

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Филиал БНТУ “Институт повышения квалификации и переподготовки кад-
ров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики
БНТУ”

Кафедра «Метрология и Энергетика»

Куличенков В.П., Паперный Л.Е.

Испытания силовых трансформаторов

Учебно-методическое пособие для слушателей курсов повышения квалифи-
кации энергетиков и студентов энергетического факультета БНТУ

Электронный учебный материал

Минск ◇ БНТУ ◇ 2015

УДК 621.314.222.6 - 048.24(075.8)

ББК 31.261.8я7

П17

Рецензенты:

Карпович С.С., кандидат технических наук,
зав. кафедрой “Новые материалы и
технологии” ИПК и ПК БНТУ

Романенков В.Е., кандидат технических наук,
доцент, вед. науч. сотр. кафедры “Новые
материалы и технологии” ИПК и ПК БНТУ

Учебно-методическое пособие предназначено для курсов повышения квалификации в ИПК и ПК БНТУ и может быть использовано специалистами предприятий ГПО “Белэнерго” и студентами энергетического факультета БНТУ.

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. 2964732
E-mail: rectorat@ipk.by
Регистрационный номер №

© БНТУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Изоляционные характеристики материалов, применяемых в энергетике	4
2 Измерение диэлектрических характеристик изоляции	11
3 Измерение сопротивления изоляции	19
4 Испытание напряжением переменного тока	21
5 Испытание напряжением постоянного тока	23
6 Общие требования при проведении испытаний повышенным напряжением.	25
7 Испытание трансформаторов. Методы определения параметров изоляции	26
8 Измерение потерь холостого хода при малом возбуждении	44
9 Определение группы соединения обмоток	47
10 Определение коэффициента трансформации	51
11 Измерение сопротивления обмоток постоянному току	53
12 Измерение сопротивления обмоток постоянному току методом падения напряжения	53
13 Измерение Z_k трансформаторов	55
14 Оценка новых методов диагностики состояния трансформаторов	61
15 Наладка переключающих устройств трансформаторов (ПУ)	62
16 Реакторные ПУ	63
17 Быстродействующие резисторные ПУ	66
Список используемой литературы	76

ВВЕДЕНИЕ

На первых стадиях развития энергетики повреждения оборудования и сопутствующие им аварии были единственным критерием оценки надежности оборудования и правильности выбранных методов его эксплуатации. Широкое внедрение профилактических испытаний позволило значительно сократить количество аварий и повысить надежность энергоснабжения.

Задачей профилактических испытаний является обнаружение и оценка степени развития дефектов оборудования, возникающих в процессе эксплуатации, для того чтобы своевременным ремонтом устранить дефект или прекратить его дальнейшее развитие.

Однако для уменьшения трудоемкости и времени простоя из программы исключаются те испытания, которые направлены на обнаружение дефектов, не представляющих особой опасности для целостности оборудования и поддающихся обнаружению более простым методом. Профилактические испытания должны давать возможность определения различных дефектов в начальной стадии развития без повреждения самого объекта.

1 ИЗОЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Жидкие изоляционные материалы получили очень большое применение в энергетике в виде трансформаторного масла. Электрическая прочность трансформаторного масла обычно поддерживается в пределах 80 – 100 кВ/см. Значительное снижение пробивного напряжения ($U_{пр}$) масла обычно связано с его загрязнением или увлажнением. При увеличении расстояния между электродами пробивное напряжение возрастает, но уменьшается равномерность электрического поля, уменьшается $U_{пр}/см$ и может достичь 10 - 20 кВ/см. Острые края и ребра также уменьшают $U_{пр}$. Для повышения $U_{пр}$ применяют экранирование путем бумажного покрытия кромки электродов или установки электроизоляционных барьеров.

Загрязнение масла механическими примесями, частицами угля, волокнами бумаги и особенно попадание воды в масло резко снижают $U_{пр}$.

Примеси воды в количестве 0,01 % делают масло уже непригодным. Дальнейшее увеличение содержания воды уже не имеет значения, она выпадает в осадок.

Загрязнение масла лаками и красками увеличивает тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) масла в 100-300 раз и влияет на $tg\delta$ оборудования в целом. Твердые изоляционные диэлектрики могут состоять из органических и неорганических материалов. К твердым материалам относятся: волокнистые материалы (дерево, бумага, картон), а также изготавливаемые с использованием их слоистые пластики (бакелит, гетинакс), керамические материалы, в числе которых важнейшими являются фарфор и стекло, наполнители, главным образом, минеральные вещества. К твердым причисляют заливочные термопластичные массы, эпоксидные компаунды, силиконовую резину.

На рисунке 1 приведена кривая зависимости пробивного напряжения от влагосодержания масла.

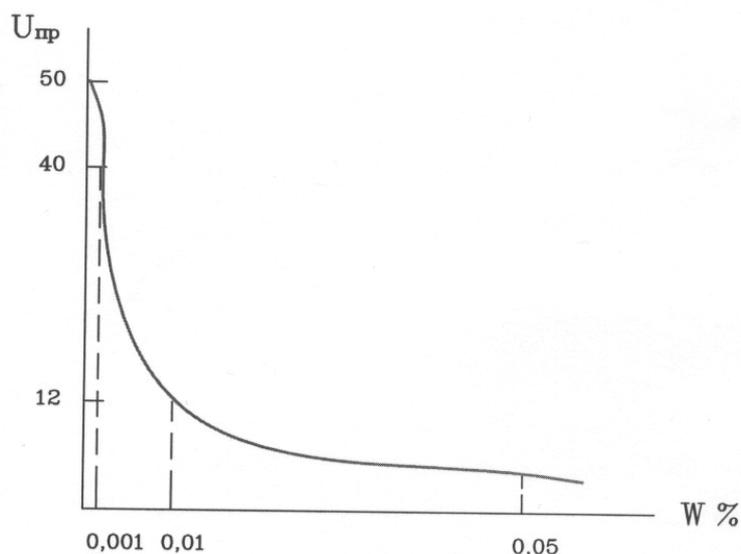


Рисунок 1. Кривая зависимости пробивного напряжения $U_{пр}$ от влагосодержания масла

По величине электрической прочности твердые диэлектрики значительно превосходят газообразные и жидкие диэлектрики, но зависят от вида, рода и состояния применяемых материалов.

Основными видами дефектов твердой изоляции являются: внешнее загрязнение, увлажнение, нарушение однородности, потеря электрической и механической прочности.

В процессе деградации бумажной изоляции может выделиться вода до 6 % массы изоляции. Газообразные диэлектрики в практике встречаются в виде воздуха, элегаза (шестифтористой серы). Воздух между шаровыми электродами при равномерном поле имеет электрическую прочность порядка 15 – 20 кВ/см. Газообразный диэлектрик подвержен загрязнению и увлажнению, что изменяет его диэлектрические характеристики. В последнее время широкое применение получила вакуумная изоляция, применяемая в выключателях.

В диэлектрике, находящемся в электрическом поле, возникает поляризация – явление, связанное со взаимодействием между полем и электрически заряженными частицами вещества. При этом на границе диэлектрика появляются заряды, противоположные зарядам, создающим внешнее поле. Поскольку при поляризации происходит перемещение заряженных частиц, то на это затрачивается энергия поля.

Процессы поляризации в диэлектриках совершаются в течении некоторого конечного времени, а при приложении переменного тока повторяются каждый полупериод.

Наибольшее значение для изоляции имеет внутрислойная поляризация – накопление (абсорбция) зарядов в пограничных слоях, имеющих отличающиеся проводимости и диэлектрические проницаемости.

Внутрислойная поляризация – это медленный процесс, соизмеримый по времени с частотой переменного тока. Если изоляция сухая, то время поляризации может быть более полупериода.

При быстрых видах поляризации при перемене знака напряжения энергия, затраченная на поляризацию, полностью возвращается источнику тока. При медленных видах поляризации, когда поляризация отстает от изменения напряжения, энергия поляризации возвращается источнику не полностью, часть ее рассеивается в веществе в виде тепла. Кроме того, часть энергии внешнего поля необратимо затрачивается при взаимодействии с ним электрически заряженных частиц вещества, находящихся в тепловом движении.

Суммарная мощность потерь в диэлектрике, рассеиваемая при приложении к нему переменного напряжения, называется диэлектрическими потерями.

Как правило, изоляционные конструкции имеют смешанные диэлектрики, т.е. как жидкую, так и твердую изоляцию.

Для многослойной изоляции схема замещения будет представлять цепочку последовательно включенных емкостей, схема замещения приведена на рисунке 2.

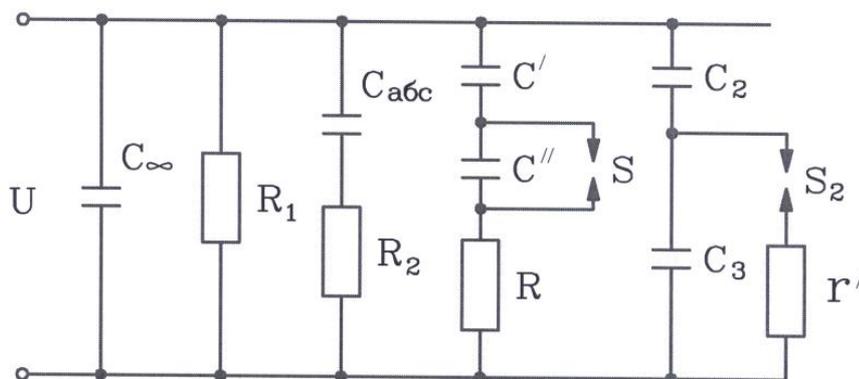


Рисунок 2. Схема замещения диэлектрика:

C_{∞} - геометрическая емкость (емкость вакуума и емкости мгновенной поляризации);

R_1 - сопротивление сквозной проводимости;

C_{abs} и R_2 – цепочка абсорбирующей составляющей и потерь диэлектрика;

C' , C'' , R – цепочка, в которой возможны потери из-за ионизации при наличии искрового промежутка S (при наличии частичных разрядов).

Ветвь S_2 , C_2 и C_3 определяет величину эквивалентного воздушного промежутка. Эта величина определяет разрядное или пробивное напряжение изоляции.

Обычно потери энергии в диэлектрике от проходящих через него токов сквозной проводимости по сравнению с потерями на поляризацию малы и

имеют значение лишь при больших увлажнениях или при высоких температурах, т.е. $\dot{i}_{абс} \gg \dot{i}_{пр}$, поэтому чаще измеряют $\dot{i}_{абс}$.

Если к изоляции подвести постоянное напряжение, то протекающий ток будет складываться из следующих составляющих в соответствии с рисунком 3.

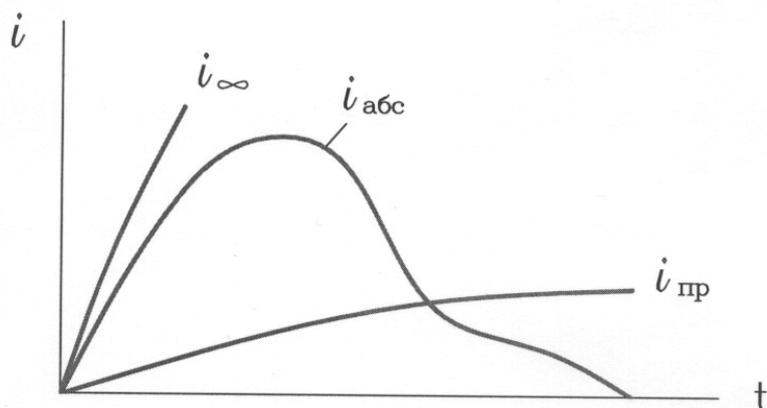


Рисунок 3. Кривые мгновенных значений токов, протекающих через изоляцию:

\dot{i}_{∞} - ток, идущий на зарядку геометрической емкости;

$\dot{i}_{абс}$ - ток абсорбции;

$\dot{i}_{пр}$ - ток проводимости.

В момент включения распределение напряжения по слоям изоляции будет определяться их емкостями, вслед за этим начнется перераспределение зарядов в соответствии с проводимостью слоев.

Векторная диаграмма токов, протекающих через диэлектрик, приведена на рисунке 4.

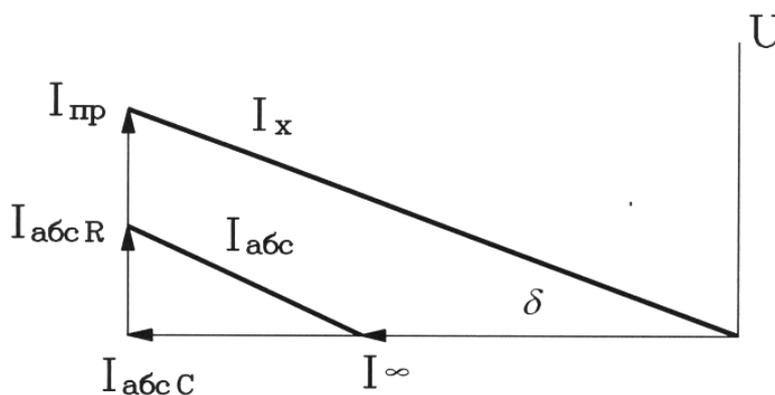


Рисунок 4. Векторная диаграмма токов в диэлектрике:

I_{∞} - ток, обусловленный мгновенной поляризацией;

$I_{абсR}$ - активная составляющая тока абсорбции;

$I_{абсC}$ - емкостная составляющая тока абсорбции;

$I_{пр}$ – ток сквозной проводимости;
 I_x – суммарный ток через диэлектрик;
 $I_{абс}$ – суммарный ток абсорбции.

Из векторной диаграммы видно:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c}, \quad (1)$$

где I_a – активный ток через диэлектрик ($I_a = I_{абс}R + I_{пр}$),

I_c – емкостной ток через диэлектрик ($I_c = I_{абс}C + I_{\infty}$).

Диэлектрические потери обуславливаются наличием активной составляющей $I_{абс}R$, так как $I_{абс}R \gg I_{пр}$.

Полные потери в диэлектрике:

$$P = UI_a = UI_c \operatorname{tg} \delta = \omega c_x U^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, f – частота электрического тока,

C_x – емкость объекта,

U – напряжение, приложенное к объекту,

I_c – емкостная составляющая тока через диэлектрик.

Из формулы (2) видно, что потери в диэлектрике пропорциональны $\operatorname{tg} \delta$. Если полные потери зависят от многих факторов, то состояние изоляции определяется только величиной $\operatorname{tg} \delta$:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{UI_c} = \frac{I_a}{I_c} \quad (3)$$

В практике величину $\operatorname{tg} \delta$ вместо абсолютного значения выражают в процентах:

$$\operatorname{tg} \delta \% = 100 \operatorname{tg} \delta \quad (4)$$

Величину $\operatorname{tg} \delta$ можно представить:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{i_a V}{i_c V} = \frac{i_a}{i_c}, \quad (5)$$

где i_a , i_c – токи активный и емкостной, протекающие через единицу объема диэлектрика,

V – объем диэлектрика.

Из этой формулы видно, что $\operatorname{tg} \delta$ изоляции диэлектрика не зависит от его объема.

Величина $\operatorname{tg} \delta$ дает усредненную объемную характеристику состояния диэлектрика. Действительно, активная составляющая тока, вызванная местным дефектом, относится к общему емкостному току. Чем больше емкость объекта, тем меньше влияет на общий $\operatorname{tg} \delta$ величина потерь в местном дефекте.

Местный, а также сосредоточенный дефекты диэлектрика, например, при увлажнении, могут быть не выявлены при измерении $\operatorname{tg} \delta$, так как токи,

определяемые дефектом могут оказаться значительно меньше токов емкости в целом.

По мере увеличения приложенного напряжения к диэлектрику $\text{tg}\delta$ изменяется незначительно. Лишь после того как возникает ионизация во включениях диэлектрика, вызывающая дополнительные потери, $\text{tg}\delta$ будет резко возрастать. Изменение $\text{tg}\delta$ при ионизации приведено на рисунке 5.

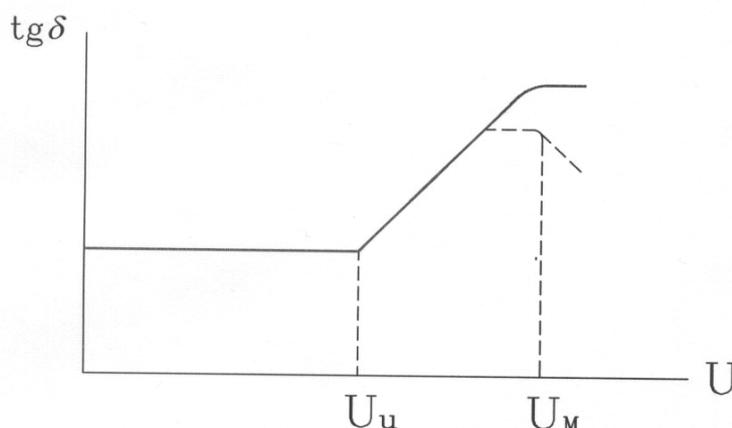


Рисунок 5. Кривая ионизации диэлектрика:

U_i – напряжение начала ионизации;

U_m – напряжение ионизации для бумажно-бакелитовой изоляции.

У бумажно-масляной изоляции процесс ионизации с ростом напряжения охватывает все больший объем, вызывая интенсивное разрушение изоляции и ее пробой. У бумажно-бакелитовой изоляции при подъеме напряжения выше порога ионизации возможно уменьшение $\text{tg}\delta$ (пунктир на кривой).

Величина $\text{tg}\delta$ значительно зависит от частоты приложенного к диэлектрику напряжения. С понижением частоты $\text{tg}\delta$, как правило, увеличивается. Все нормы на $\text{tg}\delta$ даны для частоты 50 Гц, Поэтому все измерения необходимо производить при частоте 50 Гц.

При повышении температуры диэлектрика или его влажности уменьшается величина R_2 (см. схему замещения изоляции), что вызывает рост $\text{tg}\delta$. Рост $\text{tg}\delta$ будет происходить до тех пор, пока время поляризации не станет равным полупериоду промышленной частоты, а затем потери, связанные с поляризацией, должны уменьшаться, так как ток $I_{abc}R$ будет находиться в противофазе с приложенным напряжением.

Этот эффект очень чувствуется при измерении $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла с механическими примесями. Поэтому $\text{tg}\delta$ масла, которое готовится к заливке или было слито с трансформатора, необходимо измерить при нескольких температурах, анализируя характер изменения $\text{tg}\delta$ масла и изоляции в зависимости от температуры. Для проверки правильности проведения измерений необходимо построить зависимость $\ln \text{tg}\delta = fT$. Полученные результаты должны лежать на одной прямой. Значения отрицательного $\text{tg}\delta$ свидетельствуют о загрязнении масла.

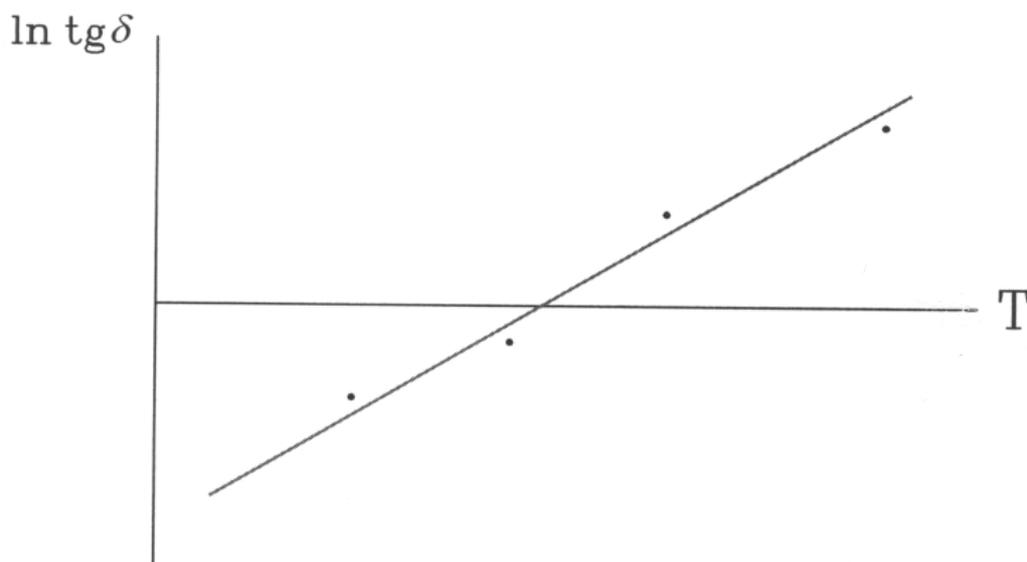


Рисунок 6. Зависимость $\ln \operatorname{tg} \delta$ от T

T – температура, при которой производится измерение $\operatorname{tg} \delta$.

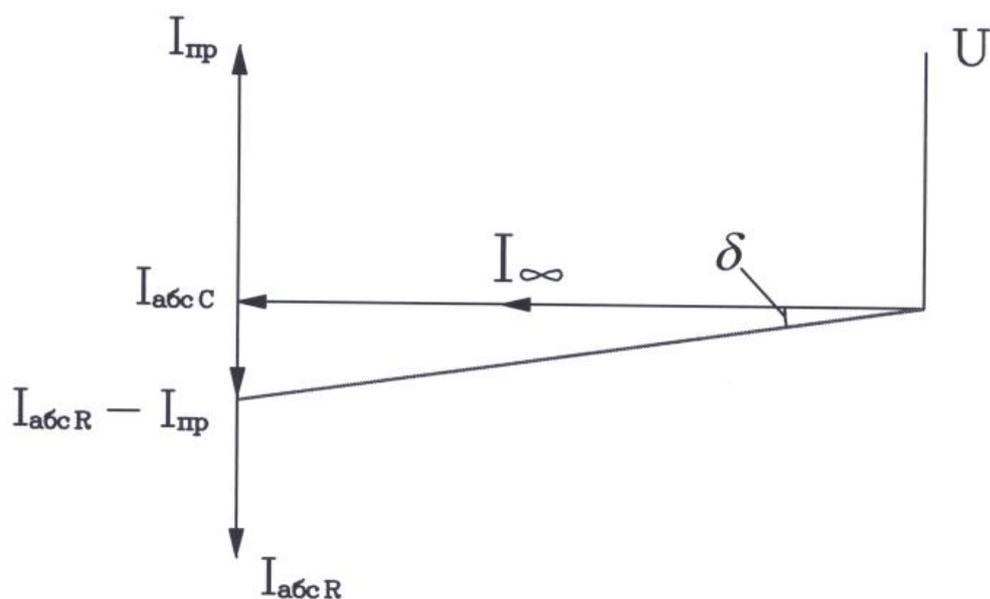


Рисунок 7. Векторная диаграмма токов при загрязненном масле и отрицательном $\operatorname{tg} \delta$

При отрицательных температурах, когда влага диэлектрика переходит в твердое состояние, состояние изоляции по $\operatorname{tg} \delta$ трудно распознаваемо.

В диапазоне положительных температур ($20 - 80^\circ\text{C}$) $\operatorname{tg} \delta$ растет по экспоненциальному закону (формула 6).

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 e^{a(t-t_0)}, \quad (6)$$

где $\operatorname{tg} \delta_0$ – потери при $t = t_0$ (обычно 20°C),

$\text{tg}\delta$ – потери при $t = t$ проведения измерений,
 a – коэффициент, зависящий от типа диэлектрика, конструкции и состояния изоляции.

Ввиду неопределенности коэффициента a в практических целях для большинства видов изоляции температурный пересчет результатов измерения $\text{tg}\delta$ производить нецелесообразно. Поэтому измерение $\text{tg}\delta$ необходимо производить в диапазоне температур 10-30°C.

Для объектов, содержащих большой объем масла, при более высоких температурах разница $\text{tg}\delta$ увлажненной и сухой изоляции уменьшается. В этих случаях $\text{tg}\delta$, полученный при измерении, должен сравниваться с предыдущими измерениями при допустимой разности температур 2-3°C.

