (между промежуточными обкладками). На рис. 4, б приведены ориентировочные данные о величинах токов утечки при наибольших рабочих напряжениях в каждом классе.

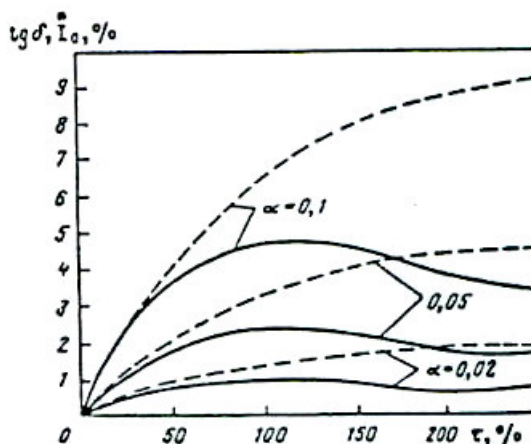


Рис. 3. Зависимость $\text{tg } \delta$ (сплошная линия) и относительного тока небаланса I_0 (прерывистая линия) от тангенса угла потерь τ дефектного участка

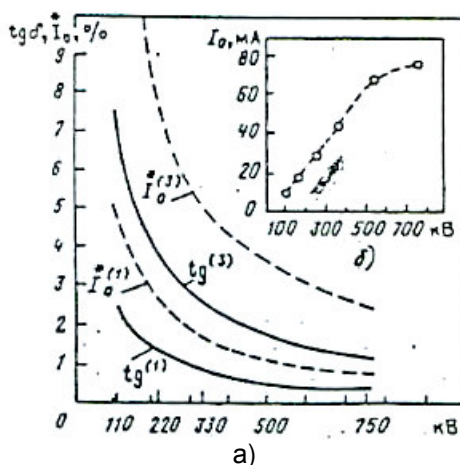


Рис. 4. Максимальное увеличение $\text{tg } \delta$ и относительного модуля тока небаланса ΔI_0 при местном дефекте в одном слое $\text{tg}^{(1)}, I_0^{(1)}$ и в трех слоях $\text{tg}^{(3)}, I_0^{(3)}$ конденсаторных вводов разных классов напряжения (а) и емкостный ток I_0 утечки вводов распространенных конструкций (б) при рабочем напряжении

Представляется, что значения тангенса угла потерь и тока небаланса, соответствующие максимальному развитию дефекта в одном слое (кривые $\text{tg}^{(1)}, I_0^{(1)}$) могут быть приняты в качестве норматива на предельно допустимое приращение значений этих характеристик по условию индикации местного развивающего дефекта в остове при рабочем напряжении.

Заметим, что предлагаемые нормы близки к предельно допустимым значениям, установленным в «Нормах испытаний электрооборудования для условий измерений при 10 кВ, для классов напряжения 330—750 кВ», но заметно ниже значений для классов 110—220 кВ. Так, в Нормах в эксплуатации допускается приращение $\text{tg } \delta$ по классам напряжения: 110 кВ — 0,7%, 150—220 кВ — 0,6%, 330-500 кВ — 0,4%, 750 кВ — 0,2% (сравните рис. 4, кривая $\text{tg}^{(1)}$). Вместе с тем, очевидно, что при наличии дефекта значение $\text{tg } \delta$ при рабочем напряжении по сравнению с измеренным при 10 кВ должно быть значительно большим (по имеющимся данным в пять и более

раз), так что при отбраковке ввода по $\text{tg}\delta$ при 10 кВ можно всегда убедиться в правильности результата, выполнив измерение при рабочем напряжении.

Контроль тока небаланса — наиболее чувствительной характеристики — исключает необходимость измерения $\text{tg}\delta$. В отечественной практике подобный контроль осуществляется для оборудования 500 кВ и выше в устройствах КИВ и КИП, причем сигнальный элемент в КИВ-500 имеет уставку на 5—7 % номинального тока утечки на сигнал и на 20—25 % на отключение. Опыт использования таких устройств в течение последних 20 лет показывает, что они эффективно работают в качестве защитных средств при значительном развитии дефекта (на грани аварии), причем интервал от сигнала до отключения (десятки минут, минуты) мал и не дает возможности принятия иных мер, кроме немедленного отключения. Как видно из изложенного в данной работе, измерение тока небаланса может быть основным методом непрерывного или периодического контроля вводов при рабочем напряжении, причем порог чувствительности прибора при индикации дефекта во вводах высших, классов должен быть на уровне одного процента от номинального тока утечки.