Сопротивление изоляции определяется по току, проходящему через нее, при приложении напряжения постоянного тока. Измеренная величина сопротивления изоляции ($R_{\text{из}}$) очень зависит от времени, через которое произведен отсчет. Для получения сопоставимых результатов необходимо производить отсчет через определенный промежуток времени после приложения напряжения, через 1 мин. Но у разных объектов с нормальной изоляцией R_{60} может значительно отличаться. Более объективной характеристикой является $K_{\text{абс}}$ – коэффициент абсорбции (формула 7).

$$K_{\text{абс}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (7)$$

где R_{60} и R_{15} – сопротивления изоляции через 60 и 15 секунд.

Чем больше изоляция содержит посторонних включений, чем больше она увлажнена, тем меньше будет $K_{\text{абс}}$. $K_{\text{абс}}$ обычно измеряют в интервале температур 10 - 40°C.

$K_{\text{абс}}$ не нормируется и чаще всего принимается R_{60} . При увеличении температуры $K_{\text{абс}}$ уменьшается, также уменьшается $R_{\text{из}}$ при ее увлажнении. Величина сопротивления изоляции зависит от размеров и состояния поверхности изоляции.

Выявленные дефекты: сильные увлажнения, сопровождающиеся ростом $I_{\text{пр}}$, местные дефекты, образующие перемычки между электродами, загрязнения. Местные дефекты, не образующие перемычек между электродами, не дефектуются.

2 ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИИ

Установка для измерения характеристик изоляции состоит из измерительного устройства, источника испытательного напряжения и проводов, соединяющих их с объектом (рисунок 8).

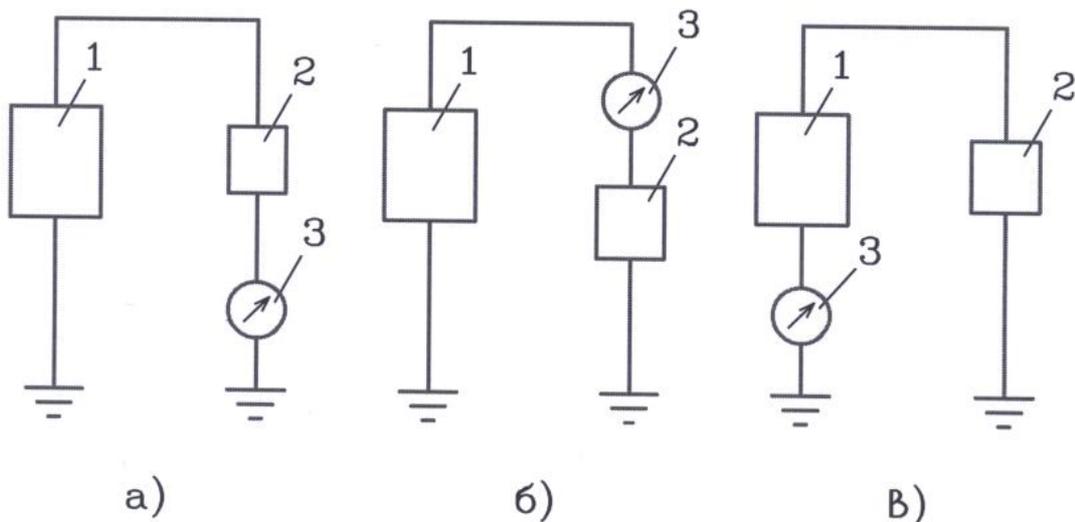


Рисунок 8. Схемы включения средства измерений:

1- источник испытательного напряжения, 2 – объект, 3 – средство измерений.

По месту расположения средств измерения (СИ) в цепи измерительной установки различают прямую (нормальную) (а), перевернутую (б) и обратную (в) схемы включения.

В прямой схеме (рисунок 8 а) СИ расположено между низкопотенциальным выводом изоляции объекта и заземлением. СИ в этой схеме находится под небольшим потенциалом относительно земли. Прямая схема обладает наибольшей помехозащищенностью и применяется тогда, когда оба электрода изолированы от земли, а также когда в оборудовании имеются специальные выводы для измерений.

В перевернутой схеме (рисунок 8 б) СИ включено в цепь испытательного напряжения между источником и объектом. Эта схема применяется тогда, когда один из выводов не может быть отключен от земли. Недостатком перевернутой схемы является то, что СИ находится под высоким напряжением относительно земли.

Обратная схема (рисунок 8 в) отличается тем, что СИ включается в цепь заземления источника. Эта схема позволяет производить измерения на объектах с одним заземленным выводом.

Напряжение измерительной установки является источником паразитных токов в схеме измерения.

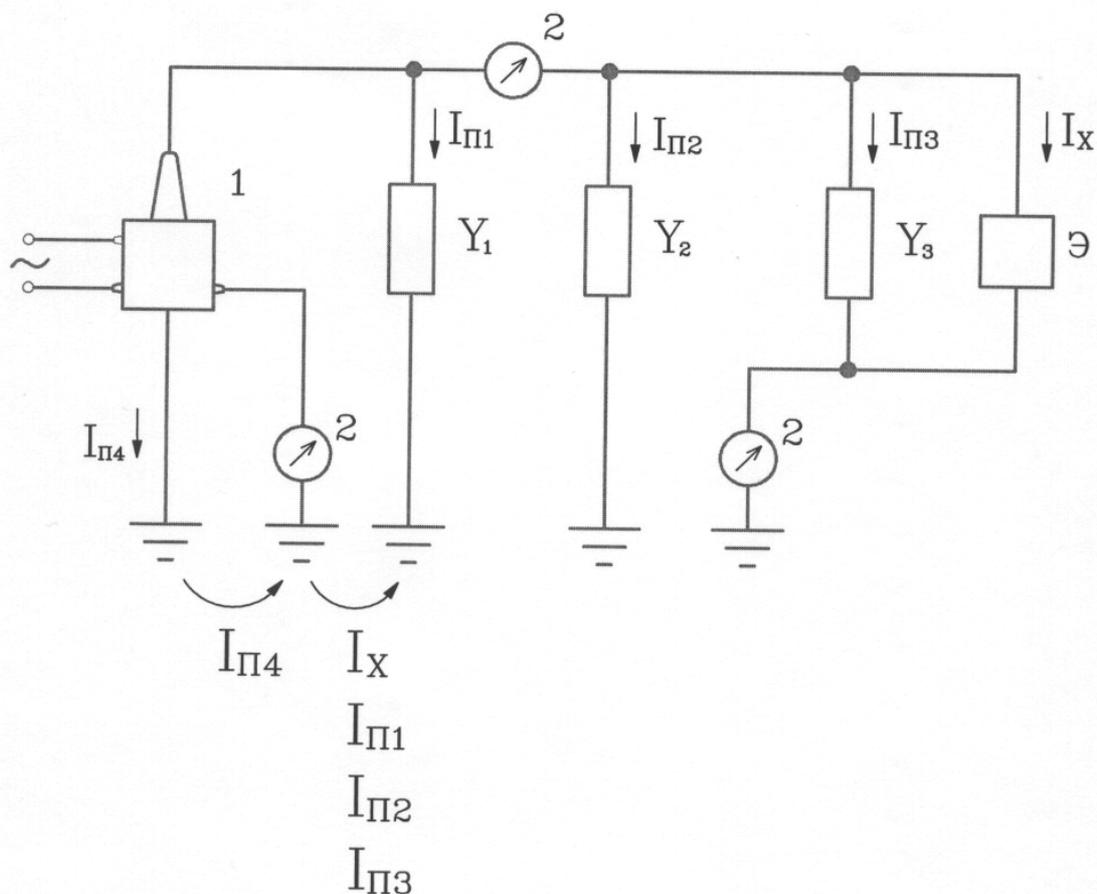


Рисунок 9. Пути протекания паразитных токов в схеме измерений:
 1 – источник напряжения, 2 – средство измерений, Э – объект.

В прямой схеме включения СИ через его измерительный элемент протекает ток $I_{п3}$, обусловленный проводимостью между проводом, подключенным к источнику напряжения и проводом от низкопотенциального вывода объекта к СИ. Остальные паразитные токи замыкаются помимо СИ. Исключение тока $I_{п3}$ производится заземлением экрана, охватывающим измерительный элемент СИ, низкопотенциальный вывод объекта и соединяющий их провод.

В перевернутой схеме включения через нее СИ протекают токи $I_{п2}$ и $I_{п3}$. Остальные паразитные токи протекают помимо СИ. Ток $I_{п2}$ проходит через СИ лишь той частью, которая обусловлена проводимостью на землю измерительного элемента и участка провода между ним и объектом. Для исключения тока $I_{п2}$ указанные элементы охватываются экраном, присоединенным к соответствующему выводу источника напряжения, при этом исключается и ток $I_{п3}$.

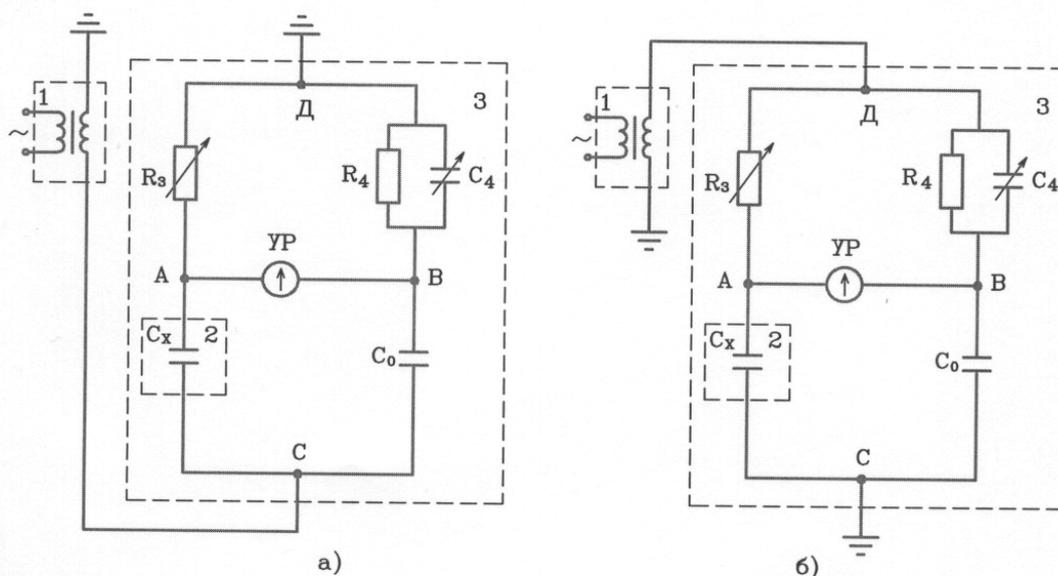


Рисунок 10. Принципиальные мостовые измерительные схемы: а – нормальная; б - перевернутая; 1- источник напряжения; 2 – испытуемый объект; 3 – измерительный мост; Сх – емкость испытуемого объекта; С0 – емкость образцового конденсатора; УР - указатель равновесия моста; R3, R4, C4 – элементы моста.

В обратной схеме включения СИ через его измерительный элемент протекают все указанные токи. Эта схема требует экранирования: наружный экран, как в перевернутой схеме, так и провод, идущий от источника измерительного напряжения, и сам источник.

Для снижения погрешности измерения $\operatorname{tg} \delta$ в условиях влияний электрического поля рекомендуется произвести измерение $\operatorname{tg} \delta$ при фазах испытательного напряжения, отличающихся на 180° . Произвести расчет $\operatorname{tg} \delta$ и C_x по формулам:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1 R''_3 + \operatorname{tg} \delta_2 R'_3}{R'_3 + R''_3}, \quad (8)$$

$$C_x = C_0 R_4 \frac{R'_3 + R''_3}{2 R'_3 R''_3} \quad (9)$$

В формулах (8) и (9) приведены результаты двух измерений.

Значения $\operatorname{tg} \delta_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2$ подставляются со своими знаками. Если одно из измерений $\operatorname{tg} \delta$ отрицательное, то оно должно быть пересчитано по формуле.

$$-\operatorname{tg} \delta \% = \left[-\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} \% \right] \frac{R_3}{R_4}, \quad (10)$$

где $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}}$ – измеренное значение $\operatorname{tg} \delta$.

В области положительных значений $\operatorname{tg} \delta_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2$ формула (8) определения действительного $\operatorname{tg} \delta$ достаточно точна. Относительная погрешность расчета по этой формуле может достигь 20 %. Если же одно из измерений дает

отрицательное значение $\text{tg}\delta$, то расчет по выше указанной формуле дает погрешность до 200 %.

Если отношение отрицательного произведения к положительному в числителе формулы (8) больше 0,15, к измерительной установке следует подключить другие фазы питающей сети и повторить измерения. В случае получения неудовлетворительных результатов, измерения производятся методом совмещения фаз. Векторная диаграмма токов при использовании этого метода приведена на рисунке 11.

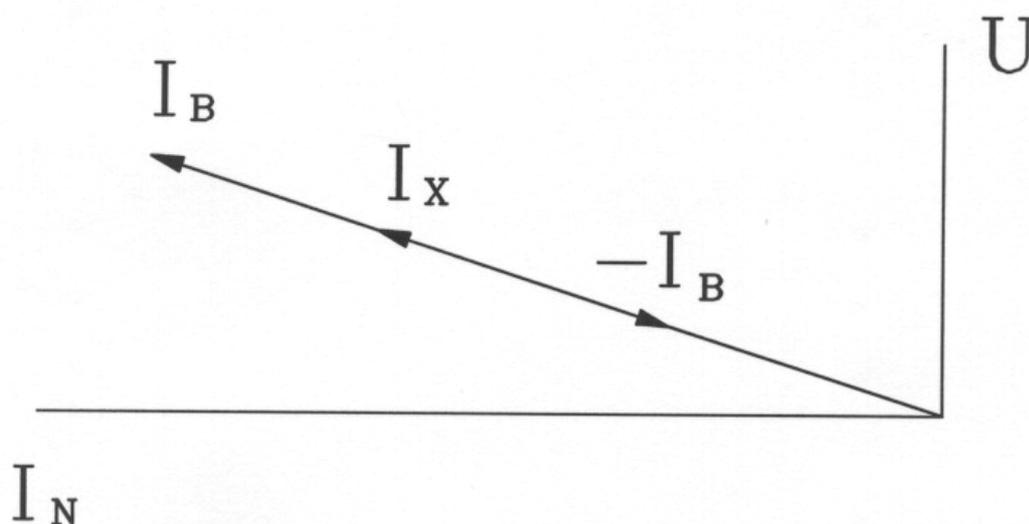


Рисунок 11. Векторная диаграмма токов при применении метода совмещения фаз:

I_B – ток влияния,
 $-I_B$ – ток фазорегулятора.

$\text{tg}\delta$ в условиях влияния измеряется в следующем порядке:

- а) собирается схема питания измерительной установки от фазорегулятора;
- б) выставляется ожидаемый $\text{tg}\delta$ оборудования и производится два измерения $\text{tg}\delta$ ($\text{tg}\delta'$ и $\text{tg}\delta''$) с изменением фазы испытательного напряжения на 180° ;
- в) методом постепенных приближений достичь разность показаний $\text{tg}\delta$ 0,2 %.

В этом случае можно результирующий $\text{tg}\delta$ принять равным

$$\text{tg}\delta = \frac{\text{tg}\delta' + \text{tg}\delta''}{2} \quad (11)$$

Если разность измеренных $\text{tg}\delta$ превышает 0,2 %, результирующий $\text{tg}\delta$ рассчитывается по формуле (8), а емкость - по формуле (9).

В мостовых схемах измерения наиболее подверженным влияниям является измерительный элемент.

Изменением фазы питания установки такие влияния определить нельзя. Для обнаружения таких влияний необходимо менять полярность включения измерительного органа. При этом, если окажется, что влияния, рассчитанные по формуле (12), значительны, то необходимо, изменяя взаимное положение измерительной части и трансформатора, регулятора, добиться снижения этих влияний.

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta' - \operatorname{tg} \delta''}{2} \geq 0,01 \quad (12)$$

Наиболее широко применяемый мост для измерения $\operatorname{tg} \delta$ - это P5026. В настоящее время появилось достаточно много модификаций мостов. Рекомендуем использование моста CA7100, не требующего применения фазорегулятора при измерении $\operatorname{tg} \delta$ в условиях влияний.

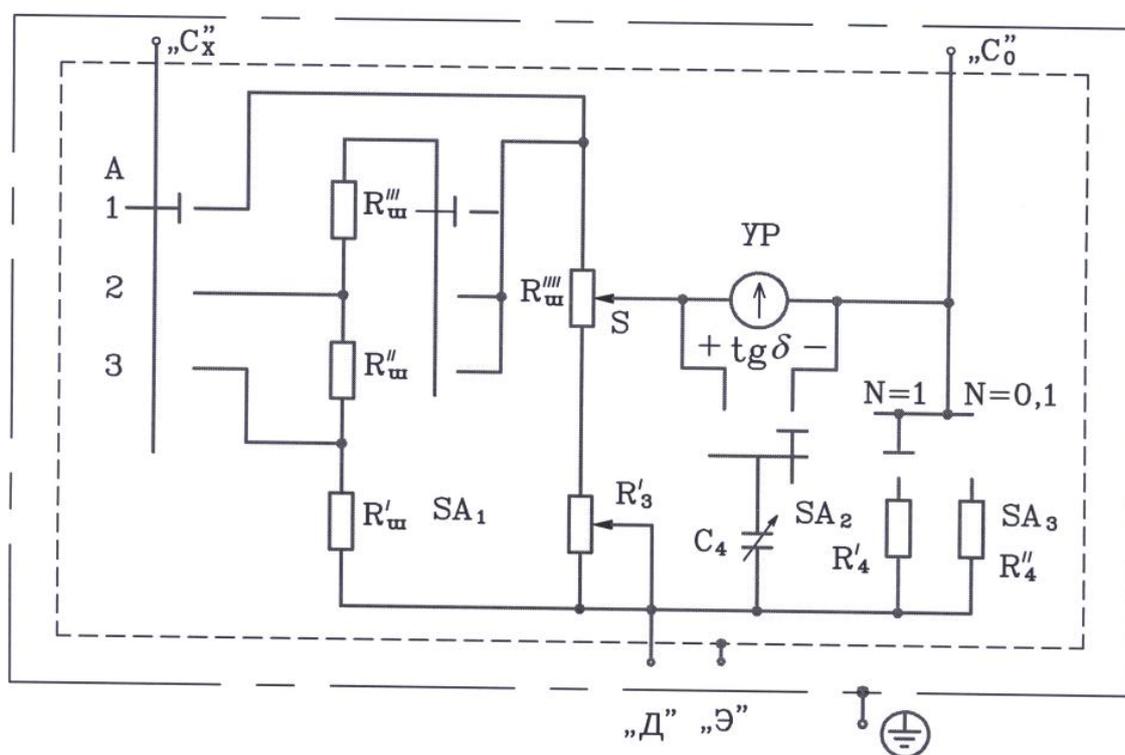


Рисунок 12. Схема моста P5026 в устройствах для эксплуатационных измерений

Основные характеристики моста P5026
(диапазоны измерений при высоком напряжении)

Таблица 1

Диапазоны измерения емкости		Диапазоны измерения $\text{tg } \delta$		Диапазоны рабочих напряжений, кВ	Наибольший ток объ-екта, А	Формулы для расчета	
Обо-зна-че-ние	C_x пФ	Обо-значе-ние	$\text{tg } \delta$			C_x пФ	$\text{tg } \delta$
A1	100-10 ⁴	N = 1 N = 0,1	5·10 ⁻³ - 1,0	3-10	3-10 ⁻²	3183 $\frac{C_0}{R_3}$	C ₄ 0,1 C ₄
A2	10 ⁴ -10 ⁵	N = 1	5·10 ⁻³ - 0,1	3-10	3-10 ⁻¹	3183 $\frac{C_0}{R_3}$	C ₄
A3	10 ⁵ -10 ⁶	N = 1	5·10 ⁻³ - 1,0 5·10 ⁻³ - 1,0	3-5	3	200C ₀ $\frac{150+R_3'}{R_3}$ 2000 C ₀ $\frac{150+R_3'}{R_3}$	C ₄

На пределе

$$A1: \text{tg } \delta(-) = -\text{tg } \delta \frac{R_3}{R_4} \quad (13)$$

На пределах

$$A2 \text{ и } A3: \text{tg } \delta(-) = -\text{tg } \delta \cdot \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{150}{50 + R_3'} \quad (14)$$

Пределы допустимого значения основной погрешности:

мост P5026 $\Delta C_x/C_x = \pm 2,5\%$ и $\Delta \text{tg } \delta = \pm(0,05 \text{tg } \delta + 3,10^{-3})$;

мост P5026M $\Delta C_x/C_x = \pm 2\%$ и $\Delta \text{tg } \delta = \pm(0,05 \text{tg } \delta + 2,10^{-3})$.

Обозначения: C_0 – емкость образцового конденсатора P5023, пФ;

C_4 – отсчет емкости магазина плеча Z₄ моста, мкФ;

R_3 – отсчет сопротивления магазина плеча Z₃ моста, Ом;

R_3' – отсчет сопротивления магазина плеча Z₃ моста без показаний потенциометра, Ом.

При измерениях в условиях интенсивных влияний, когда $\text{tg } \delta$ отрицательный, мост P5026 следует использовать в диапазоне A1.

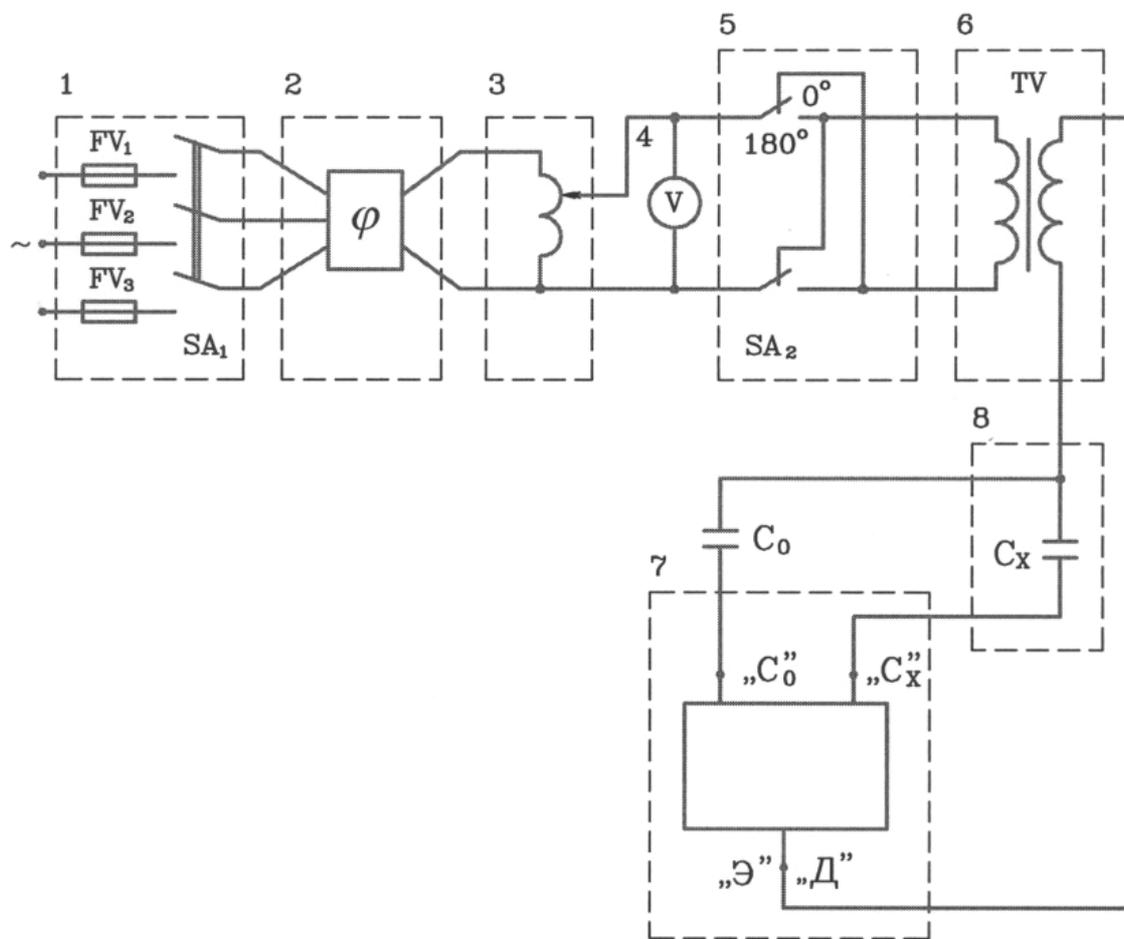


Рисунок 13. Схема измерительной установки:

1 – предохранители, выключатель; 2 – фазорегулятор; 3 – регулятор напряжения; 4 – вольтметр; 5 – коммутатор фазы напряжения; 6 – испытательный трансформатор; 7 – измерительное устройство (мост); 8 – объект контроля.

Мощность трансформатора для измерения $\text{tg}\delta$ определяется формулой:

$$P = \omega C_x U_{\text{ном}}^2 \quad (15)$$

Минимально необходимая мощность трансформатора для измерения $\text{tg}\delta$:

- до 1000 пФ (вводы, трансформаторы тока) – 30 ВА;
- до 10000 пФ (трансформаторы малой мощности) – 300 ВА;
- до 100000 пФ (трансформаторы большой мощности) – 3 кВА.

Рекомендуется для питания схемы измерения применять НОМ-10, у него мощность 3,5 кВА или НОЛ-10 с литой изоляцией.

Мощность фазорегулятора и регулятора напряжения должны быть не ниже расчетной мощности трансформатора.

3 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

При измерении сопротивления изоляции ($R_{из}$) объект с сопротивлением R_x и емкостью C_x присоединяются к выводам Γ_x и “-“ мегаомметра (рисунок 14). Вывод Э предназначен для присоединения цепей экранирования. Экранирование применяется в случаях, когда необходимо исключить влияние поверхности изоляционной конструкции или ограничить область контролируемой изоляции. Для этого на наружной части изоляционной конструкции около электрода, соединенного с выводом Γ_x мегаомметра, устанавливается экранирующее кольцо из мягкого неизолированного провода, соединяемое с выводом Э.

Сопротивление, включенное между выводами Э и Γ_x в схемах с экранированием, шунтирует измерительный элемент мегаомметра, чем вносится погрешность в измерения, наименьшее допустимое значение этого сопротивления должно быть не менее 1% наибольшего значения шкалы на данном пределе измерений. Желательно, чтобы сопротивление цепей экранирования в 50 – 100 раз было больше, чем сопротивление измерительного элемента мегаомметра (резистор R_0).

В качестве измерительного элемента в большинстве мегаомметров используется вольтметр, измеряющий падение напряжения U_0 на образцовом резисторе от измеряемого тока. Шкала прибора градуируется в единицах сопротивления. Такая схема применяется при выходном сопротивлении в несколько сотен вольт.

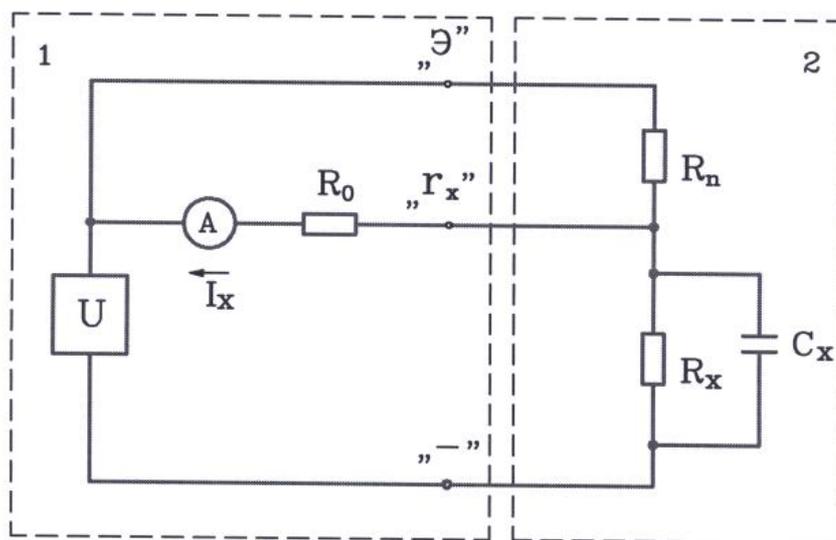


Рисунок 14. Схема измерений мегаомметром:

1 – средство измерений; 2 – объект; U – источник напряжения;
 A – измеритель тока; R_n , R_0 – внутреннее сопротивление мегаомметра.

Схема мегаомметра (рисунок 14) применяется при измерениях величины изоляции при напряжении в несколько кВ.

В приборе на рисунке 14 измерительный орган измеряет ток через изоляцию объекта. Шкала градуируется в значениях сопротивления.

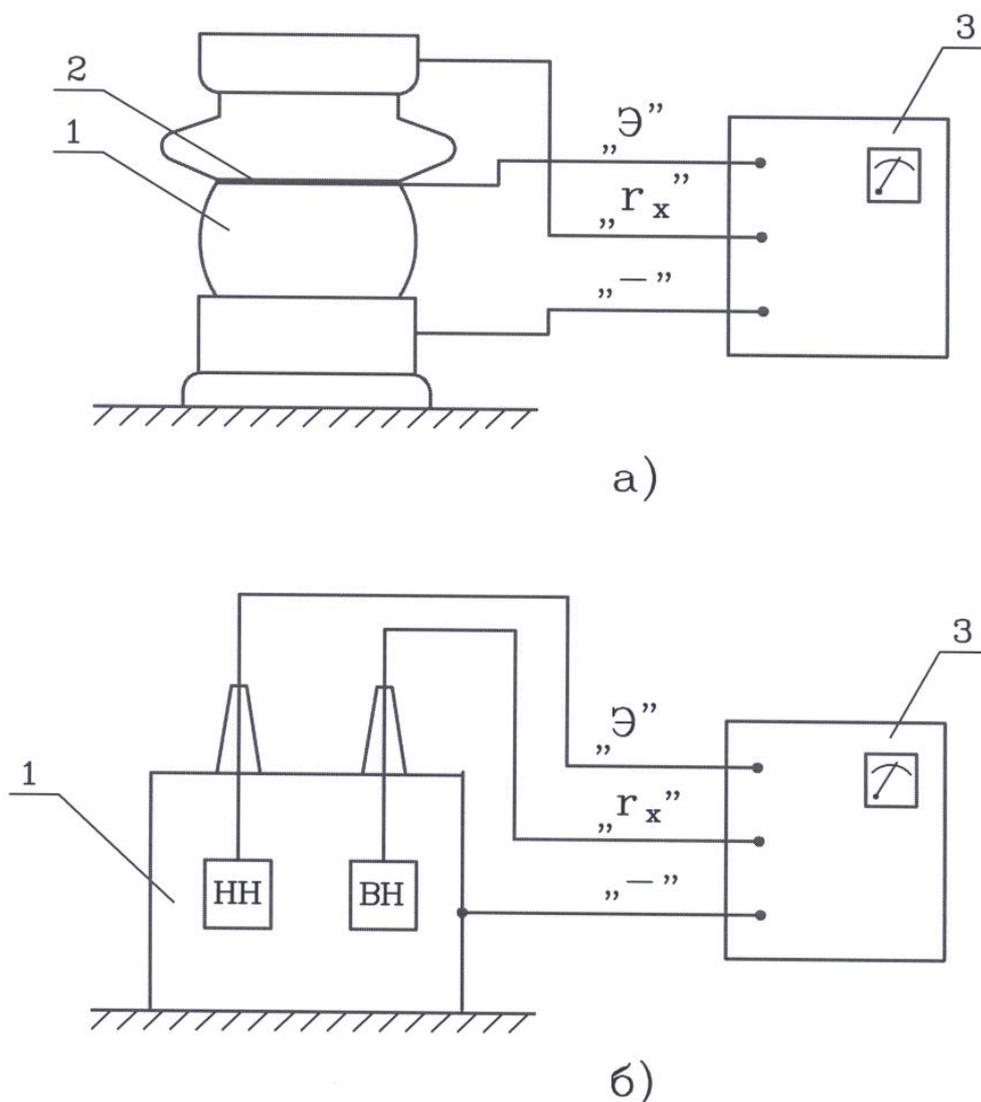


Рисунок 15. Экранирование при измерении сопротивления изоляции:
 а – исключение влияния поверхности изолятора;
 б – исключение влияния изоляции обмотки НН трансформатора;
 1 – объект; 2 – экранное кольцо (бандаж); 3 – мегаомметр.

Для эксплуатационного контроля допустимой является относительная погрешность измерения сопротивления изоляции, не превышающая 15 %. При определении коэффициента абсорбции следует использовать мегаомметры с погрешностью не более 10 %. Как правило, результаты измерений с мегаомметрами, имеющими разные входные сопротивления, не совпадают, поэтому желательно производить измерения одного и того же объекта однотипными мегаомметрами. Еще одна погрешность при измерении сопротивления изоляции может возникнуть из-за остаточного заряда емкости объекта. Поэтому перед повторным измерением необходимо не менее чем на 5 минут соединить выводы объекта, создав путь для стекания абсорбированного тока.

4 ИСПЫТАНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Установка для испытаний изоляции напряжением переменного тока (рисунок 16) состоит из регулировочного устройства испытательного трансформатора, контрольно-измерительных приборов и средств защиты.

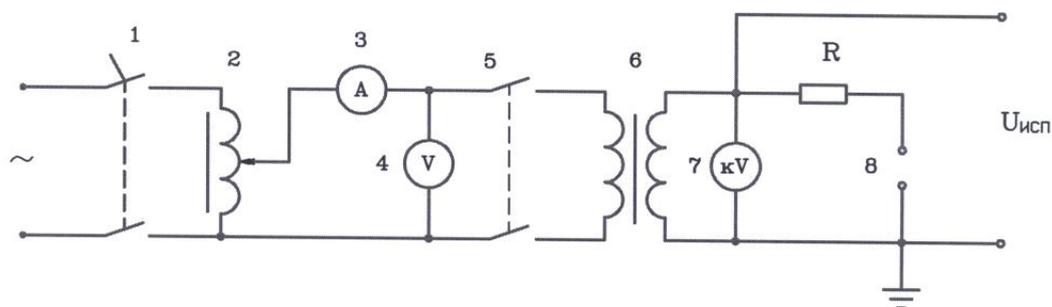


Рисунок 16. Схема установки для испытания изоляции напряжением промышленной частоты

Схема установки должна включать автоматический выключатель 1, регулировочное устройство 2, измерительные приборы 3, 4 и 7 для контроля режима установки, выключатель (рубильник) 5 для создания видимого разрыва в цепи питания, испытательный трансформатор 6, защитный разрядник 8 и ограничительный резистор R.

Уставка срабатывания автоматического выключателя не должна превышать ток потребления из сети при полном испытательном напряжении на объекте не более чем в 2 раза.

Номинальная мощность испытательного трансформатора определяется по формуле (16):

$$P_{ном} = I_{исп} \cdot U_{ном} = \omega C U_{исп} U_{ном} \cdot 10^9, \quad (16)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$I_{исп}$ – испытательный ток, А;

$U_{исп}$ – испытательное напряжение, кВ;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ;

ω – угловая частота, рад/с;

C – емкость, пФ.

При использовании трансформаторов от маслопробойных установок, у которых заземлены средние точки, для испытания объектов, с одним заземленным элементом, может быть использована только половина обмотки.

Мощность регулировочного устройства должна соответствовать мощности испытательного трансформатора.

Регулировочное устройство должно обеспечивать регулирование испытательного напряжения в пределах от 25 – 30 % до его полного значения. Регулирование должно быть плавным, разрывы цепи при регулировании не допускаются.

Испытательное напряжение должно быть практически синусоидальным, это обеспечивается применением автотрансформаторов с малым сопро-

тивлением. Недопустимые искажения возможны при применении реостатов, питания устройства от фазного напряжения, особенно при токе нагрузки, сопоставимым с током намагничивания объекта испытаний.

Нормируется и подлежит измерению действующее значение испытательного напряжения. В случаях, когда не исключено искажение формы кривой испытательного напряжения, рекомендуется измерение амплитудного значения.

Суммарное значение относительной погрешности измерения не должно превышать 5 %. Погрешность измерительных устройств – не более 3 %. Методы измерения испытательного напряжения приведены на рисунке 17.

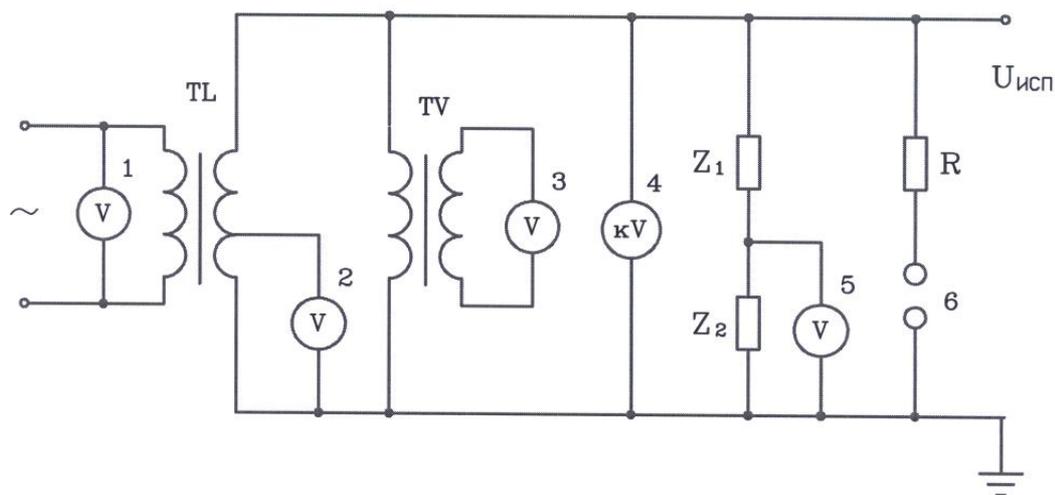


Рисунок 17. Схема измерения испытательного напряжения переменного тока:

- TL – испытательный трансформатор,
- TV – трансформатор напряжения,
- Z_1, Z_2 – элементы делителя напряжения,
- R – защитный резистор разрядника,
- 6 – разрядник.

При измерении прибором 1, включенном на стороне низкого напряжения, необходимо расчетное исключение погрешности от падения напряжения на сопротивлении рассеяния испытательного трансформатора. Поэтому эта схема не рекомендована для измерения напряжения и запрещена для испытания генераторов и двигателей.

Некоторые испытательные трансформаторы имеют специальные отпайки от обмотки высокого напряжения для его измерения (прибор 2).

Ток потребления устройства измерения не должен превышать 5% от $I_{ном}$ обмотки ВН. Необходимую точность обеспечивает также применение трансформатора напряжения 3.

Для измерения испытательного напряжения на стороне ВН можно применить киловольтметр 4 или вольтметры с делителем напряжения, (прибор 5).

Градуировка вольтметра по пробивному напряжению шарового разрядника запрещается, так как не обеспечивает необходимую точность измерения.

5 ИСПЫТАНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Установка для испытания изоляции выпрямленным напряжением состоит из регулировочного и выпрямляющего устройств, а также контрольно-измерительных приборов и средств защиты. Схема измерения приведена на рисунке 18.

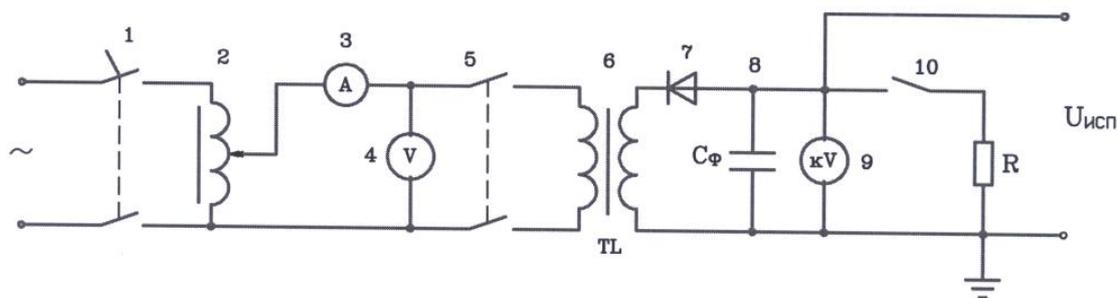


Рисунок 18. Схема установки для испытания изоляции напряжением постоянного тока

Выпрямительное устройство содержит испытательный трансформатор и выпрямитель с фильтром.

Схема установки включает автоматический выключатель 1, регулировочное устройство 2, амперметр 3, вольтметр 4, выключатель (рубильник) для создания видимого разрыва в цепи питания 5, испытательный трансформатор 6, выпрямитель 7 с фильтром 8, а также устройство для измерения испытательного напряжения 9 и разрядное устройство 10, состоящее из сопротивления R и коммутационного аппарата.

Ток проводимости, протекающий через изоляцию объекта при испытаниях, обычно не превышает 10 мА. Это и определяет мощность трансформатора 6. Ток регулировочного устройства 2 согласуется с током ХХ испытательного трансформатора.

Вентили (диоды) выпрямителя 7 должны выбираться исходя от ожидаемого тока проводимости и обратного напряжения. По условиям выдерживаемого обратного напряжения требуется последовательное соединение диодов. Значение обратного напряжения зависит от схемы выпрямителя. В рекомендуемых схемах оно равно удвоенному испытательному напряжению.

Напряжение на выходе выпрямительного устройства имеет пульсации. Для выделения постоянной составляющей применяется фильтр – согласующий (накопительный) конденсатор. Конденсатор фильтра заряжается через выпрямитель током испытательного трансформатора и разряжается током проводимости объекта.

Емкость фильтра с учетом емкости объекта не должна быть менее рассчитанного по формуле 17:

$$C_{\phi} = \frac{2}{K_{и} R_{x}} \text{ мкФ} , \quad (17)$$

где $K_{и}$ – нормируемый коэффициент пульсации 1 – 5 %;

R_{x} – сопротивление изоляции объекта, МОм.

Суммарное значение относительной погрешности измерения испытательного напряжения, а также тока проводимости не должно превышать 5%, измерительных устройств – 3 %, приборов – 1,5 %. Методы измерения испытательного напряжения постоянного тока приведены на рисунке 19.

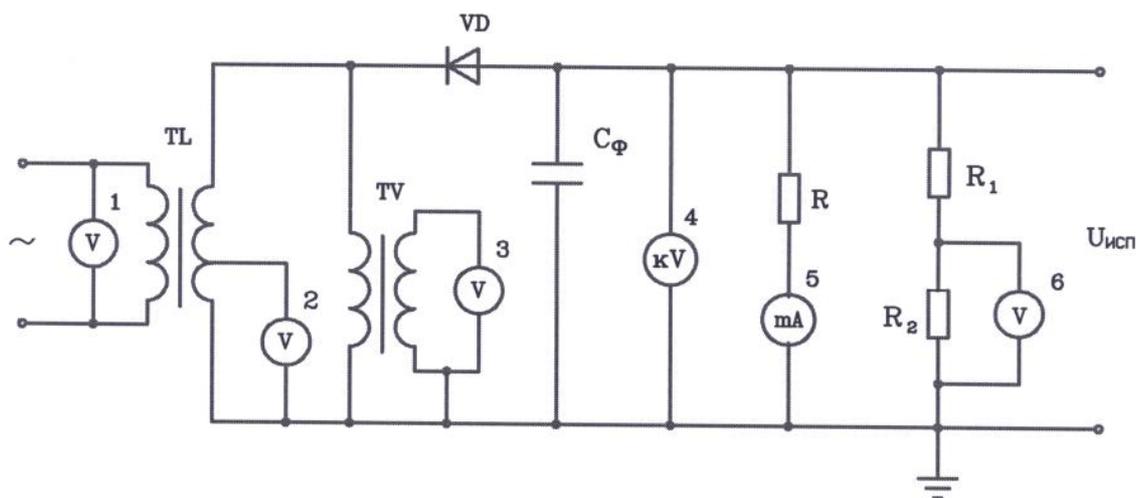


Рисунок 19. Схема измерения испытательного напряжения постоянного тока:

TL – испытательный трансформатор,

TV – трансформатор напряжения,

VD – вентиль,

C_{ϕ} – конденсатор фильтра,

R – добавочный резистор,

R_1, R_2 – элементы делителя,

1, 2, 3, 4, 5, 6, - измерительные приборы.

При измерении прибором 1 на стороне низкого напряжения или приборами 2 и 3 на стороне ВН испытательное напряжение можно принять равным:

$$U_{исп} = 1,41 K U_{д} , \quad (18)$$

где $U_{д}$ – действующее значение напряжения переменного тока;

K – коэффициент приведения к стороне ВН испытательного напряжения.

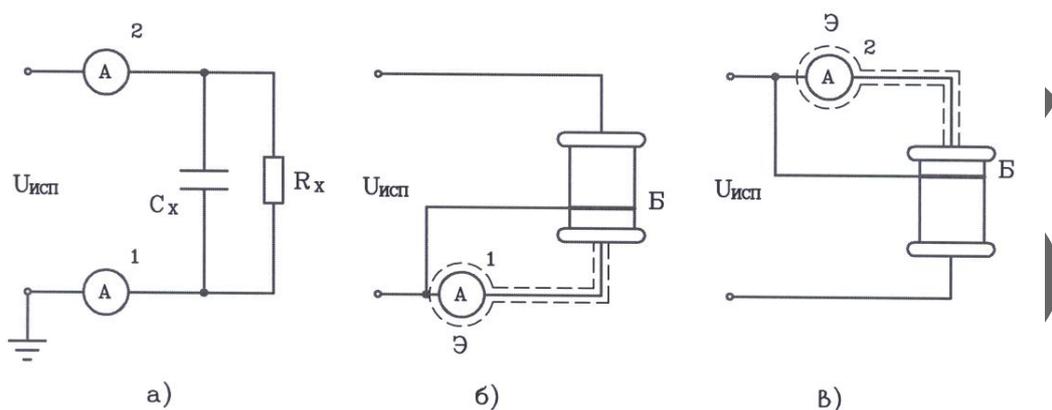


Рисунок 20. Схемы измерения тока проводимости изоляции:
 а – прямая схема включения; б, в – перевернутые схемы включения;
 Э – экран; Б – бандаж; 1, 2 – амперметры.

Предпочтительной является схема включения измерительного прибора в цепь заземления низкопотенциального вывода объекта (прибор 1), прямая схема включения. При невозможности реализации прямой схемы включения применяется перевернутая (прибор 2). Схема включения прибора в заземление испытательного трансформатора не рекомендуется из-за больших погрешностей при измерении.

Пределы измеряемых значений при контроле изоляции 1 – 1000 мкА. Микроамперметр должен иметь защиту от перегрузки и импульсов тока при зарядке емкости объекта.

Исключение влияния паразитарных токов производится экранированием. Экран должен охватывать корпус измерительного устройства и провод, соединяющий его с объектом. Ток поверхностной утечки исключается путем наложения на поверхность изоляции вблизи электродов бандажей, соединенных с экраном. Источником такой погрешности являются токи по поверхности изоляционной конструкции.

6 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Подъем напряжения следует начинать с наименьшего возможного напряжения, но не превышающего 30% испытательного напряжения, дальнейшее повышение производить со скоростью, позволяющей сделать надежный отсчет.

Во время испытаний должно производиться непрерывное наблюдение за объектом испытаний.

При испытании переменным напряжением органической изоляции после отключения и наложения заземления рекомендуется ощупать доступную поверхность, чтобы убедиться в отсутствии местных нагревов.

Объект считается выдержавшим испытания, если не произошло пробоя или перекрытия изоляции.

Допускается возникновение слабых скользящих разрядов по поверхности фарфоровой или аналогичной изоляции.

Если не были отмечены местные нагревы с измерением тока проводимости, браковочным фактором является рост тока проводимости.

7 ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ

Для оценки состояния главной изоляции трансформаторов (реакторов) производится измерение изоляции (параметров главной изоляции): сопротивления изоляции, $tg\delta$ и емкости.

Для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации производится комплексный анализ измеренных значений параметров изоляции, сопоставление измеренных абсолютных значений параметров с ранее измеренными значениями, а также анализируется динамика изменений этих параметров.