Изложенные рассуждения также могут быть использованы и для других высоковольтных аппаратов с конденсаторной или бумажно-масляной изоляцией.

Загрязнение поверхности остова по-разному индицируется электрическими измерениями через ИВ для вводов, имеющих или не имеющих экран (электрод 2 у измерительной обкладки на рис. 2). Во втором случае, который рассмотрен здесь, возможно непосредственное перетекание тока от ТТ через загрязненную поверхность на ИВ и тогда влияние его на результат измерения сильное, в отличие от первого случая, когда заземленный электрод 2 препятствует такому непосредственному перетеканию, и ток от загрязнения может быть перенесен к ИВ лишь обходным путем через частичные емкости $C_{\text{ш}}$ и далее через соответствующие им емкости обкладок остова (рис. 1, 2). Считая, что других дефектов нет ($R, R_{\phi} \rightarrow \infty$), схему замещения для рассматриваемого случая можно представить рис. 2, в. Несложные вычисления приводят к выражению для тока I , протекающего через ИП, в виде

$$I = \frac{\omega C_0 U [\alpha' i + j(1 + \alpha' + i^2)]}{1 + i^2}, \quad (6)$$

где

$$\alpha' = \frac{C_{\phi}}{C_0}, i = \omega R(C_{\phi} + C_m). \quad (7)$$

Относительное приращение ΔI^* модуля тока выражается формулой

$$0 \leq \Delta I^* = \frac{\alpha'(2 + \alpha')}{1 + \sqrt{\alpha'^2 i^2 (1 + \alpha' + i^2)^2}} < \alpha'. \quad (8)$$

Оно монотонно возрастает от нуля до α' по мере увеличения проводимости загрязнения (уменьшения i от бесконечности до нуля).

Тангенс угла потерь из выражения (6)

$$\text{tg}\delta = \frac{\alpha' i}{1 + \alpha' + i^2}. \quad (9)$$

По мере уменьшения i он возрастает до максимального значения

$$0 \leq \text{tg}\delta \leq \text{tg}\delta_m = \frac{\alpha'}{2\sqrt{1 + \alpha'}} < \frac{1}{2} \alpha' \quad (10)$$

при $i = i_m = \sqrt{1 + \alpha'}$, а затем убывает до нуля.

Ток небаланса может быть определен из выражения (6) как $I - I_0$.

Тогда

$$\frac{I - I_0}{I_0} = \frac{\alpha'(i - j)}{1 - i^2}; \quad (11)$$

$$0 \leq I_0^* = \frac{|I - I_0|}{I_0} = \frac{\alpha'}{\sqrt{1+i^2}} < \alpha'. \quad (12)$$

Как и в случае, рассмотренном в предыдущем разделе, измерение приращения тока предпочтительнее измерения тангенса угла потерь, а измерение относительного модуля тока небаланса I_0^* представляется более удобным, чем измерение приращения модуля тока, но во всех случаях не должно возникать затруднений в связи с недостаточной чувствительностью ИП для индикации дефекта такого вида, так как верхний предел для всех трех характеристик достаточно высок, составляя десятки и сотни процентов.

Последнее означает, что при загрязнении поверхности остова рост тока небаланса и $\text{tg } \delta$ может быть существенно большим, чем при развитии местного дефекта внутри остова, однако степень опасности для оборудования в первом случае значительно ниже.

Например, неоднократно отмечались случаи повышения $\text{tg } \delta$ изоляции вводов и трансформаторов тока с выраженной зависимостью от напряжения по причине отложения шлама из состаренного масла на поверхности остова без каких-либо повреждений. Для распознавания вида дефекта требуется использование дополнительных методов, в частности анализ характеристик масла и состава, растворенных в масле газов.