Измерение параметров изоляции допускается производить при температуре изоляции не менее 10°C . При вводе в эксплуатацию новых трансформаторов параметры изоляции рекомендуется измерять при температуре не ниже 10°C для трансформаторов напряжением 110 кВ и не ниже 20°C – для трансформаторов 220-750 кВ. Если температура изоляции ниже 10°C , то трансформатор должен быть нагрет.

За температуру изоляции принимается температура обмотки трансформатора, определяемая по сопротивлению постоянному току. На трехфазных трансформаторах температура изоляции определяется по фазе В. Достоверными считаются данные, если между окончанием прогрева и началом измерения прошло не более 3 часов.

Если трансформатор подвергался нагреву током короткого замыкания (этот метод не рекомендуется), постоянным током, маслом, пропущенным через маслоподогреватель, измерение параметров изоляции производится через 1 час после прекращения подогрева, если нагрев производился индукционным методом – не раньше чем через 30 минут.

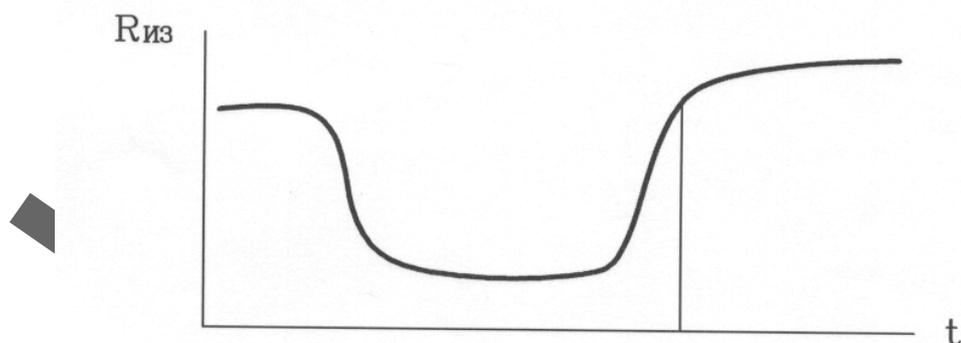


Рисунок 21. Кривая изменения сопротивления изоляции при сушке обмотки трансформатора

Если трансформатор не подвергался нагреву и находился в нерабочем состоянии, то за температуру изоляции принимается температура верхних слоев масла для маслонаполненных трансформаторов и температура окружающего воздуха для сухих.

Если трансформатор более 3 месяцев находился не под напряжением, перед вводом в эксплуатацию необходимо произвести измерение диэлектрических параметров изоляции.

Если трансформатор длительно находился в резерве или не был включен в работу, необходимо произвести контрольную подсушку.

При подсушке увлажненных трансформаторов $R_{из}$ вначале уменьшается – из изоляции выделяется влага, далее на протяжении некоторого времени $R_{из}$ постоянна, по мере удаления из изоляции влаги $R_{из}$ начинает расти. Сушка считается оконченной, если в течении 6 часов $R_{из}$ не меняется.

На монтаже допускается 50 % ухудшения изоляционных параметров по сравнению с результатами заводских испытаний.

Выводы обмотки, которой производятся измерения, соединяют между собой для шунтирования емкости обмоток.

На результаты измерения $R_{из}$ может оказать влияние состояние изоляции соединительных проводов, идущих от мегаомметра к объекту испытаний. Сопротивление изоляции этих проводов, измеренное при отключенном объекте, должно быть не менее верхнего предела шкалы мегаомметра. В случае применения экранированных проводов экран должен быть электрически соединен с клеммой «Э» мегаомметра.

Измерение $R_{из}$ трансформаторов без масла не дает общую картину увлажнения обмоток. так как $R_{из}$ очень зависит от качества масла.

Перед каждым измерением $R_{из}$ необходимо выводы обмотки заземлить не менее чем на 5 минут для стекания абсорбционного заряда.

Если температура обмотки определялась по значению сопротивления обмотки постоянному току, то ее значение рассчитывается по формуле:

$$t_1 = \frac{r_1}{r_0} (235 + t_0) - 235, \quad (19)$$

где t_1 – расчетное значение температуры;

r_1, r_0 – сопротивление постоянному току и измеренное на заводе;

t_0 – температура при измерениях на заводе.

При измерении диэлектрических характеристик внешняя поверхность вводов трансформаторов должна быть чистой и сухой. Производить измерения при сырой погоде не рекомендуется.

Изоляционные испытания производятся на отключенном и расшинованном трансформаторе.

Для возможности сопоставления измеренных значений параметров изоляции и для решения вопроса о дальнейшей эксплуатации трансформатора измеренные значения параметров пересчитываются на температуру, при которой измерялись базовые значения параметров. Пересчет производится по формулам:

- для $R_{из}$ $R_{пр} = R_{и} \cdot K_2$
- для $tg\delta$ $tg\delta_{пр} = tg\delta_{и} \cdot K_1$

Значения коэффициентов K_1 и K_2

Таблица 2

Разность температур $t_2 - t_1, ^\circ\text{C}$	K_1	K_2
1	1,03	1,04
2	1,06	1,08
3	1,09	1,13
4	1,12	1,17
5	1,15	1,22
6	1,18	1,28
7	1,21	1,34
10	1,31	1,5
15	1,51	1,84
20	1,75	2,25
25	2,0	2,75

В эксплуатации сравнения производится с результатами испытаний при последнем капитальном ремонте.

Значение $K_{рвс}$ для температур, не указанных в таблице, определяется по формуле:

$$K_{рвс} = K_1 \cdot K_2, \quad (20)$$

где $K_{рвс}$ – температурный коэффициент, не указанный в таблице, например $K_{12} = K_{10} \cdot K_2 = 1,31 \cdot 1,06 = 1,39$.

При использовании коэффициентов пересчета необходимо учитывать, что $R_{из}$ с увеличением температуры уменьшается, а $tg\delta$ – увеличивается.

На измеренный $tg\delta$ изоляции трансформатора большое значение оказывает трансформаторное масло. Действительное значение $tg\delta$ изоляции с учетом влияния масла:

$$tg\delta = tg\delta_{изм} - \hat{E}(tg\delta_{м2} - tg\delta_{м1}), \quad (21)$$

где $tg\delta_{изм}$ – измеренное значение $tg\delta$ изоляции;

K – коэффициент приведения $K \approx 0,45$;

$tg\delta_{м2}, tg\delta_{м1}$ – $tg\delta$ масла залитого на заводе и на монтаже.

Температурный пересчет для $tg\delta < 1$ не производится.

Схемы измерения сопротивления изоляции, тангенса угла диэлектрических потерь и емкости обмоток трансформаторов

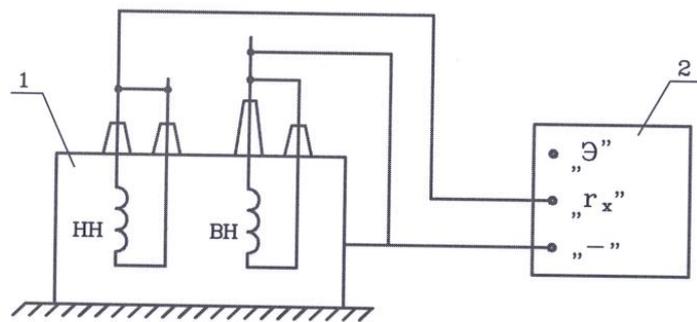
Таблица 3

Двухобмоточные трансформаторы и трехобмоточные автотрансформаторы		Трехобмоточные трансформаторы		Трансформаторы с расщепленной обмоткой НН	
Обмотка, на которой производят измерения	Заземляемые части трансформатора	Обмотка, на которой производят измерения	Заземляемые части трансформатора	Обмотка, на которой производят измерения	Заземляемые части трансформатора
НН	ВН, бак	НН	СН, ВН, бак	НН ₁	НН ₂ , бак ВН
ВН	НН, бак	СН	ВН, НН, бак	НН ₂	НН ₁ , бак ВН
(ВН+НН)	Бак	ВН ВН+СН (ВН+СН+ +НН)	НН, СН, бак Бак, НН Бак	(ВН+НН ₁₍₂₎) (ВН+НН ₁ + +НН ₂)	НН ₂₍₁₎ , бак Бак

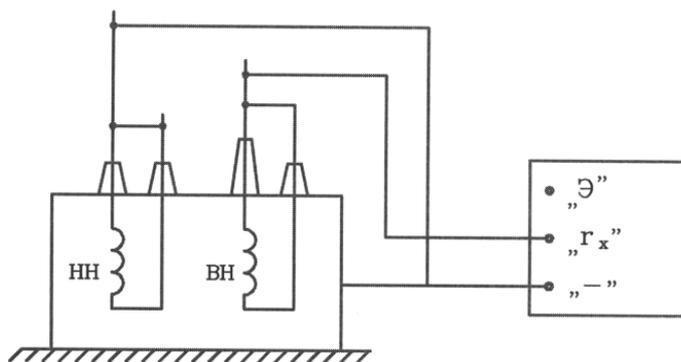
По вышеприведенным схемам производятся испытания на заводе и при вводе в эксплуатацию.

В процессе монтажа или ремонта силовых трансформаторов имеются случаи, когда измерения по вышеприведенным традиционным схемам не соответствуют существующим нормам. Причиной этого для маслобарьерной изоляции трансформаторов может служить следующее:

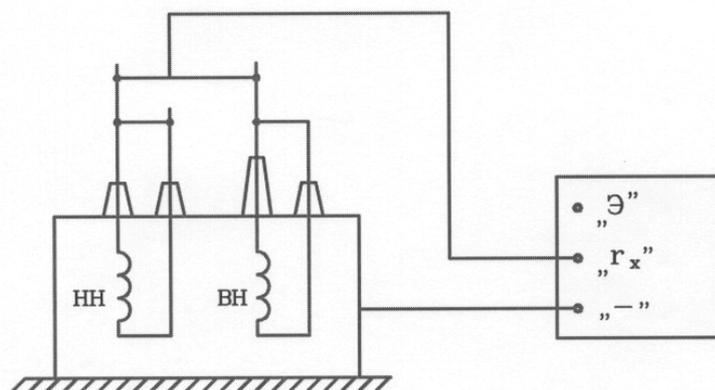
- 1) Увлажнение или загрязнение твердой изоляции. Чаще всего изоляционного цилиндра для трансформаторов РПН типа РС, РНТА, РНОА или переходной плиты для РПН типа ЗРНОА и РНТ.
- 2) Загрязнение поверхности высоковольтных вводов.
- 3) Увлажнение или загрязнение масла, приводящее к увеличению его проводимости и $\text{tg}\delta$.
- 4) Возникновение “ползучего” разряда в трансформаторах напряжением 330 кВ и выше.



а)



б)



в)

Рисунок 22. Схемы измерений сопротивления изоляции обмоток двухобмоточных трансформаторов, трехобмоточных автотрансформаторов:

а – НН-бак; б – ВН-бак; в – (ВН+НН)-бак; 1- трансформатор;
2 – мегаомметр.

Примечание: выводы обмотки СН автотрансформатора не показаны.

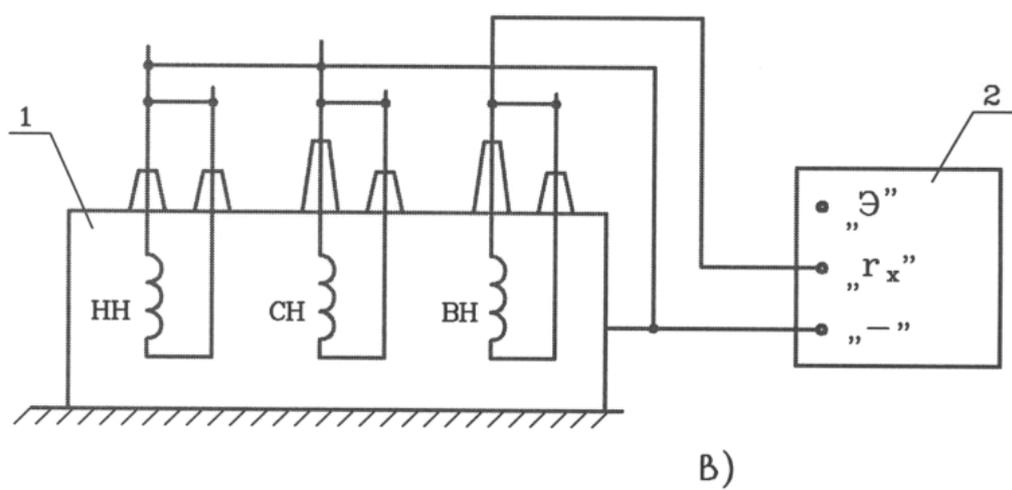
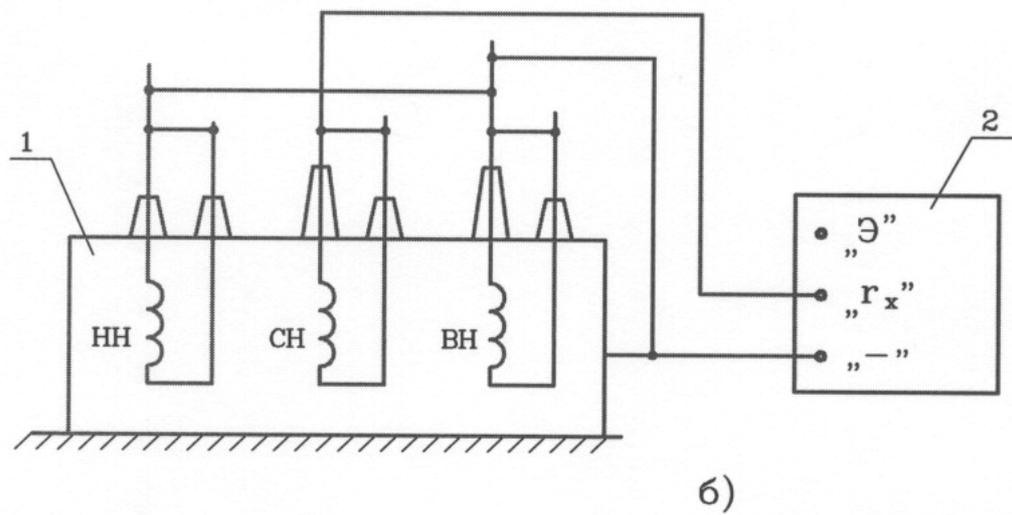
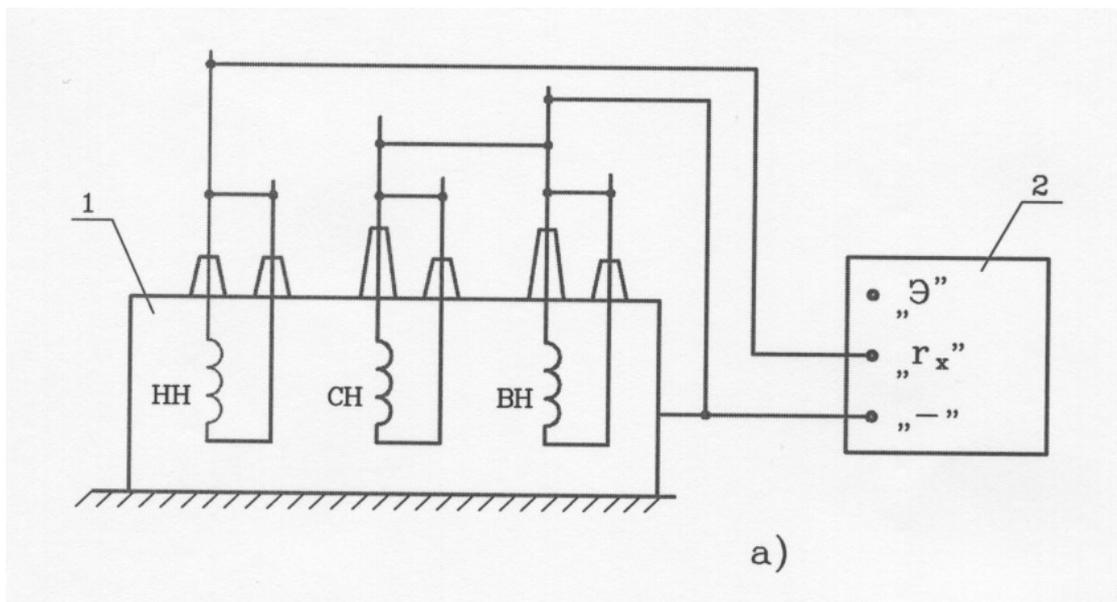


Рисунок 23. Схемы измерений сопротивления изоляции обмоток трехобмоточных трансформаторов (начало)

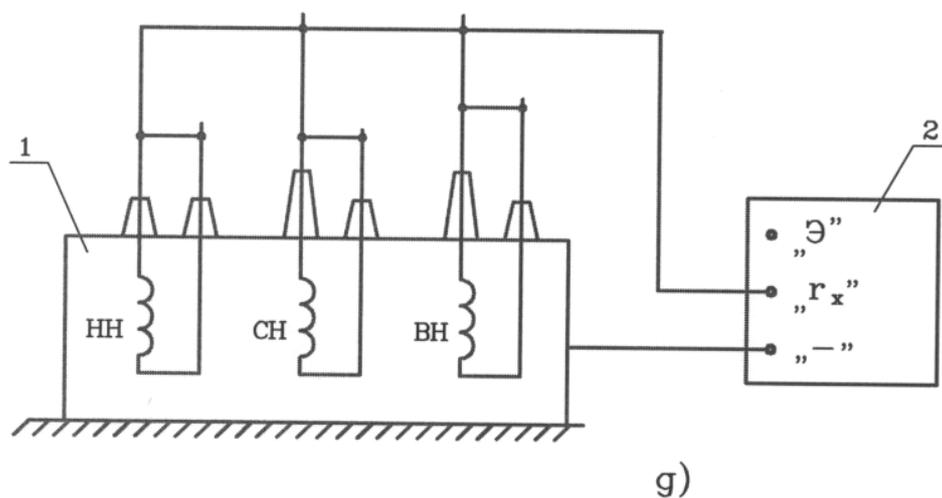
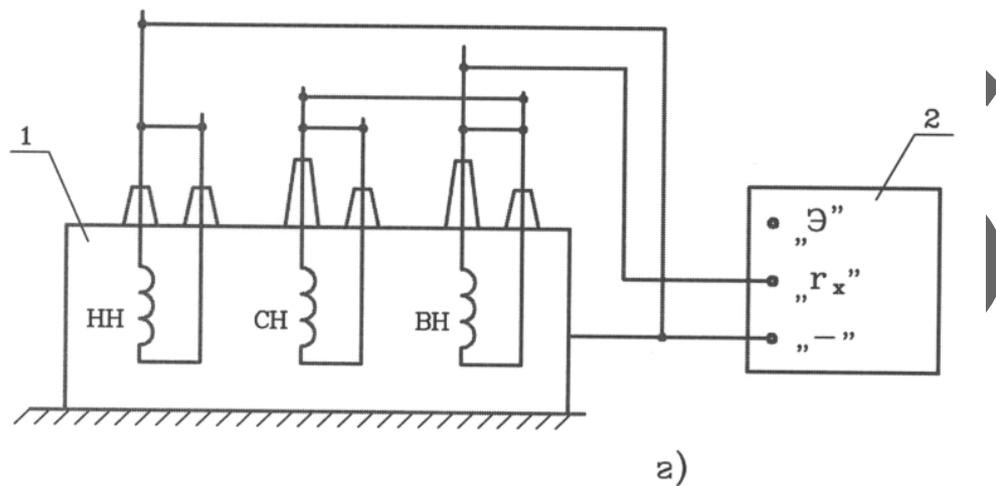


Рисунок 23. Схемы измерений сопротивления изоляции обмоток трехобмоточных трансформаторов (продолжение):

а – НН-бак; б- СН-бак; в – ВН-бак; г – (ВН+СН)-бак;

г – (ВН+СН+НН)-бак; 1- трансформатор; 2 – мегаомметр.

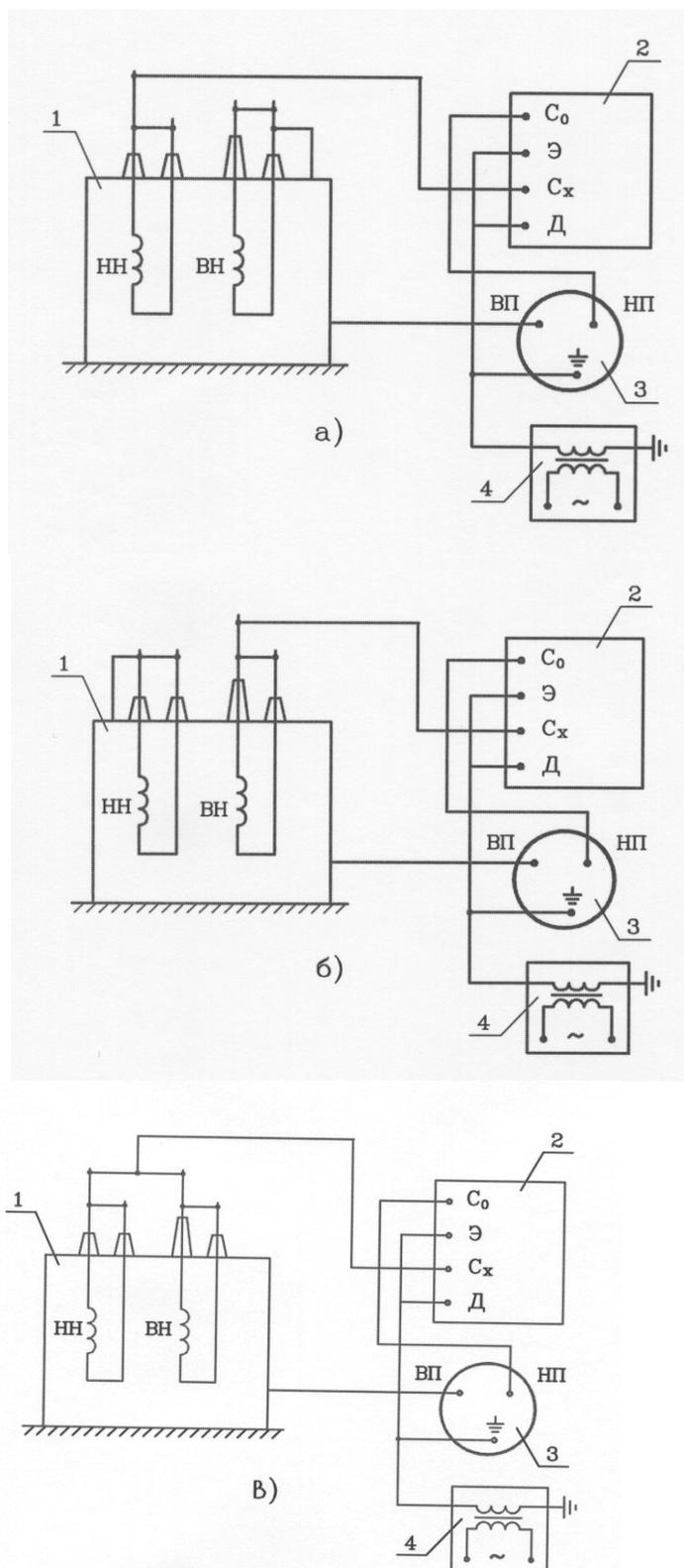
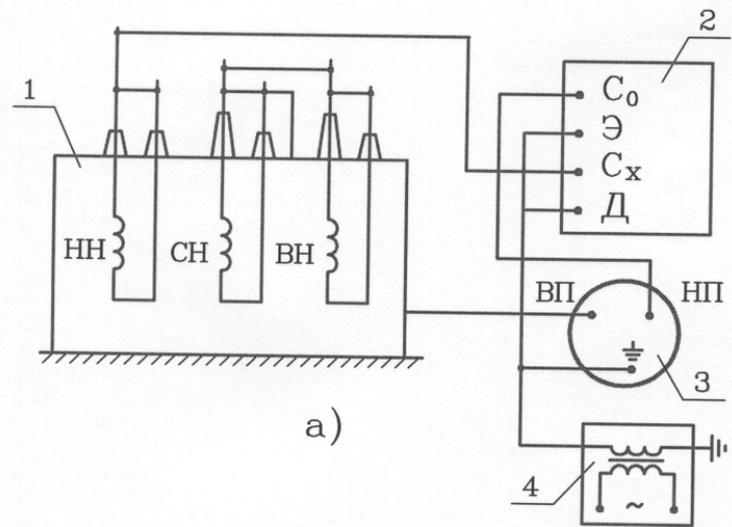


Рисунок 24. Схемы измерения $\operatorname{tg} \delta$ и емкости двухобмоточных трансформаторов и трехобмоточных автотрансформаторов.

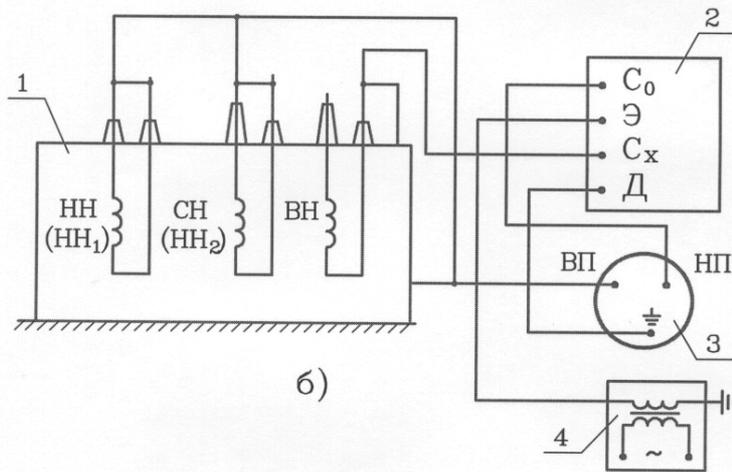
Внешние соединения моста и трансформатора:

а – НН-бак; б – ВН-бак; в – (ВН+НН)-бак; 1 – трансформатор; 2 – мост (P5026); 3 – образцовый конденсатор (P5023); 4 – источник питания.

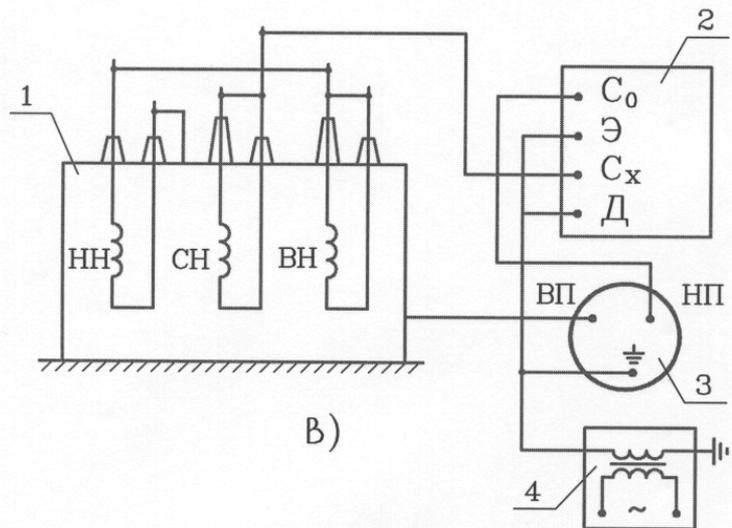
Примечание: выводы обмотки СН автотрансформатора не показаны.



а)

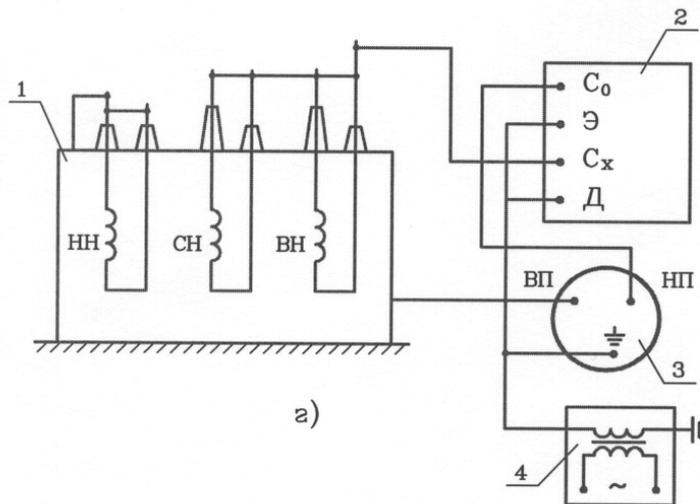


б)

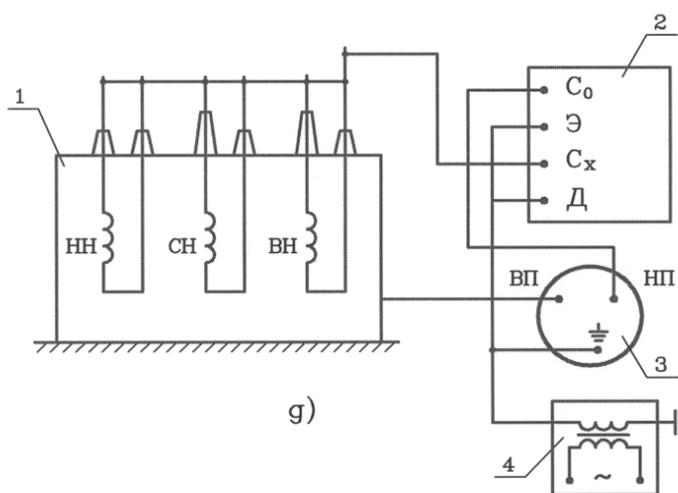


в)

Рисунок 25. Схемы измерения $\text{tg}\delta$ и емкости трехобмоточных трансформаторов (начало)



а)

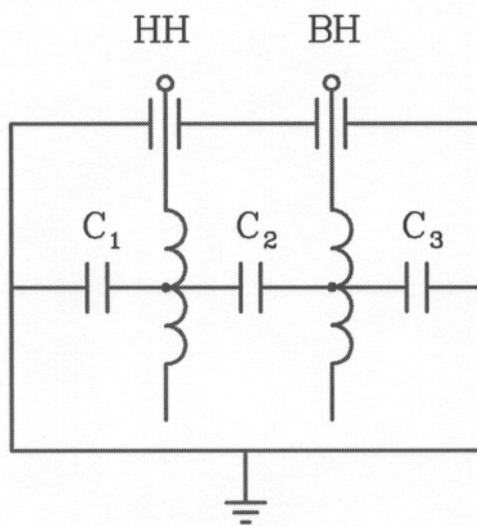


г)

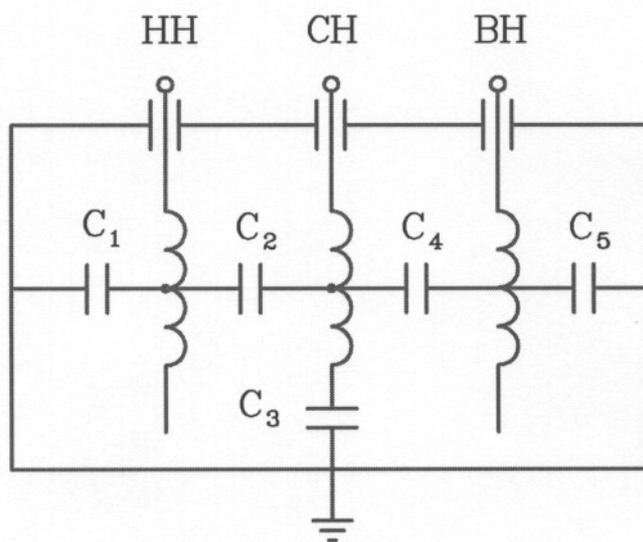
Рисунок 25. Схемы измерения $\text{tg}\delta$ и емкости трехобмоточных трансформаторов (продолжение)

Внешние соединения моста и трансформатора:

- а – НН-бак;
- б – ВН-бак;
- в – СН-бак;
- г – (ВН+СН)-бак;
- д – (ВН+СН+НН)-бак.
- 1 – трансформатор;
- 2 – мост (P5026);
- 3 – образцовый конденсатор (P5023);
- 4 – источник питания.



а)



б)

Рисунок 26. Емкостные схемы замещения трансформаторов:
а – двухобмоточного; б – трехобмоточного.

Для определения зоны ухудшения изоляционных характеристик производятся испытания по нижеприведенным схемам (таблица 4).

Схемы измерения $\operatorname{tg}\delta$ и емкости отдельных участков изоляции трансформаторов

Таблица 4

Трансформаторы, автотрансформаторы	Участок изоляции	Мостовая измерительная схема	Присоединение выводов и бака трансформатора	
			к измерительной схеме моста	к экрану моста
Двухобмоточные трансформаторы, автотрансформаторы	НН-бак ВН-НН ВН-бак	Перевернутая Нормальная Перевернутая	НН ВН и НН ВН	ВН Бак НН
Трехобмоточные трансформаторы	НН-бак СН-НН СН-бак ВН-СН ВН-бак	Перевернутая Нормальная Перевернутая Нормальная Перевернутая	НН СН и НН СН ВН и СН ВН	ВН, СН Бак, ВН ВН, НН Бак, НН СН, НН
Трансформаторы с расщепленной обмоткой НН	НН ₁ -бак НН ₂₍₁₎ -НН ₁₍₂₎ НН ₂ -бак ВН-НН ₂ ВН-бак ВН-НН ₁	Перевернутая Нормальная Перевернутая Нормальная Перевернутая Нормальная	НН ₁ НН ₂₍₁₎ -НН ₁₍₂₎ НН ₂ ВН-НН ₂ ВН ВН-НН ₁	ВН, НН ₂ Бак, ВН ВН, НН ₁ Бак, НН ₁ НН ₂ , НН ₁ Бак, НН ₂

Значения $\operatorname{tg}\delta$ и емкости участков изоляции двухобмоточных трансформаторов можно определить и расчетным путем по формулам:

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{C_{\text{НН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{НН}} - C_{\text{ВН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{ВН}} + C_{\text{ВН} + \text{НН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{ВН} + \text{НН}}}{C_{\text{НН}} - C_{\text{ВН}} + C_{\text{ВН} + \text{НН}}}; \quad (22)$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{C_{\text{НН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{НН}} + C_{\text{ВН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{ВН}} - C_{\text{ВН} + \text{НН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{ВН} + \text{НН}}}{C_{\text{НН}} + C_{\text{ВН}} - C_{\text{ВН} + \text{НН}}}; \quad (23)$$

$$\operatorname{tg} \delta_3 = \frac{C_{\text{ВН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{ВН}} + C_{\text{ВН} + \text{НН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{ВН} + \text{НН}} - C_{\text{НН}} \operatorname{tg} \delta_{\text{НН}}}{C_{\text{ВН}} + C_{\text{ВН} + \text{НН}} - C_{\text{НН}}}. \quad (24)$$

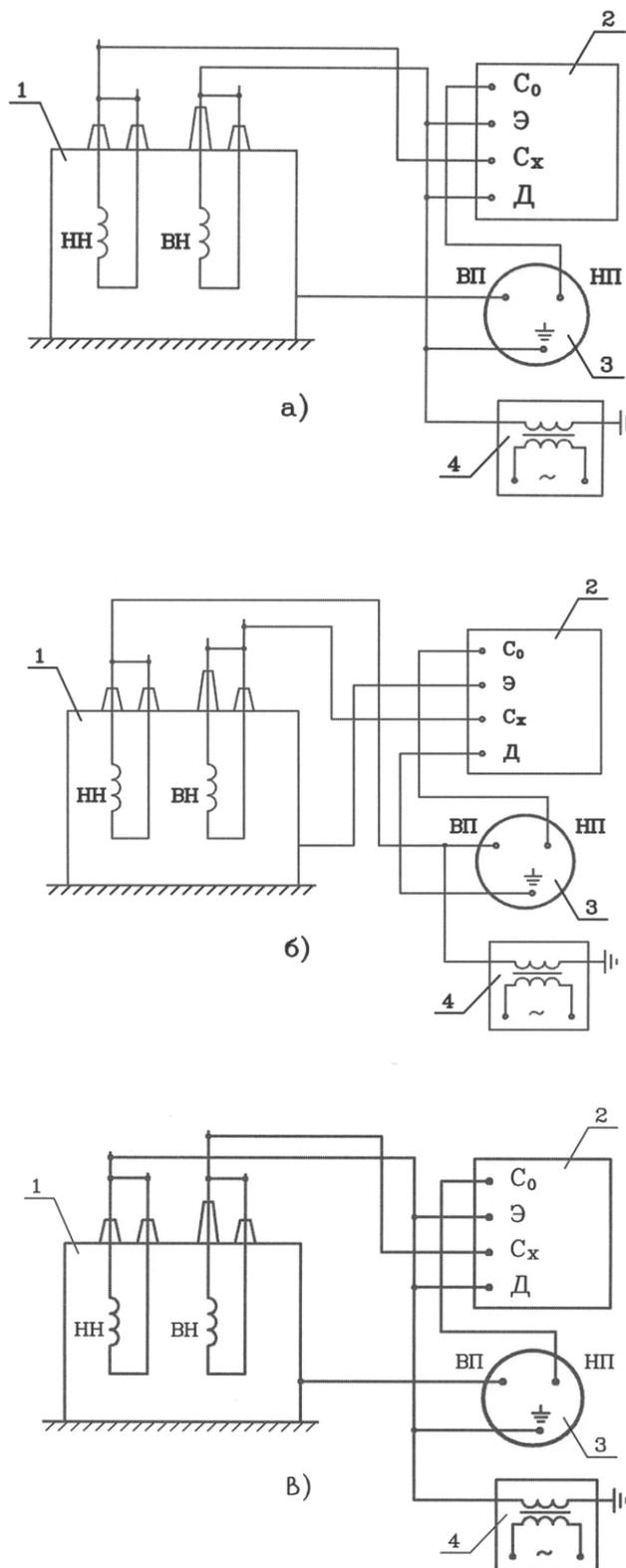


Рисунок 27. Схемы измерений $\text{tg}\delta$ и емкости двухобмоточных трансформаторов и трехобмоточных автотрансформаторов по участкам изоляции.

Внешние соединения моста и трансформатора:

- а – НН-бак (перевернутая);
- б – ВН-НН (нормальная);
- в – ВН-бак (перевернутая).

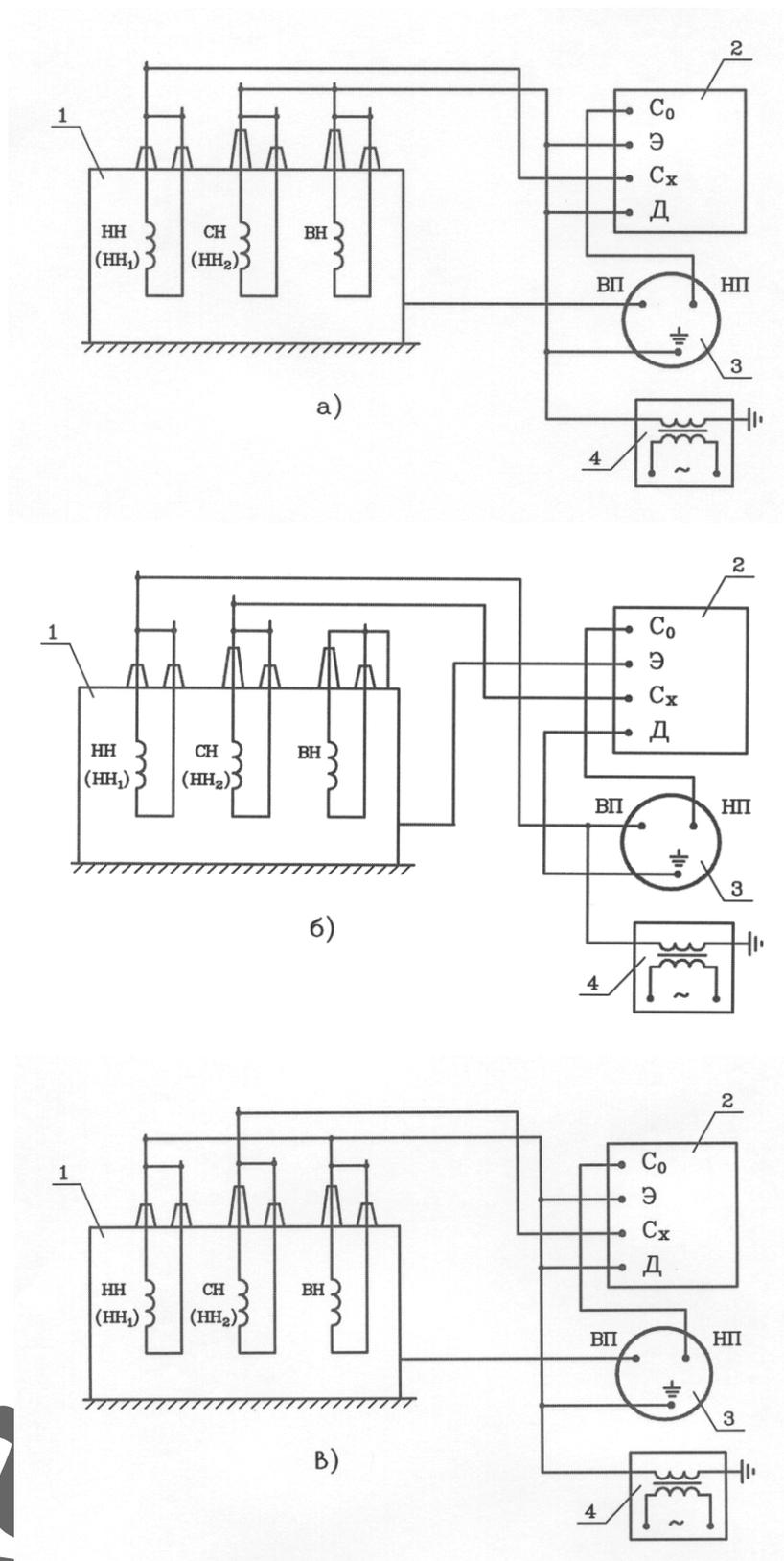


Рисунок 28. Схемы измерений $\text{tg}\delta$ и емкости трехобмоточных трансформаторов и трансформаторов с расщепленной обмоткой НН по участкам изоляции (начало)

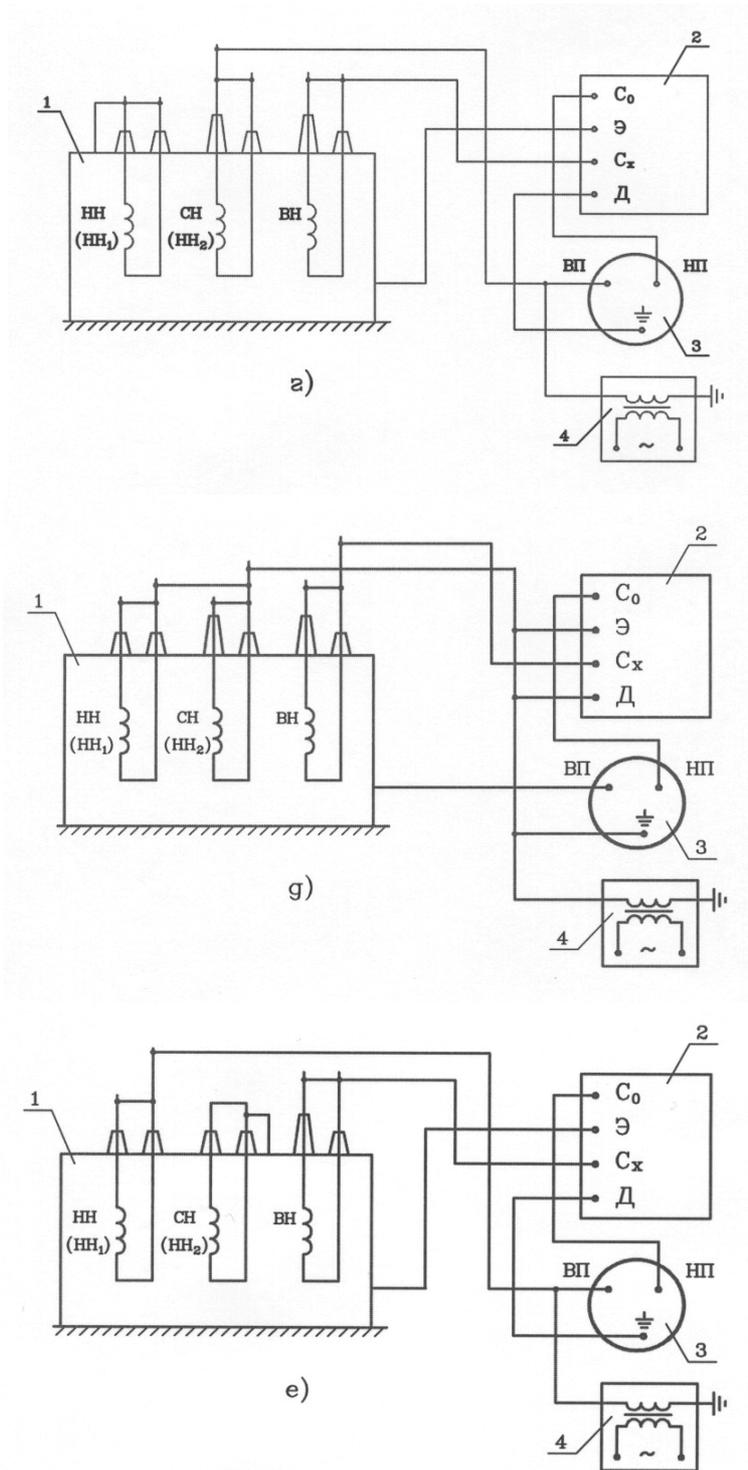


Рисунок 28. Схемы измерений $\text{tg}\delta$ и емкости трехобмоточных трансформаторов и трансформаторов с расщепленной обмоткой НН по участкам изоляции (продолжение)

Внешние соединения моста и трансформатора:

- а – НН-бак (перевернутая); б – СН-НН (нормальная);
- в – СН-бак (перевернутая); г – ВН-СН (нормальная);
- д – ВН-бак (перевернутая); е – ВН-НН₁ (нормальная).