Загрязнение поверхности фарфора анализируется здесь также при помощи схемы рис. 2 в предположении, что $R, R_{\text{ш}} \rightarrow \infty$. В данном случае влияние тока в загрязнении на ИП может осуществляться только через частичные емкости C'_{ϕ} на остов и через остов на ИВ независимо от того имеет или нет ввод заземленный экран (электрод 2). Ввиду многих неопределенностей относительно площади, охваченной загрязнением, и распределения последнего на ней построение детальной схемы замещения в данном случае нецелесообразно, поэтому здесь используется намеренно упрощенная схема замещения с сосредоточенными постоянными, изображенная на рис. 2, г. Влияние загрязнения на ИП представлено условно сосредоточенной емкостью C_{ϕ} , присоединенной непосредственно к ИВ, а связь с загрязнением отнесена к условной точке на нем, делящей его сопротивление в некотором отношении $\beta/(1 - \beta)$, где $0 < \beta < 1$. Такое представление имеет некоторое основание в том смысле, что, во-первых, и данная упрощенная модель, и модель, учитывающая распределенный характер параметров цепи, должны качественно правильно выражать монотонный, но не беспредельный характер увеличения тока и ИП по мере развития дефекта (уменьшения R_{ϕ}) и, во-вторых, если бы имелись фактические данные о распределении параметров цепи, характеризующих загрязнение, то они принципиально могли бы быть учтены в более точной схеме замещения, а для последней всегда могла бы быть построена упрощенная схема рассматриваемого вида с таким образом подобранными параметрами, чтобы ее график для какой-либо исследуемой характеристики пересекал соответствующий точный график в любой выбранной точке.

Ввиду этого рассматриваемая модель должна давать приближенно верную, с точностью до порядка величины, оценку тока в ИП в рамках возможных пределов его изменения.

Используя схему рис. 2, г, найдем оценку тока i , протекающего через ИП

$$0 \leq \Delta I = \frac{\gamma(2 + \gamma)}{(1 + i^2) + \sqrt{\gamma^2 i^2 + (1 + \gamma + i^2)^2}} < \gamma, \quad (13)$$

где $\gamma = \alpha\beta$; $\alpha = C_{\phi} / C_0$; $i = \omega\beta(1 - \beta)R_{\phi}C_{\phi}$.

Модуль тока небаланса равен:

$$0 \leq I_0^* = \frac{\gamma}{\sqrt{1+i^2}} < \gamma. \quad (14)$$

Тангенс угла потерь изменяется, как и в предыдущих случаях, немонотонно, проходя в точке $i = i_m = \sqrt{1 + \gamma}$ максимум, равный

$$\text{tg } \delta_m = \gamma / 2\sqrt{1 + \gamma} < \frac{1}{2} \gamma.$$

Так же, как и в предыдущих случаях, предпочтительной характеристикой дефекта является

ток небаланса, предельное значение которого определяется конструкцией ввода, однако в отличие от местного дефекта в остове это значение по мере развития дефекта не увеличивается и в отличие от случая загрязнения поверхности остова предельное отклонение тока небаланса при увеличении проводимости фарфоровой покрышки значительно меньше, будучи ограниченной небольшой величиной отношения C_{ϕ}/C_0 .

Ориентировочная оценка необходимого уровня чувствительности ИВ для обнаружения дефекта этого вида под рабочим напряжением может быть сделана по величине γ . Оценка последней при $\beta \approx 0,5$, C_{ϕ} порядка единиц или десятков пикофарад и $C_0 \approx 500$ пФ и соответственно $\alpha \approx 10/500 = 0,02$ дает $\gamma \approx 0,01$, т. е. требуемая чувствительность оказывается сравнимой по уровню, который требуется для индикации минимальных локализованных дефектов в остове.

В действительности чувствительность может в зависимости от фактической величины C_{ϕ} быть даже выше приведенной здесь осторожной оценки. Например, значительное увеличение проводимости внутренней поверхности нижней фарфоровой покрышки ввода ГМТПА-500/1600 в стадии, предшествующей полному перекрытию, вызвало увеличение тока небаланса на 1 — 1,5 %.

У другого ввода такого же типа наблюдался рост тока небаланса более чем на 20 % в сравнении с номинальным (рис. 4, б и рис. 5). При осмотре его было установлено наличие перекрытия фарфора в нижней части по внутренней поверхности.