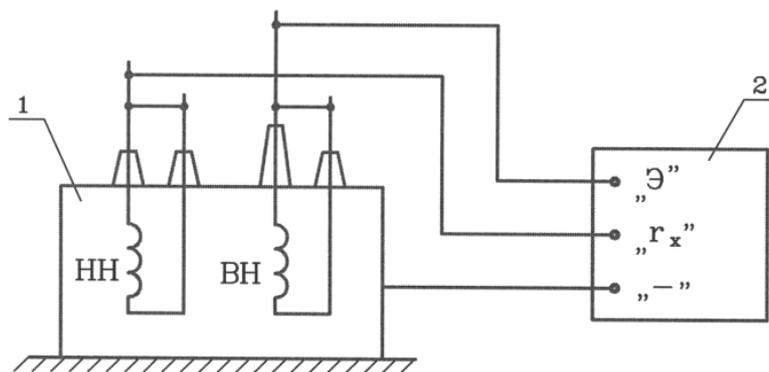


Рисунок 29. Схема измерений сопротивления изоляции обмоток двухобмоточных трансформаторов и трехобмоточных автотрансформаторов по участкам изоляции НН-бак

Для проверки произведенных испытаний используется проводимость изоляции (G). Расчет производится по формулам (25) - (31).

$$G_{60} = \frac{1}{R_{60}} \quad (25)$$

$$G_1 = \frac{-G_B + G_H + G_\Sigma}{2} \quad (26)$$

$$G_2 = \frac{G_B + G_H - G_\Sigma}{2} \quad (27)$$

$$G_3 = \frac{G_B - G_H + G_\Sigma}{2} \quad (28)$$

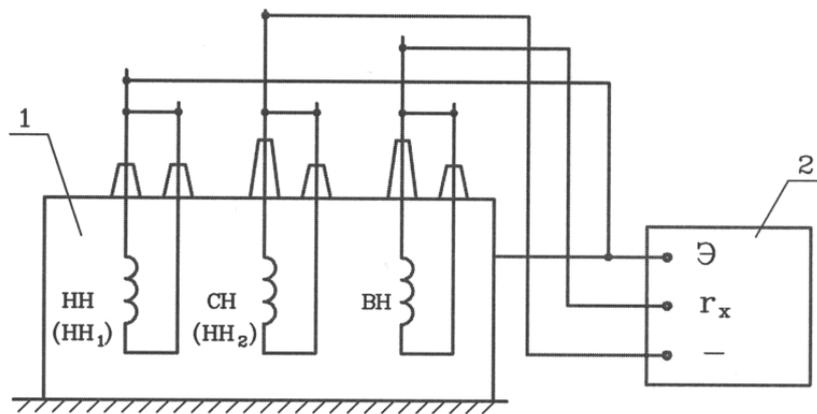
Расчет емкости

$$C_1 = \frac{-C_B + C_H + C_\Sigma}{2} \quad (29)$$

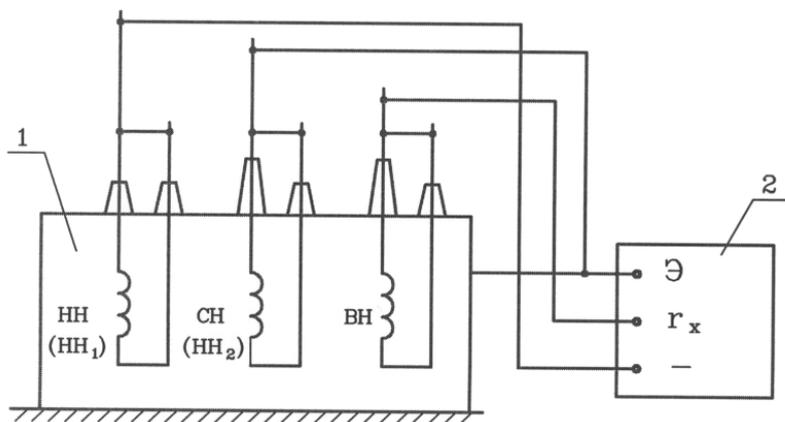
$$C_2 = \frac{C_B + C_H - C_\Sigma}{2} \quad (30)$$

$$C_3 = \frac{C_B - C_H + C_\Sigma}{2} \quad (31)$$

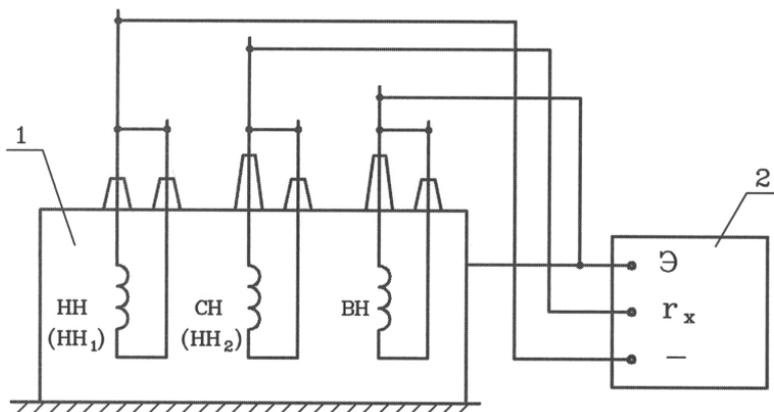
C_1, C_2, C_3 – емкости на рисунке 26.



a)



б)



в)

Рисунок 30. Схемы измерений сопротивления изоляции обмоток трехобмоточных трансформаторов и с расщепленной обмоткой НН по участкам изоляции (начало)

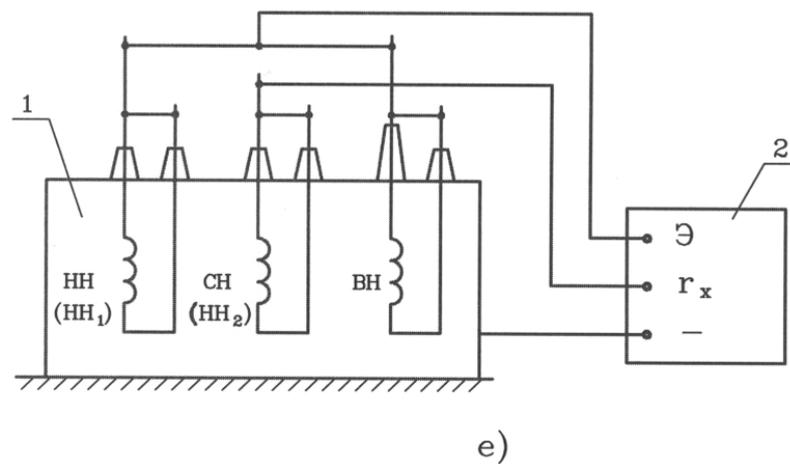
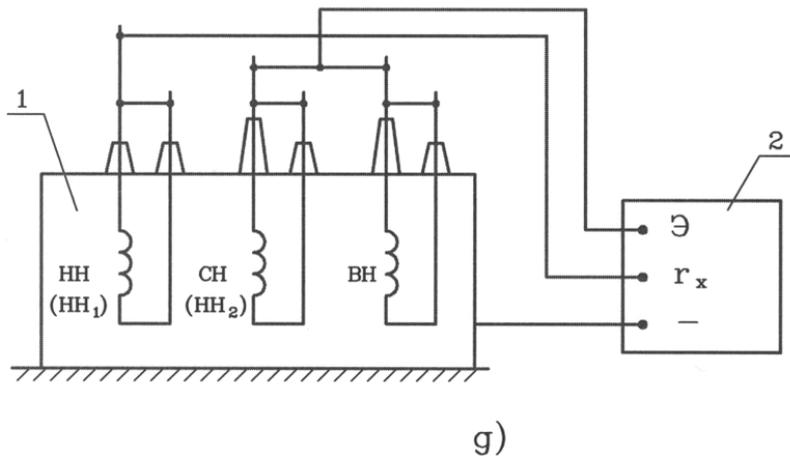
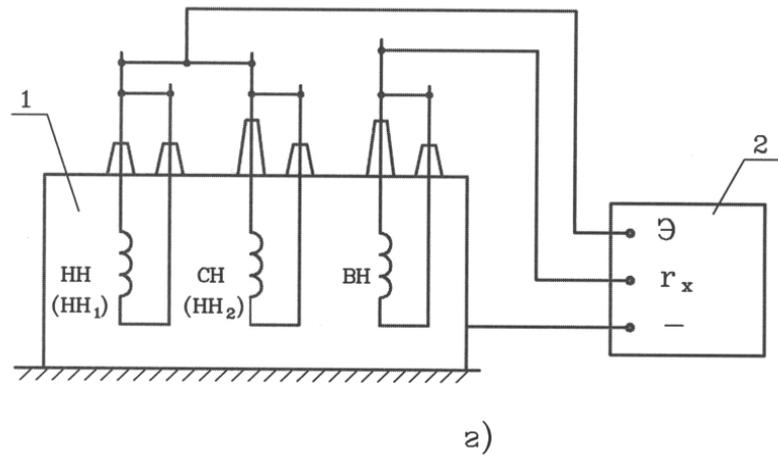


Рисунок 30. Схемы измерений сопротивления изоляции обмоток трехобмоточных трансформаторов и с расщепленной обмоткой НН по участкам изоляции (продолжение):

а – ВН-СН; б – ВН-НН; в – СН-НН; г – ВН-бак; д – НН-бак;
е – НН2-бак.

Примечание: схемы а - е применены для определения сопротивления участков изоляции трансформаторов с расщепленной обмоткой НН при замене на схемах а – д обозначения НН и СН на НН1 и НН2.

При испытании трансформаторов с расщепленной обмоткой измерение по зонам рекомендуется делать как для НН₁ и НН₂, а также при НН₁+НН₂.

Для трансформаторов 330 кВ и выше tgδ внешнего масляного участка ВН-земля должен ориентировочно равняться tgδ масла.

При увлажнении масла сопротивление изоляции при низкой температуре может быть меньше, чем при высокой, т.е. прогрев может повысить сопротивление изоляции, но ухудшить параметры масла.

Увеличение tgδ между участками обмотки и между обмотками свидетельствует о загрязнении изоляции. При этом зависимость tgδ от температуры выражена слабо.

При увлажнении изоляции более 1 % tgδ между обмотками:

$$\text{tg}\delta_{\text{изм}} \leq 0,3 - K \text{tg}\delta_{\text{масла}} \quad (32)$$

$$K = 0,4 - 0,7$$

Контроль промежутка С₃ дает возможность отслеживать жидкую изоляцию, С₁ и С₂ – позволяет оценить состояние твердой (маслобарьерной и ярмовой) изоляции.

При измерении по зонам необходимо учитывать, что tgδ масла растет с повышением температуры быстрее, чем у твердой изоляции.

8 ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА ПРИ МАЛОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Повышенные потери ХХ (Р_{хх}) могут быть вызваны различными причинами, к числу которых относятся следующие:

1. Неудовлетворительная изоляция листов электротехнической стали.
2. Закорачивание изоляции стяжных шпилек, ярмовых балок, нарушение изоляции прессующих домкратов, когда в результате этого образуется короткозамкнутый виток.
3. Дефекты обмоток:
 - а) витковые короткие замыкания;
 - б) закорачивание параллельных ветвей.

Так, плохая межлистовая изоляция вызывает увеличение Р_{хх} на 10-15 %.

Опыт ХХ рекомендуется проводить на малом напряжении 380-220 В. Напряжение подается на обмотку НН, другие обмотки остаются свободными. Предпочтительнее подавать линейное напряжение, чтобы избежать погрешностей от несинусоидальности напряжения.

Схема измерения Р_{хх} в случае вторичной обмотки, соединенной в Δ (треугольник), собирается в соответствии с таблицей 5:

Схемы измерения P_{XX} в случае вторичной обмотки, соединенной в Δ
Таблица 5

Питание	Закорочено	Фаза закороченная
a – в	bc	с
в – с	ca	а
с – а	ав	в

Перед проведением опыта XX трансформатора, находящегося в эксплуатации или на который подавался постоянный ток для прогрева, необходимо его размагнитить. Трансформатор может быть также намагничен при протекании несимметричного тока к.з. или неодновременного пофазного отключения трансформатора. Допускается не производить размагничивание тогда, когда соотношение потерь не отличается более чем на 5 % по сравнению с предыдущими.

У трехфазных трансформаторов при вводе в эксплуатацию и при капитальном ремонте соотношение потерь на разных фазах не должно отличаться от соотношений заводских более чем на 5 %.

У однофазных трансформаторов при вводе в эксплуатацию отличие измеренных потерь и заводских не должно превышать 10 %.

Отличие измеренных значений в эксплуатации от заводских не должно превышать 30%, а соотношение потерь – 10 %.

Потери при выкорачивании фаз “а” и “с” должны быть равны с допуском 2-3%, а при выкорачивании фазы “в” - на 35-40 % больше.

В измеренные значения потерь XX вносятся поправки, учитывающие потери в схеме $P_{сх}$.

$P_{сх}$ измеряются при отключенном объекте:

$$P = P' - P_{сх} . \quad (33)$$

$P_{сх}$ можно определить по формуле:

$$P_{сх} = \frac{U'}{r} = \frac{r_v + r_w}{r_v \cdot r_w} \cdot U'^2 , \quad (34)$$

где U' - напряжение в вольтах, при котором производится измерение потерь;

r_v, r_w - сопротивления соответственно вольтметра и катушки напряжения ваттметра (данные паспортов приборов) при холостом ходу.

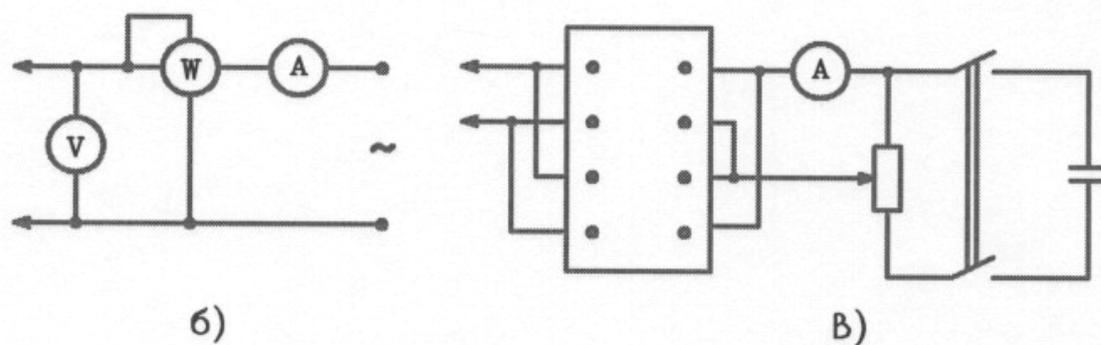
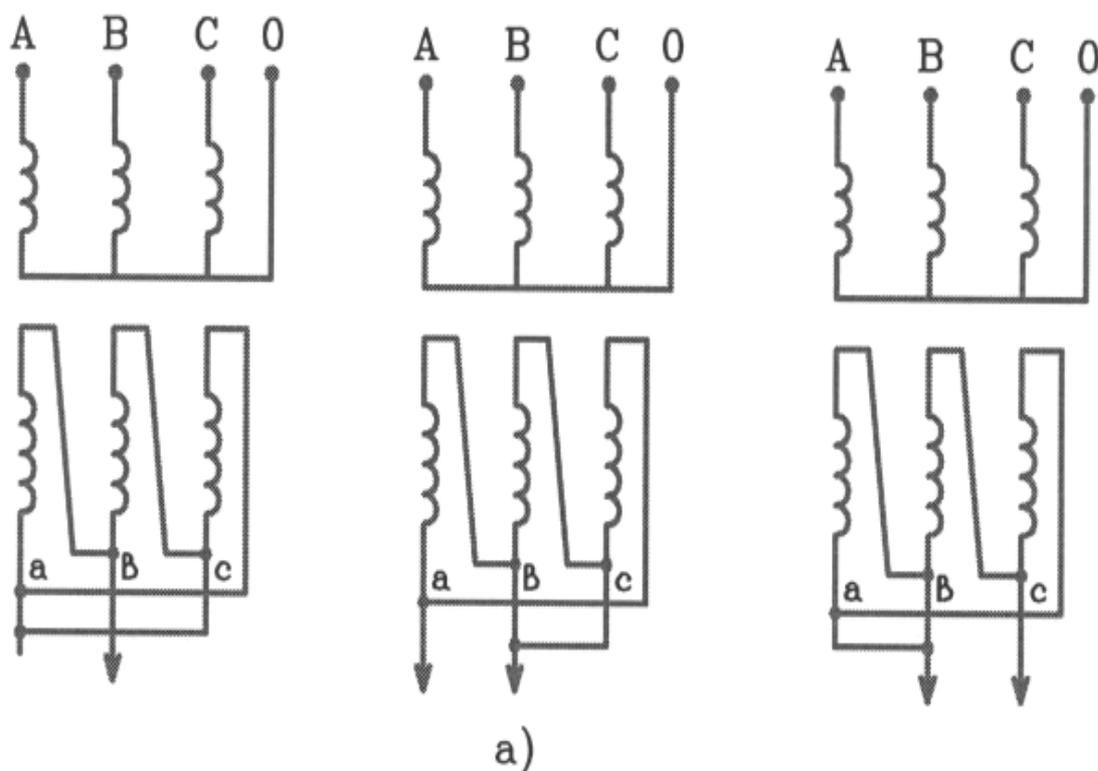


Рисунок 31. Измерение потерь холостого хода при малом возбуждении с последовательным закорачиванием фаз:

а — схемы последовательного закорачивания фаз: слева направо закорочены соответственно фазы с, а, в; б — схема подключения приборов; в — схема подключения питания при размагничивании.

Так как появление короткозамкнутого витка вызывает увеличение потерь, дефектной фазой будет фаза, при выкорачивании которой потери X_{xx} будут наименьшие.

Если трансформатор имеет реакторный переключатель (РНТ), измерение R_{xx} дополнительно производится на положении «моста» регулятора.

Размагничивание производится по вышеприведенной схеме путем подачи на обмотки постоянного тока с изменяющейся полярностью. При помощи реостата плавно увеличивают ток в обмотке трансформатора до значения, равного $1.1 I_{xx}$. Затем плавно снижают ток до 0 и, переключая полярность, увеличивают ток до $1.1 I_{xx}$. Такие циклы изменения тока производятся при значениях тока 0,8; 0,6; 0,4; 0,2 I_{xx} . Затем, снизив ток до 0, отключают источник питания постоянным током и производят измерение R_{xx} .

Размагничивание производится на всех стержнях. В качестве источника постоянного тока можно использовать аккумуляторы, выпрямительное устройство, блок стабилизированного питания для измерения омических сопротивлений производства БЭРН.

Размагничивание трансформатора возможно методом кратковременной подачи на обмотки номинального напряжения в режиме холостого хода.

9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

При определении группы соединений обмоток выявляются дефекты, вызванные неправильным направлением намотки обмотки, сборкой, подсоединением отводов обмотки к вводам, подключением регулировочной обмотки.

В процессе эксплуатации группа соединений проверяется при вводе в работу трансформатора и при ремонте с разборкой схемы трансформатора (ремонт обмоток, избирателя и предызбирателя РПН).

В условиях эксплуатации проверка группы соединений производится методом постоянного тока с использованием в качестве контролирующего прибора гальванометра.

При определении группы соединений методом постоянного тока наблюдают только за направлением отклонения стрелки гальванометра в ту или другую сторону в зависимости от того, производится замыкание или размыкание цепи.

В приведенной таблице знаки «+» и «-» расставлены для момента включения тока со стороны обмотки ВН.

Изменить группу трансформатора без изменения схемы соединения обмоток можно, изменив фазировку со стороны питания, поменяв фазы А и С местами. В этом случае получим вместо 11 группы первую.

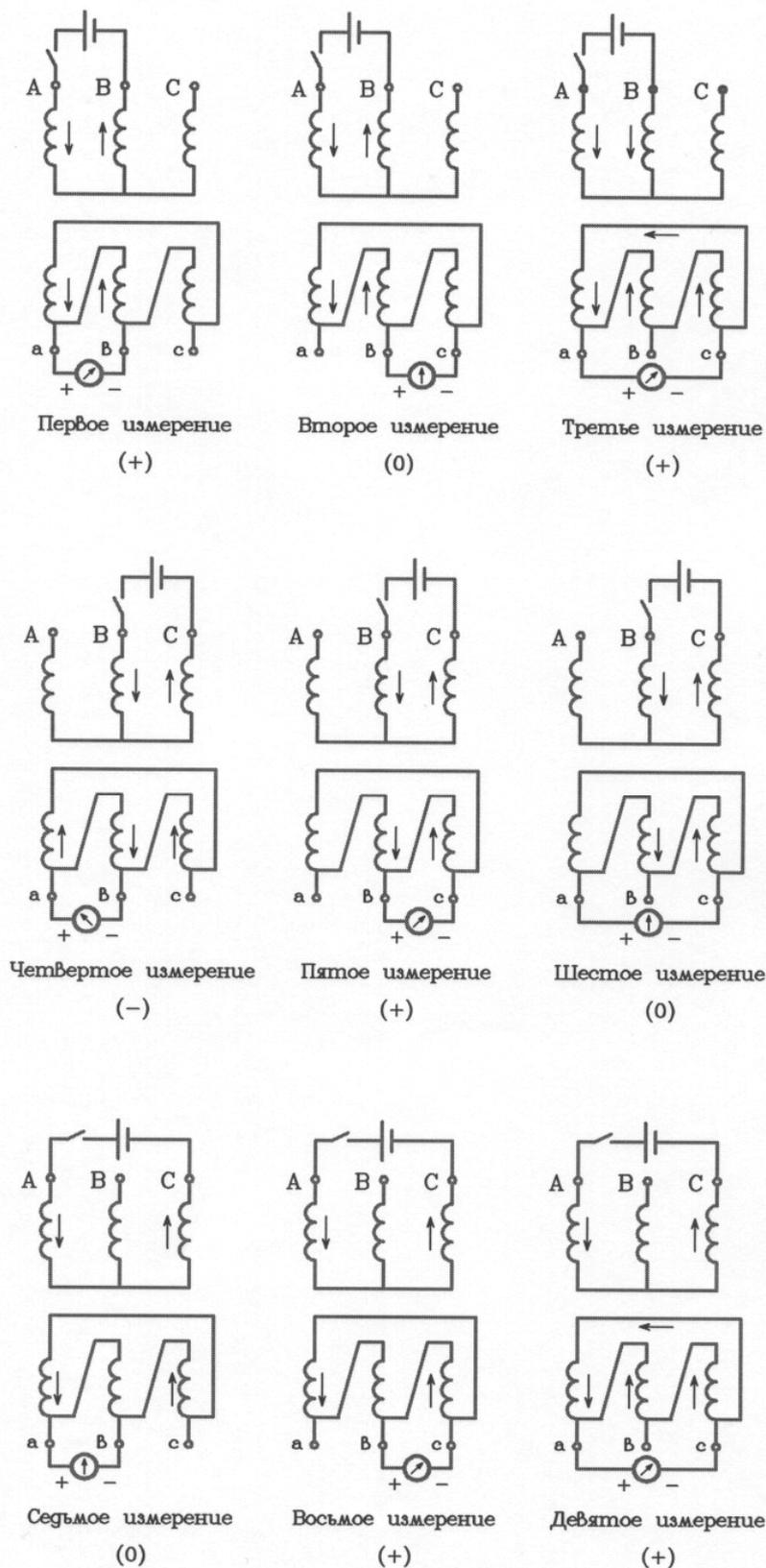


Рисунок 32. Определение группы соединения $Y/\Delta-11$ трехфазного трансформатора

Примечание: группы соединения $Y_H/\Delta-11$, Y_H авто/ $\Delta-0-11$ проверяются также по схемам, приведенным на данном рисунке.

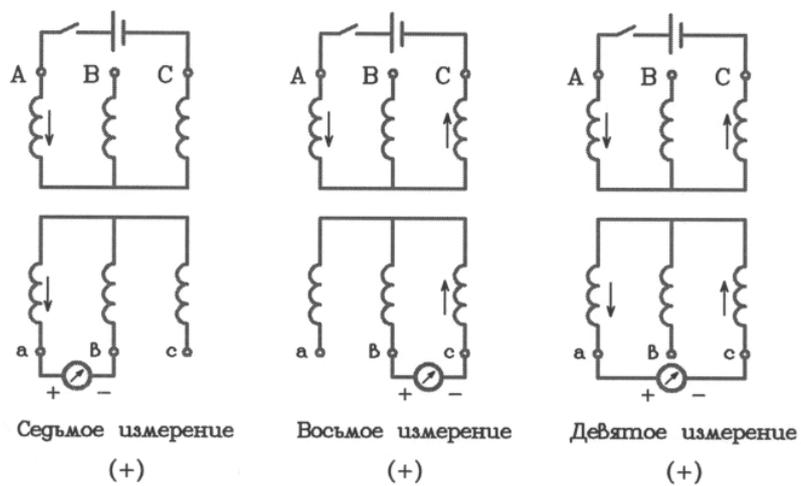
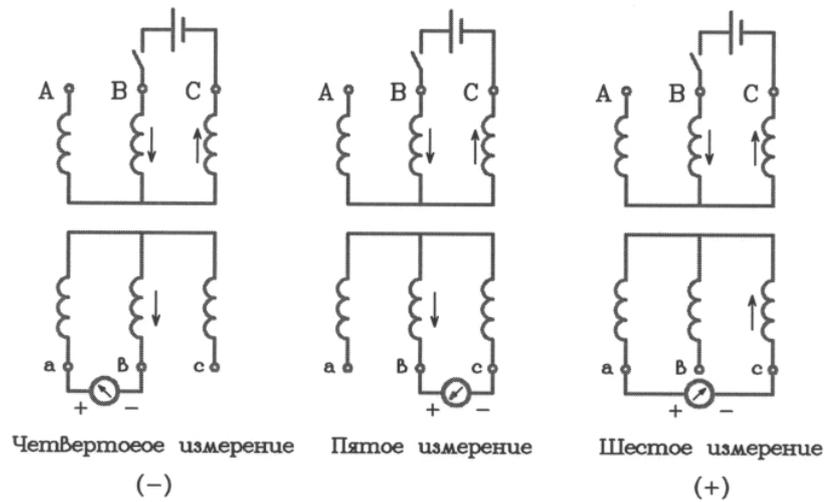
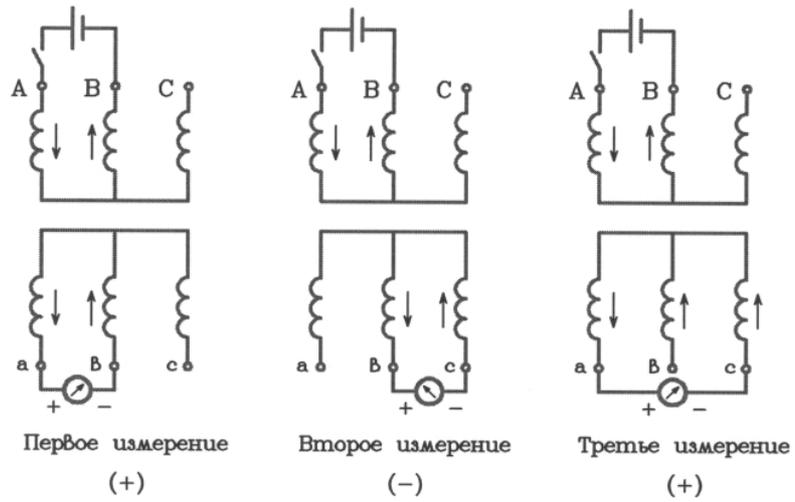


Рисунок 33. Определение группы соединения $Y/Y-0$ трехфазного трансформатора

Примечание: группы соединения $Y_n/Y-0$, Y/Y_n-0 проверяются также по схемам, приведенным на данном рисунке.