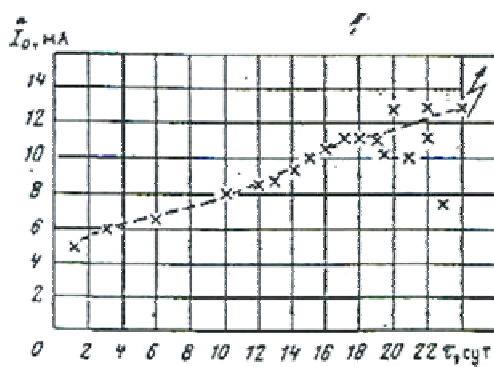


Рис. 5. Изменение тока небаланса I_0 вводов 500/1600 в процессе развития перекрытия по фарфору

Следует ожидать, что для индикации загрязнений на остове вводов, имеющих заземленный электрод 2 (рис. 2), требования к чувствительности ИП должны быть такие же, как и при загрязнении фарфора, поскольку механизмы влияния этих двух видов дефектов на ИП в данном случае сходны.

Контроль характеристик отключенного от рабочего напряжения ввода фактически ограничивается в условиях эксплуатации измерением тангенса угла потерь, так как измерение других характеристик становится нецелесообразным из-за меньшего по сравнению с рабочим напряжением используемого при этом испытательного напряжения от постороннего источника. Однако возможность использования иных схем измерений дает дополнительные средства для индикации наличия и распознавания характера дефекта. Целесообразно использование следующих схем.

1. Измерение по «перевернутой» схеме на участке измерительный вывод — соединительная втулка, с подключением измерительного вывода моста к ИВ.
2. То же с заземлением ТТ.
3. То же, что первая схема с присоединением ИВ к ТТ.

По первой схеме измеряется $\text{tg } \delta_3$ и оценивается $\text{tg } \delta$ масла во вводах без измерительного конденсатора (не имеющих заземленного электрода 2 на рис. 2). В этом случае трансформатор предварительно прогревается нагрузочными потерями до 60—70 °С с целью повышения температуры масла во вводе. Эффективность этого метода подтверждена результатами обследования большого числа вводов [3].

По второй схеме уточняется состояние ввода без измерительного конденсатора с исключением влияния поверхности фарфора. Эта схема позволяет также определить $\text{tg } \delta_3$ и

оценить состояние масла без расшивки трансформатора.

По третьей схеме определяется при наличии заземленного электрода 2 загрязнение остова и (или) фарфора при исключенном влиянии возможного дефекта в остова. При отсутствии заземленного электрода 2 по этой схеме определяется загрязнение фарфора при исключенном влиянии дефекта в остова, и, частично, загрязнения его поверхности. Последнее оказывается достижимым благодаря тому, что $R_{ш}$ шунтируется сопротивлением Z_0 .

Для вводов с измерительным конденсатором с большой емкостью ($C_n \gg C_0$), с заземленной внутри обкладкой (такую конструкцию имеют, наиболее распространенные вводы 330—750 кВ) третья схема предоставляет возможность оценки состояния поверхности остова и фарфора, и, косвенно, состояния масла, если причиной загрязнения поверхности являются продукты, образованные в результате разложения масла.

Схема замещения для этого случая представлена на рис. 2, д. Для упрощения выкладок здесь пренебрегаем емкостными связями $C_{ш}$, $C_{ф}$, что должно давать запас в оценке необходимого порога чувствительности, поскольку величина проводимости при этом оказывается несколько заниженной.

Тангенс угла потерь для этой схемы определяется в виде

$$\operatorname{tg} \delta = i + \frac{\alpha(\tau - i)}{1 + \alpha + \tau^2}, \quad (15)$$

где $i = \frac{1}{\omega R_{ф}(C_n + C_{\tau})}$; $\tau = \omega R_{ш}(C_0 + C_m)$; $\frac{C_0 + C_m}{C_n + C_{\tau}} = \alpha$.

Из выражения (15) видно, что при $i \rightarrow \infty$, $\operatorname{tg} \delta \rightarrow \infty$, при изменении τ от 0 до ∞ , $\operatorname{tg} \delta$ изменяется в пределах от $i/(1 + \alpha)$ до i немонотонно, достигая в точке $\tau_m = i + \sqrt{1 + \alpha + i^2}$ максимума

$$\operatorname{tg} \delta_m = i + \frac{\alpha}{2(i + \sqrt{1 + \alpha + i^2})}. \quad (16)$$

При индикации дефектов, обусловленных проводящими отложениями на поверхности фарфора, выделившимися из масла, для усиления влияния $R_{ф}$ на $\operatorname{tg} \delta$ измерения целесообразно проводить при температуре ввода больше 30—40 °С (после нагрева масла в трансформаторе нагрузочными потерями).