Определение группы соединения обмоток трансформаторов
при помощи постоянного тока

Таблица 6

Питание подве- дено к вводам	Отклонение прибора, присоединенного к вводам								
	ab	bc	ca	ab	bc	ca	ab	bc	ca
	Для группы 0			Для группы 4			Для группы 8		
AB BC CA	+	-	-	-	-	+	-	+	-
	Для группы 6			Для группы 10			Для группы 2		
AB BC CA	-	+	+	+	+	-	+	-	+
	Для группы 11			Для группы 3			Для группы 7		
AB BC CA	+	0	-	0	-	+	-	+	0
	Для группы 1			Для группы 5			Для группы 9		
AB BC CA	+	-	0	-	0	+	0	+	-
	Для группы 11			Для группы 3			Для группы 7		
AB BC CA	-	+	0	+	0	-	0	-	+
	Для группы 11			Для группы 3			Для группы 7		
AB BC CA	0	-	+	-	+	0	+	0	-

Из таблицы видно, что каждая группа вполне определяется показанием либо одной строчки, либо одного столбца, т.е. тремя измерениями. Шесть остальных измерений служат для подтверждения правильности схемы измерительной установки.

10 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} \quad (35)$$

Определение коэффициента трансформации:

$$K_T = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = \frac{w_B}{w_H}, \quad (36)$$

где w – количество витков соответствующей обмотки.

В процессе эксплуатации K_T определяется из опыта холостого хода. K_T определяется на всех положениях переключающего устройства и для всех фаз. Для трехобмоточных трансформаторов достаточно проверить K_T для двух пар обмоток.

Измеряя K_T , можно выявить следующие дефекты:

1. Неправильное подсоединение отводов РПН.
2. Неправильная установка привода ПБВ.
3. Неправильное подсоединение регулировочной обмотки.

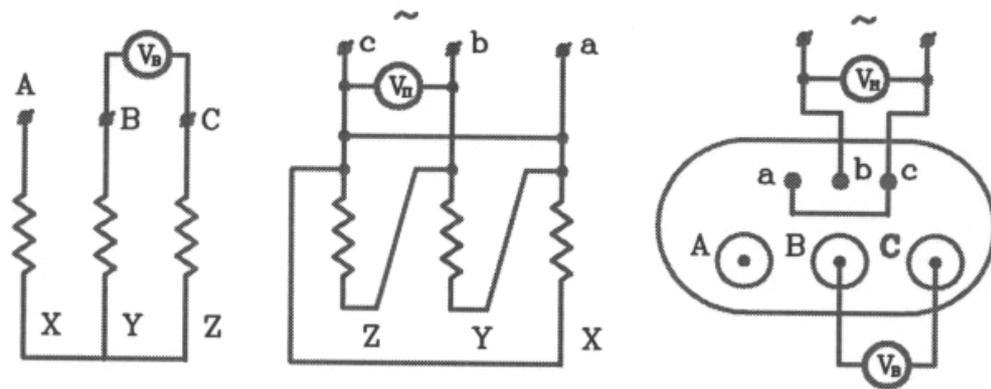
K_T определяют методом двух вольтметров класса погрешности не ниже 0,2. Допускается применение вольтметров класса 0,5, имеющих одинаковую погрешность по шкале в пределах производимых измерений. При измерениях к более высокой обмотке подводится напряжение 380 или 220В. Вольтметры подключаются к каждой участвующей в измерениях обмотке.

При производстве синхронного отсчета показаний вольтметров разрешается применение вольтметров класса 0,5.

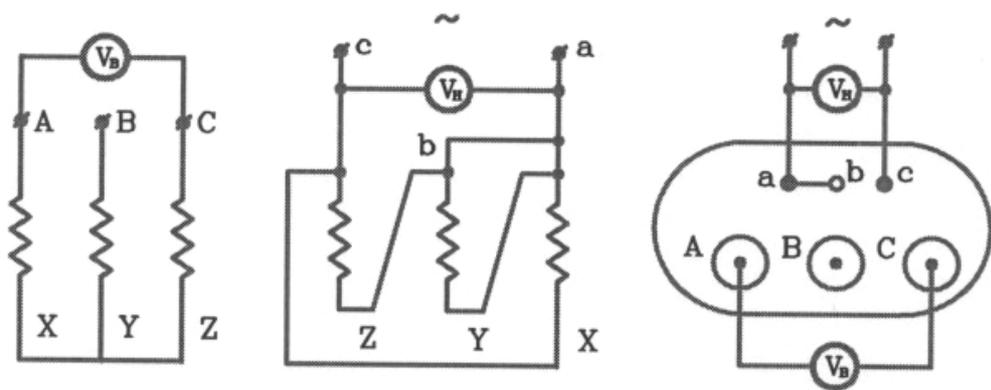
Если устройство переключения ответвлений обмоток имеет предызбиратель ответвлений, которым производится реверсирование регулировочной части обмоток или переключение грубой ступени, то измерение допускается проводить на одном положении предызбирателя, на всех ответвлениях регулировочной обмотки. При этом дополнительно проводят по одному измерению на всех других положениях предызбирателя.

При испытании трехфазных трансформаторов при трехфазном возбуждении измеряют линейные напряжения, соответствующие одноименным линейным зажимом проверяемых обмоток. При возможности измерения фазных напряжений допускается определение K_T по фазным напряжениям. Коэффициент трансформации по фазным напряжениям проверяют при однофазном или трехфазном возбуждении.

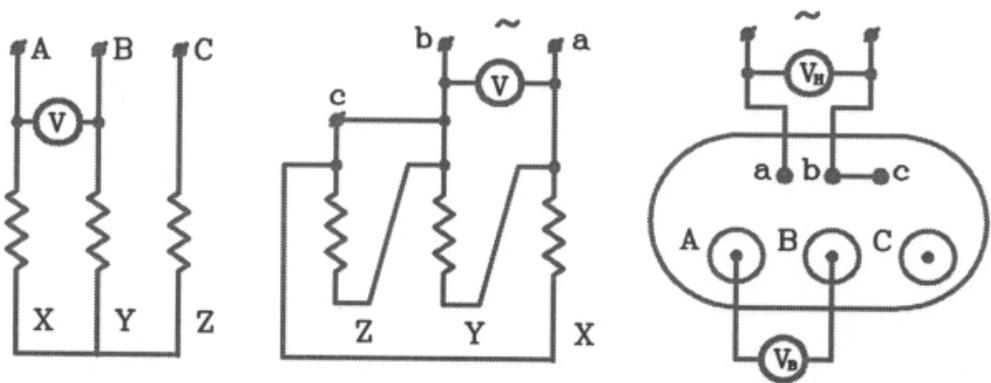
При испытании трехфазных трансформаторов с обмотками, соединенными по схемам «звезда-треугольник» и «треугольник-звезда», $K_{тр}$ по фазным напряжениям определяют при поочередном коротком замыкании фаз и, если обмотка ВН соединена в звезду, $K_{тр}=2K_{ф}$, и $0,5 K_{ф}$, если обмотка НН соединена в звезду.



a)



б)



в)

Рисунок 34. Определение коэффициента трансформации трансформатора, соединенного по схеме Y/Δ , при несимметричном трехфазном напряжении:

а – первое измерение (схема соединения и вид на крышку трансформатора); б – второе измерение; в – третье измерение.

Измеренный коэффициент трансформации $K_{тр}$ определяется, как

$$K_{тр} = \frac{U_{B-C}}{U_{b-c}} = \frac{W_B + W_C}{W_b} = \frac{2W_B}{W_b} = 2K_{трф}, \quad (37)$$

где $W_B = W_C$ - число витков в фазах В и С обмотки ВН;

W_b – число витков фазы в обмотке НН;

$K_{трф}$ – фазный коэффициент трансформации.

Испытание трансформатора, если наибольшие и наименьшие напряжения отличаются менее чем на 2 %, разрешается при трехфазном возбуждении

11 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Сопротивление постоянному току измеряют способом падения напряжения или при помощи моста.

Значение постоянного тока при измерениях не должно превышать 0,2 номинального тока нагрузки.

Сопротивление следует измерять на всех ответвлениях обмоток. Если РПН имеет предызбиратель, то измерения производят на одном положении предызбирателя. Дополнительно производят по одному измерению сопротивлений на каждом из других положений предызбирателя.

Установившимся положением приборов следует считать показание, которое изменяется не более чем на 1 % значения в течение не менее 30 сек.

Класс точности измерительных приборов должен быть не более 0,5.

В качестве источника постоянного тока используются аккумуляторные батареи, допускается применять выпрямительные устройства с пульсацией напряжения на выходе не более 1 %.

12 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ПОСТОЯННОМУ ТОКУ МЕТОДОМ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

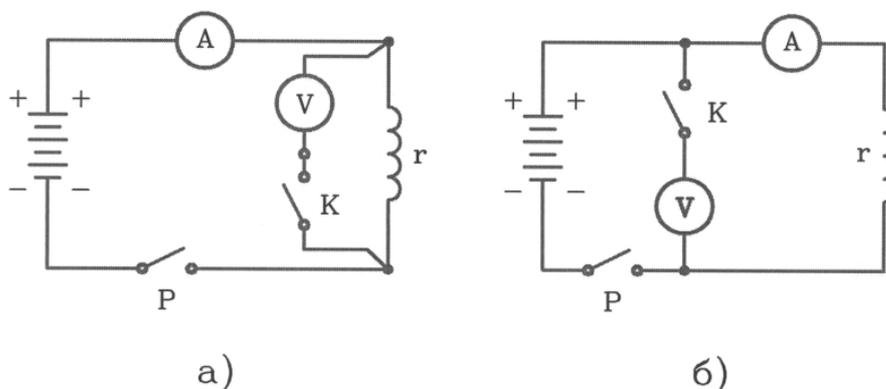


Рисунок 35. Принципиальная схема измерения сопротивления:
а – для малых сопротивлений ($r < 10$ ом); б – для больших сопротивлений ($r > 10$ ом).

С целью предохранения вольтметра в переходных процессах от повреждений его включают кнопкой “К” при установившемся значении тока.

Для сокращения времени установления тока применяют кратковременное форсирование шунтированием регулировочного сопротивления в цепи постоянного тока. Сопротивление этого резистора должно быть в 5-10 раз больше измеряемого сопротивления.

Сопротивления должны быть приведены к одной температуре.

$$t_2 = \frac{r_2}{r_1} (t_1 + 235) - 235 \quad (38)$$

Для алюминиевой обмотки вместо 235°С применяется 225°С.

Сопротивления, приведенные к одной температуре, должны отличаться не более чем на 2% от предыдущих измерений и между фазами.

Особое внимание следует обратить при измерении r у трансформаторов с РПН типа РС, для трансформаторов мощностью 32, 63 МВА и более. У них типичное повреждение – подгар контактов предызбирателя.

При измерении r трансформаторов с РПН необходимо несколько раз прогнать РПН во всем диапазоне регулирования, чтобы исключить окисление контактов.

Измерение при помощи моста выполняется в соответствии с инструкцией на измерительный мост. Измерение сопротивлений порядка 0,0001 – 0,001 Ом следует измерять при помощи двойного моста.

При измерении сопротивления одной обмотки остальные обмотки должны быть разомкнуты.

При измерении сопротивления менее 10 Ом, если исходное значение измеренного сопротивления составляет 0,5% и более сопротивления вольтметра, то значение определяемого сопротивления равно:

$$r = r' \cdot \frac{1}{1 - \frac{r'}{r_v}} \quad (39)$$

где r' - сопротивление, вычисляемое по измеренным значениям тока и напряжения;

r_v – сопротивление вольтметра.

Применение моста Р333 на светодиодах не рекомендуется.

Если измеряемое сопротивление более 10 Ом и сопротивление проводов ($r_{пр}$) и амперметра (r_A) составляет более 0,5% измеряемого сопротивления, то из общего сопротивления его нужно вычесть:

$$r_x = \frac{U}{I} - (r_A + r_{пр}) \quad (40)$$

Измерение сопротивления обмоток необходимо производить до измерения Z_k .

Для получения лучших результатов при измерениях нельзя спаивать вместе токовые и напряженческие провода. В противном случае можно внести большую погрешность, обусловленную сопротивлением контакта между токовым проводом и вводом.

Разница между базовой величиной и измеренной, а также между фазами, не должна превышать 2%.

13 ИЗМЕРЕНИЕ Z_k ТРАНСФОРМАТОРОВ

При протекании токов к.з. вследствие воздействия электродинамических сил первоначально могут происходить незначительные смещения отдельных катушек внутренних обмоток трансформаторов.

Основным параметром, характеризующим деформацию обмоток, является сопротивление короткого замыкания Z_k . По изменению Z_k можно определить степень деформации обмоток.

Измерение Z_k необходимо производить на всех трансформаторах мощностью 63 МВА и более, класса напряжения 110 кВ и выше:

- перед вводом в эксплуатацию;
- при капитальном ремонте;
- после протекания через трансформатор токов 0,7 и более расчетного тока к.з. трансформатора.

Для решения вопроса о наличии деформации обмоток необходимо сравнивать измеренные значения Z_k с базовыми. В качестве базовых значений Z_k принимается значение, измеренное на заводе.

При отклонении значения Z_k от предыдущих измерений на 3% или расчетного по U_k на 5%, трансформатор необходимо выводить в ремонт.

Измерение Z_k трехфазных трансформаторов необходимо производить со стороны обмотки, соединенной в “звезду” и имеющей нулевой провод.

При измерениях напряжение следует подать на все три фазы, измерение тока и напряжения производить пофазно с обязательным использованием нулевого провода. При всех измерениях Z_k “треугольник” на обмотках НН должен быть собран.

Необходимое значение тока для проведения измерений следует определять, исходя из обеспечения нормального отсчета показаний по приборам, стрелка приборов должна быть на второй половине шкалы.

Сечение закоротки, установленной на выводах, должно составлять не менее 30% сечения проводов обмотки трансформатора. Сечение проводов обмотки следует определять по значению ее номинального тока, исходя из средней плотности тока в обмотке, равной 3 А/мм².

Все присоединения питающих проводов и закоротки должны быть выполнены под “болт”. Если для закоротки используется алюминий, их сечение должно быть увеличено на 30%. Длина закоротки должна быть минимальной. Контактные места установки закороток должны быть тщательно зачищены до металлического блеска.

На блочных трансформаторах измерение производить без расхиновки стороны НН с установкой закоротки на выводах НН. Предварительно, для определения тока, напряжения и пределов приборов при измерениях по паспортным данным, определяется Z_k (Ом):

$$Z_k = \frac{U_{ном} \cdot U_k}{100 \cdot I_{ном}}, \quad (41)$$

где U_k – напряжение короткого замыкания для рассматриваемой пары обмоток, указанное в паспорте;

$U_{ном}$ – номинальное фазное напряжение питаемой обмотки;

$I_{ном}$ – номинальный фазный ток питаемой обмотки.

В целях более полного контроля измерение Z_k следует производить на номинальной ступени регулирования напряжения и двух крайних.

Номинальный ток отщвления:

$$I'_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} U_{ном}}, \quad (42)$$

где $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора;

$U_{ном}$ – номинальное линейное напряжение отщвления обмотки.

При измерениях необходимо фиксировать частоту питающей сети. Если частота в сети отличается от 50 Гц, измеренное значение необходимо привести к номинальной частоте по формуле:

$$Z_k = \frac{50}{f'} Z'_k. \quad (43)$$

Оценка состояния обмоток производится по сравнению с базовыми значениями (Z_b):

$$\Delta Z_k = \frac{Z_k - Z_b}{Z_b} \cdot 100 \% . \quad (44)$$

Для трехобмоточных трансформаторов при деформации средней по расположению обмотки знак ΔZ_k положительный при измерениях, если средняя пара является наружной, ΔZ_k – отрицательные.

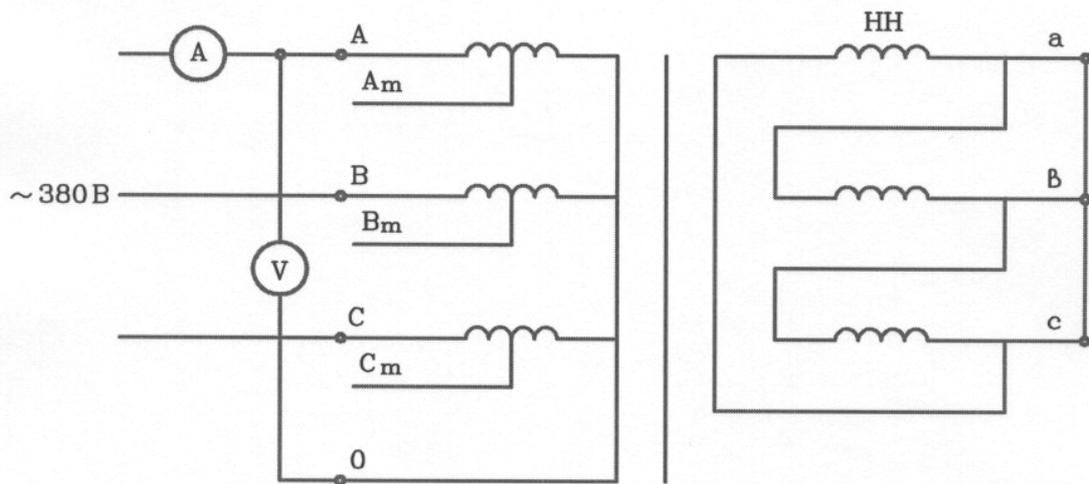


Рисунок 36. Схема измерений Z_k автотрансформатора для пары обмоток ВН-НН

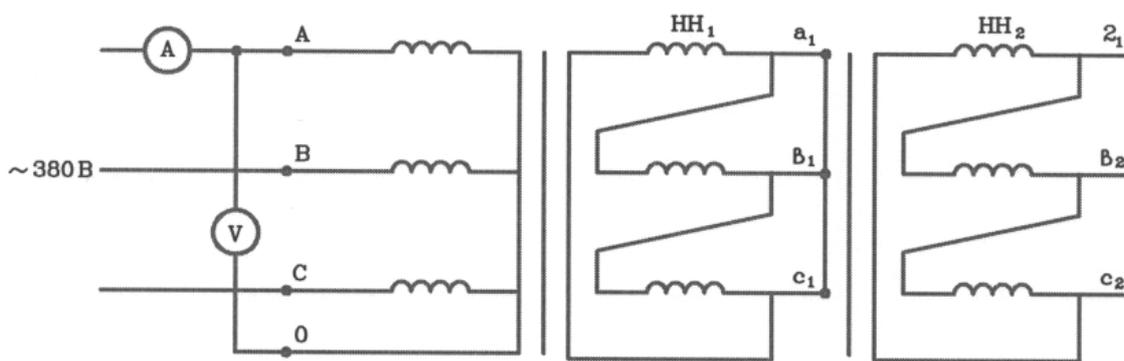


Рисунок 37. Схема измерений Z_k трансформатора с расщепленной обмоткой НН (ВН-НН₁)

На рис.36 приведены схемы измерения Z_k автотрансформатора для трех пар обмоток. На рис. 37 – схема измерений Z_k трансформатора, имеющего расщепленную обмотку НН. В таком случае следует производить два измерения при поочередном закорачивании частей обмотки НН. На схемах не показаны регулировочные обмотки, так как их наличие не меняет принципиальных схем измерений, а учитывается положением РПН. Схемы измерений приведены с включением приборов в фазу А. Измерения в фазах В и С выполняются аналогично.

Необходимое значение тока для проведения измерений следует определять, исходя из обеспечения нормального отсчета показаний по приборам (амперметру и вольтметру), стрелка приборов должна быть на второй половине шкалы.