Для уточнения дефекта можно выполнить дополнительное измерение по второй схеме, при которой влияние фарфора исключается.

При индикации дефектов, связанных с проводящими отложениями на поверхности остова при отсутствии дефектов на поверхности фарфора, следует учитывать наличие максимума $\operatorname{tg} \delta$, равного

$$\operatorname{tg} \delta'_m = \frac{\alpha}{2\sqrt{1 + \alpha}}.$$

В конструкциях вводов 330—750 кВ отношения емкостей $(C_0 + C_m)/C_n = 0,5 \div 0,9$ и с учетом емкости обмоток трансформатора значения α составляют $\alpha \approx 0,2 \div 0,4$. Соответственно значения $\operatorname{tg} \delta_m$ могут достигать 10—17%, что подтверждает перспективность использования данной схемы контроля.

Контроль характеристик масла во вводах целесообразен для индикации и уточнения характера повреждений, возникающих вследствие развития рассмотренных ранее дефектов, а также для оценки степени загрязнения масла продуктами термоокислительного и электрического, старения изоляционных материалов аппарата [2].

Опыт показал эффективность использования для диагностики состояния вводов метода хроматографического анализа растворенных в масле газов [3], позволяющих в малообъемных аппаратах выявлять начальные стадии повреждений, при которых выделяются единицы или даже доли миллилитров газа при использовании для анализа весьма малых (10—15мл) объемов масла. Последнее обстоятельство позволяет при необходимости осуществлять отбор проб из некоторых конструкций вводов (например, вводы с баками давления) и под напряжением.

Другие проверки масла могут быть ограничены измерением тангенса угла потерь при нескольких температурах (20, 70 и 90 °С). Причем эту характеристику следует рассматривать прежде всего как индикатор примесей и при ее оценке целесообразно обращать внимание не столько на абсолютную величину отклонения, сколько на вид примесей, приведший к росту параметра. Опыт показывает, например, что увеличение тангенса угла потерь до 50—100 % при 90 °С за счет растворимых полярных продуктов (лаки, смолы и др.) может практически не снижать электрическую прочность масла и аппарата в целом. В то же время увеличение $\text{tg } \delta$ до 7—10 % из-за образования нерастворимых проводящих примесей, могущих при отложении на поверхностях изменять характер распределения напряжения, может быть опасным.

Важно отметить, что в конструкциях вводов без заземленной внутри обкладки рассмотренные ранее электрические характеристики достаточно полно отражают изменение диэлектрических свойств всех основных изоляционных компонентов, так что измерение характеристик проб масла может быть только дополнением и уточнением диагноза дефекта, выявленного внешним измерением.

ВЫВОДЫ

1. Локализованные дефекты в остовах, характеризующиеся нарастанием проводимости в процессе развития, а также дефекты, связанные с образованием проводящих отложений на поверхности остова или фарфора, могут быть индцированы при работе ввода на стадиях развития, еще не приводящих к его разрушению, по регистрации тока небаланса.

2. Среди других характеристик: угла диэлектрических потерь или его тангенса и модуля комплексной проводимости ток небаланса более предпочтителен по чувствительности и практичности использования при работе ввода.

3. Упомянутые характеристики целесообразно использовать лишь как дополнительные при обследовании состояния ввода, подозрительного по наличию дефекта, определенному по току небаланса.

4. Для вводов без заземленного экранирующего электрода измерение внешних электрических характеристик оказывается достаточным для контроля практически всех типичных дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сви П.- М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. М.: Энергия. 1980.
2. Повышение эффективности профилактических испытаний высоковольтных вводов / Соколов В. В., Ванин Б. В., Носулько Д. Р. и др.— Электрические станции. 1989. № 11.
3. Носулько Д. Р., Соколов В. В., Назаров А. И. Опыт эксплуатации герметичных маслонеполненных вводов силовых трансформаторов.— Электрические станции. 1987. № 8.