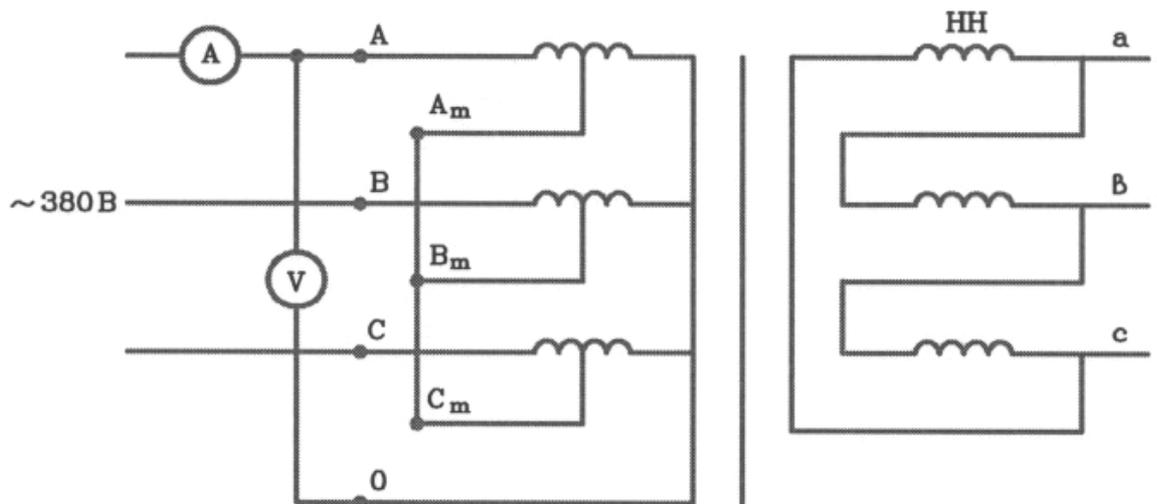


Рисунок 38. Схема измерений Z_k автотрансформатора для пары обмоток BH-CH

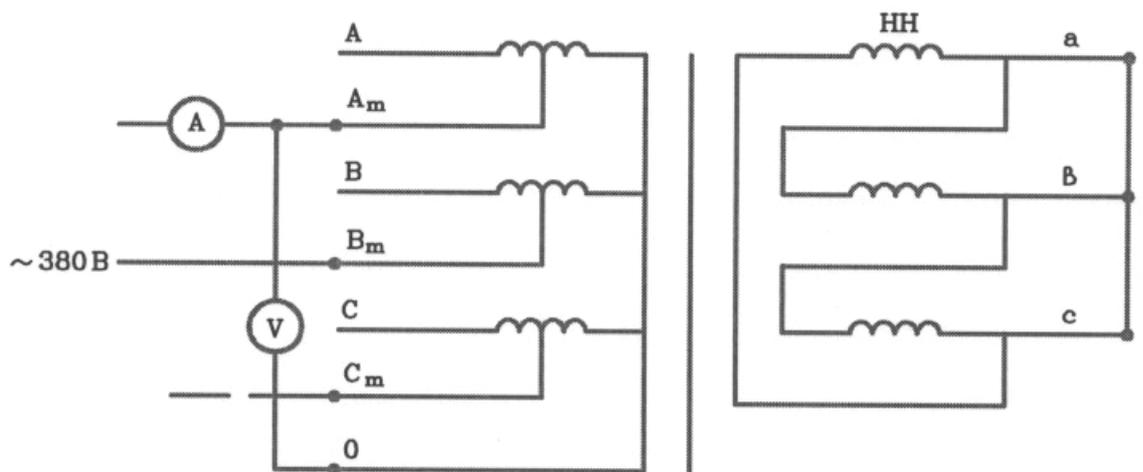


Рисунок 39. Схема измерений Z_k автотрансформатора для пары обмоток CH-НН

Кадр

Таблица расположения обмоток в трансформаторах и автотрансформаторах

Таблица 7

№	Тип трансформатора, автотрансформатора	Мощность, МВ·А (год разработки трансформатора)	Класс напряжения, кВ	Регулирование напряжения	Расположение обмоток на стержнях	Рекомендуемые пары обмоток при проведении измерений
1	АТДЦТН	63, 125 (1968,1980); 200, 250	220	РПН в линии СН	НН-СН-ВН-РО	ВН-СН _{ном} , СН _{ном} -Н
2	АТДЦТН	125 (1977); 200 (1975, 1984); 250 (1980)	330	То же	НН-РО-СН-НН	НН-СН _{ном} , ВН-СН _{макс} , СН _{ном} -НН, СН _{мин} -НН
3	АТДЦТН	125 (1963)	220	- " -	НН-РО-СН-ВН	ВН-СН _{ном} , СН _{мин} -НН, СН _{ном} -НН
4	АТДЦТН	125(1963); 200 (1962, 1972)	330	- " -	НН-РО-СН-ВН	ВН-СН _{ном} , СН _{мин} -НН, СН _{ном} -НН
5	АТДЦТН	250, 500	500	РПН в нейтрале ВН	НН-РО-СН-ВН	ВН-СН _{ном} , ВН-СН _{макс} , СН _{ном} -НН, СН _{макс} -НН
6	АТДЦН	400	330	То же	РО-НН-ВН	ВН _{ном} -НН, ВН _{макс} -НН, ВН _{мин} -НН
7	ТРДЦН	63	330	РПН в нейтрале ВН	РО-НН ₁ (НН ₂)-ВН	ВН _{ном} -НН ₁ (НН ₂), ВН _{макс} -НН ₁ (НН ₂)
8	ТРДЦН	63, 80, 125	110	То же	НН-ВН-РО	ВН _{ном} -НН ₁ , ВН _{ном} -НН
9	ТРДЦН	63	150	- " -	НН-ВН-РО	ВН _{ном} -НН ₁ , ВН _{ном} -НН ₂
10	ТРДЦН	63, 100, 160	220	- " -	НН-ВН-РО	ВН _{ном} -НН ₁ , ВН _{ном} -НН ₂
11	АОДЦТН	167, 267	500	РПН в линии СН	НН-СН-ВН; РО-КО	СН _{мин} -НН, ВН-СН _{ном} , СН _{ном} -НН

Таблица расположения обмоток в трансформаторах

Таблица 7 (продолжение)

№	Тип трансформатора, автотрансформатора	Мощность, МВ·А (год разработки трансформатора)	Класс напряжения, кВ	Регулирование напряжения	Расположение обмоток на стержнях	Рекомендуемые пары обмоток при проведении измерений
12	АОДЦТН	333, 417	750	РПН в нейтрале ВН	НН-СН-ВН; РО-КО	ВН-СН _{ном} , СН _{ном} -НН
13	Автотрансформаторы без РПН	-	-	Без РПН (с ПБВ и без него)	НН-СН-ВН	ВН _{ном} -НН, СН _{ном} -НН
14	Блочные трансформаторы	-	-	То же	НН-ВН	ВН _{ном} -НН
15	Блочные трансформаторы	-	-	“ - ”	ВН ₂ -НН-ВН ₁	ВН _{ном} -НН
16	ТДТН	63, 80	110, 150	РПН в нейтрале ВН, ПБВ в СН	НН-СН-ВН-РО	ВН _{ном} -СН _{ном} , СН _{ном} -НН

Примечания

1. Приведены сведения по сетевым трансформаторам общего назначения основных типов, находящихся в эксплуатации.

2. При всех измерениях предусматривается подача напряжения на обмотку, указанную первой, и установка закоротки на обмотку, указанную второй.

3. В автотрансформаторах по пп.1, 2 обмотка РО подключена к точке соединения последовательной и общей обмоток, по пп. 3, 4, 11 обмотка РО включена между последовательной и общей обмотками.

14 ОЦЕНКА НОВЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Переход от обслуживания оборудования по срокам эксплуатации к обслуживанию по его действительному состоянию изменило отношение к профилактическим испытаниям. Решение о проведении капитального ремонта трансформатора (стоимость ремонта соизмерима со стоимостью нового) решается при рассмотрении всего комплекса испытаний, поэтому изменились требования к методам измерений:

1. Точность измерений. Увеличение точности измерения $\text{tg}\delta$ в 10 раз приводит к увеличению стоимости оборудования также в 10 раз.

2. Результаты испытаний должны быть пригодны к дальнейшему анализу. Например, РД регламентируют применение измерения механических примесей весовым методом. Для задачи диагностики этот метод неприменим, так как один и тот же вес примесей может быть получен как большим количеством мелких (менее 5 мк) и практически безопасных частиц, так и малым количеством крупных, весьма опасных частиц. В то же время современные методы позволяют разделить механические примеси по разным группам. Еще в меньшей степени этому требованию удовлетворяют методы измерения характеристик частичных разрядов. Для разных видов дефектов одна и та же амплитуда кажущегося заряда не дает ответа о наличии дефекта, особенно это чувствуется в трансформаторах.

3. Так фирмой «Диакс» произведена регистрация частичных разрядов в оборудовании 750 кВ Смоленской АЭС. Повышенный уровень частичных разрядов был обнаружен в двух однофазных автотрансформаторах, но при ревизии дефекторов не было обнаружено, и они были введены в работу. В то же время в двух трансформаторах тока 750 кВ и шунтирующем реакторе повышенного уровня частичных разрядов не было обнаружено, но вскоре они вышли из строя. Поэтому определение величины частичных разрядов не может быть отнесено к основным методам диагностики.

4. Множественность факторов механизма деградации изоляции не позволяет применить метод определения концентрации фурановых соединений, растворенных в масле. Выход этих соединений в процессе термической деградации не дает постоянного соотношения в среднем по массе целлюлозы. Метод не дает монотонного изменения параметров, так как фурановые адсорбируются на силикагеле и разлагаются в кислой среде. Отсутствие монотонности и значимых различий содержания фурановых от срока службы трансформатора и степени полимеризации изоляции указывает на случайность этого метода.

5. Объективным методом является метод определения степени полимеризации изоляции. Снижение ее монотонно и определяет степень ее механической прочности. Оценка износа изоляции может быть определена только таким методом. Но образцы изоляции необходимо брать из витковой изоляции верхних катушек, что является очень сложным. При достижении степени

полимеризации ниже 250 единиц (норма) выход воды из изоляции до 6% ее массы.

6. Соблюдение методик проведения испытаний. Так, ЗТЗ Сервис произвела анализ забракованных по Z_k трансформаторов, до 40 % отбраковки было ложной.

7. При решении вопроса о восстановлении свойств изоляции необходимо учитывать, что обмывка изоляции, сушка ее укорачивает срок службы изоляции (снижается степень полимеризации изоляции).

15 НАЛАДКА ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРОВ (ПУ)

ПУ типа ПБВ. Наладка ПУ типа ПБВ включает в себя измерение сопротивления постоянному току и коэффициента трансформации на всех положениях ПУ, предварительно проверяют работу механизма ручного привода на всех положениях в одну и в другую сторону при вывернутых стопорных болтах. При этом убеждаются в четкости фиксации положений. Не допускается переход ПУ за крайние положения, ограниченные стопорным болтом.

Считается, что ПУ собрано правильно, если в первом положении значение электрического сопротивления обмотки постоянному току наибольшее. При необходимости регулирования ПУ привод устанавливают в положение, в котором сопротивление наибольшее и, не трогая механизм привода, разбирают головку привода и устанавливают крышку головки так, чтобы указатель был против первого положения. После этого производят сборку привода и повторно измеряют сопротивление и коэффициент трансформации. При установке привода ПУ неправильно, появляются два одинаковых положения (3 и 6).

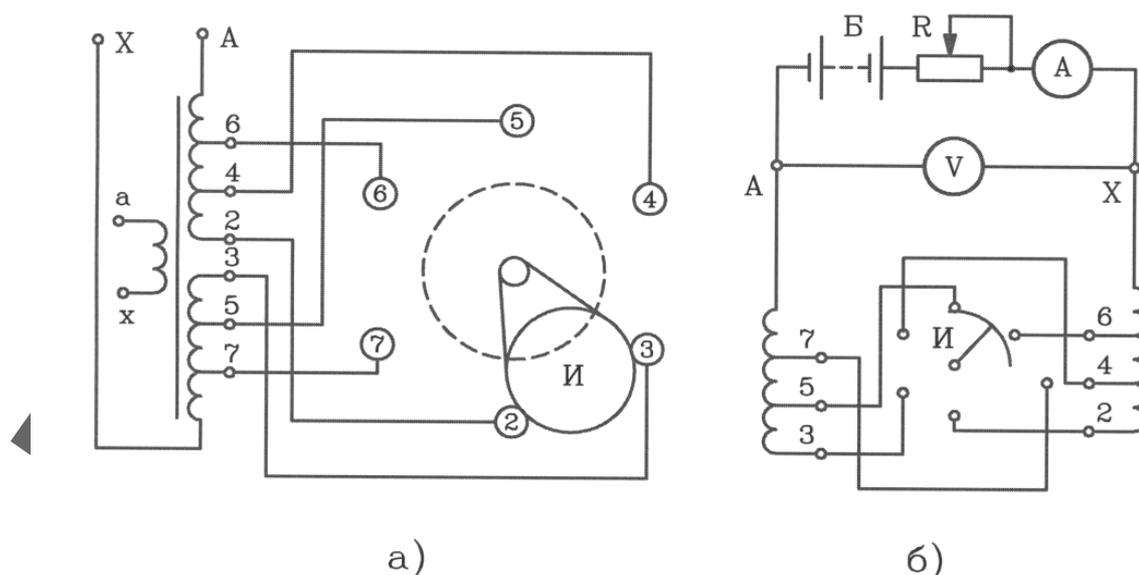


Рисунок 40. Переключающее устройство ПБВ:

а – электрическая схема; б – схема измерения сопротивления постоянному току.

16 РЕАКТОРНЫЕ ПУ

Для проверки последовательности действия контактов всего устройства в сборе (снятие угловой диаграммы) следует снимать зависимости моментов действия контактов от угла поворота выходного вала. Рекомендуется снимать диаграмму при помощи сигнальных ламп.

Если диаграмма снимается по фазам, необходимо обеспечить общую исходную точку. Диаграмму надо снимать при прямом и обратном ходе ПУ. При наличии в ПУ предызбирателя снимать диаграмму необходимо на положениях, при которых он работает.

Перед снятием диаграммы прокрутите ПУ вручную от начального до конечного положения и убедитесь в отсутствии заеданий, несоответствия положений.

Для снятия диаграммы изготовьте шкалу, представляющую собой круг, разбитый на 360° через один градус и стрелку. Закрепите шкалу у наниусной муфты вертикального вала, а на неподвижной части закрепите стрелку, изготовленную из любой проволоки.

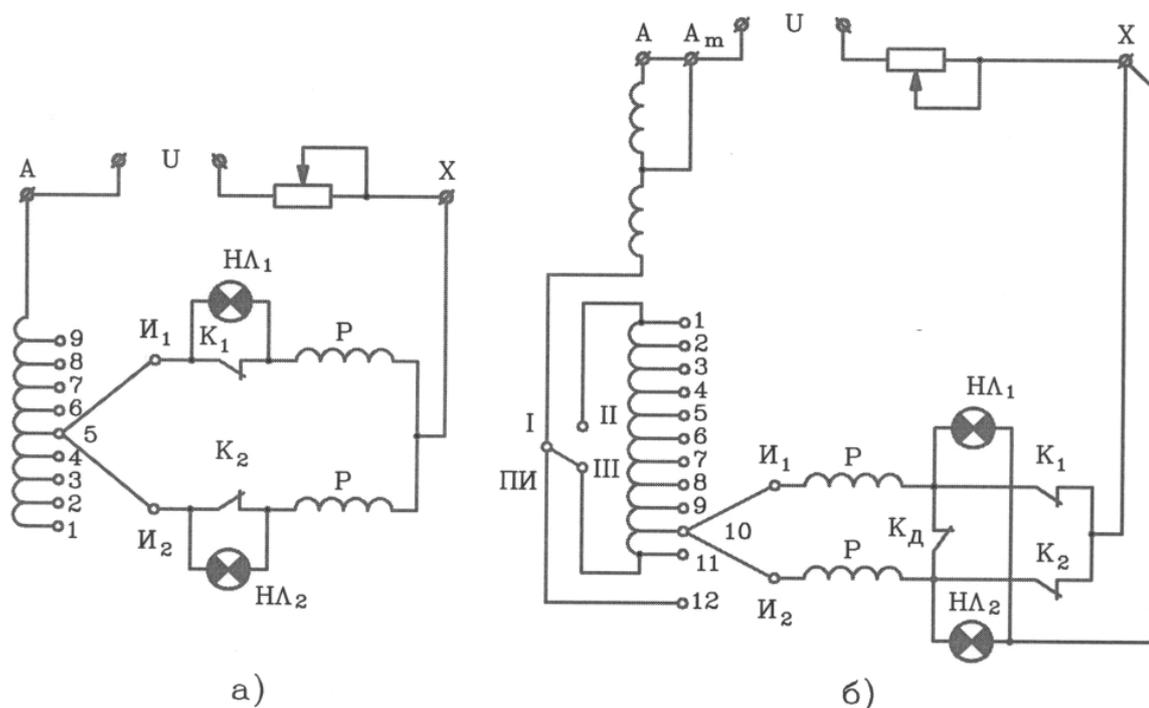


Рисунок 41. Схемы снятия круговой диаграммы переключающих устройств:

а) типа РНТ-13; б) типа РНТ-20; И₁, И₂ – избиратели; К₁, К₂ – контакторы; НЛ₁, НЛ₂ – лампы сигнальные; ПИ – предызбиратель; Р – реактор.

Откройте бак контактора, слейте из него масло чуть ниже контактов контактора и соберите нижеприведенные схемы.

Перед снятием круговой диаграммы ПУ устанавливается в необходимое положение, причем установка производится в направлении снятия диа-

граммы (например, при снятии диаграммы от 5 к 6 положению начинать вращение надо с 4 положения). При достижении 5 положения выбирается люфт (свободное вращение рукоятки), и это будет нулевым положением для прямого и обратного хода. Стрелка устанавливается на нулевом показании шкалы.

Предварительно необходимо подобрать яркость свечения ламп при открытом одном плече контактора.

Для безопасности проведения работ свободная обмотка должна быть закорочена.

Порядок загорания ламп РНТ-13

Таблица 8

Положение контактов	Положение контактов
К ₁ отключается	Лампа НЛ ₁ загорается
И ₁ отключается	Лампа НЛ ₁ гаснет
И ₁ включается	Лампа НЛ ₁ загорается
К ₁ включается	Лампа НЛ ₁ гаснет
К ₂ отключается	Лампа НЛ ₂ загорается
И ₂ отключается	Лампа НЛ ₂ гаснет
И ₂ включается	Лампа НЛ ₂ загорается
К ₂ включается	Лампа НЛ ₂ гаснет

Порядок загорания ламп РНТ-20

Таблица 9

Положение контактов	Положение сигнальных ламп	
	НЛ ₁	НЛ ₂
К _д размыкается	Загорается	Не горит
И ₁ размыкается	Гаснет	---- // ---
И ₁ замыкается	Загорается	---- // ---
К _д замыкается	Гаснет	---- // ---
К _д размыкается	Не горит	Загорается
И ₂ размыкается	---- » ---	Гаснет
И ₂ замыкается	---- » ---	Загорается
К _д замыкается	---- » ---	Гаснет

Типовые круговые диаграммы

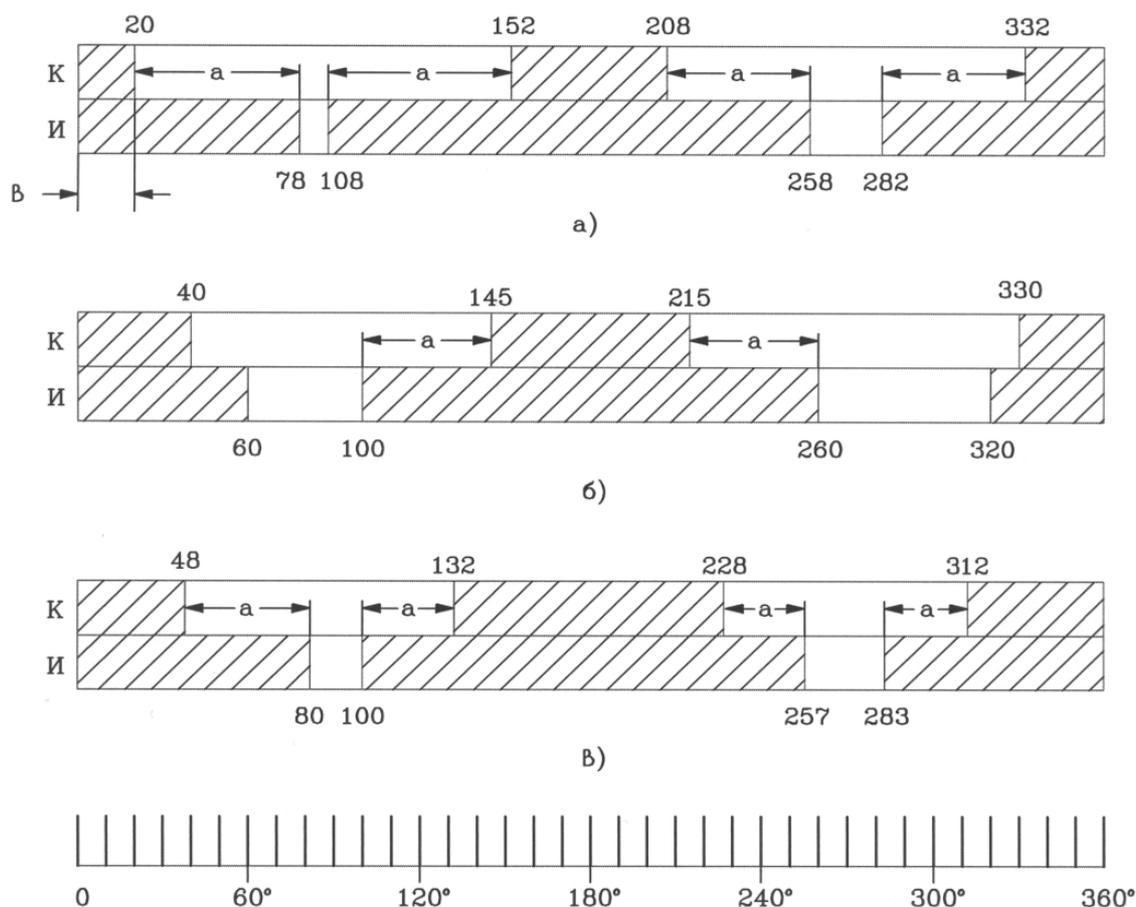


Рисунок 42. Круговые диаграммы переключающих устройств:
 а – типа РНТ-13; б – типа РНТ-18; в – типа РНТ-20; К – контактор; И – избиратель; заштрихованная часть – контакт замкнут; незаштрихованная – контакт разомкнут.

Допустимые углы

Таблица 10

Тип ПУ	а	б
РНТ-13	Более 20° (25°-30°)	Не менее 18°
РНТ-18	15° - 20°	Не менее 20°
РНТ-20	Более 20°	Не менее 41°

Люфт (разница между прямым и обратным ходом) не должен превышать 20°.

Промежуток, выраженный в градусах, поворота выходного вала, в течении которого контактор закрыт, должен быть расположен симметрично относительно промежутка, в течении которого закрыт переключатель.

Круговая диаграмма должна быть целиком симметрична относительно линии 180° .

17 БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ РЕЗИСТОРНЫЕ ПУ

ПУ типа РНОА, ЗРНОА.

Для снятия круговой диаграммы собирается нижеприведенная схема. По шкале лимба отличают значения градусов в момент замыкания и размыкания контактов. Момент срабатывания контактов контактора фиксируется на «слух». Должна быть следующая очередность работы ламп: при замыкании и размыкании контакта И₁ загорается и гаснет лампа Л₁, при работе контактов И₂ загорается и гаснет лампа Л₂.

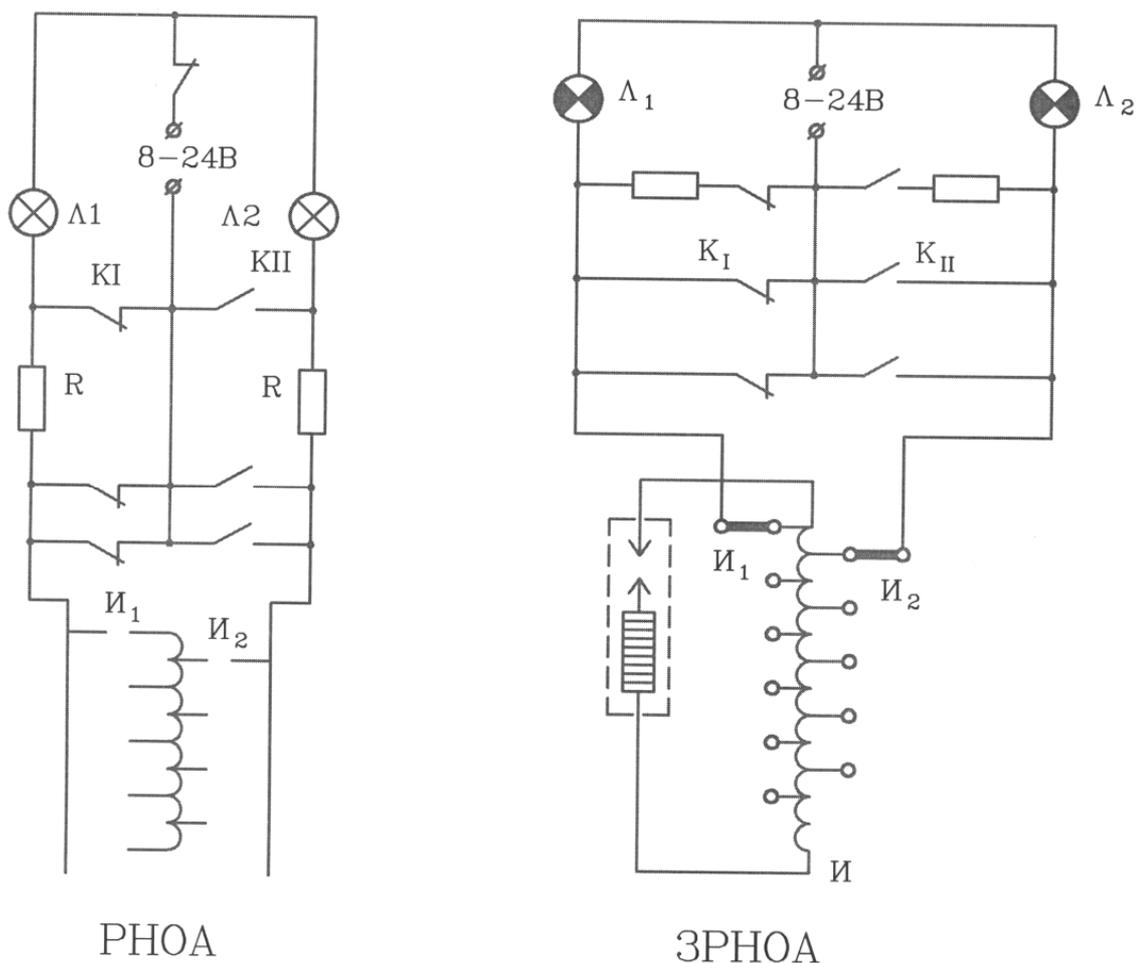
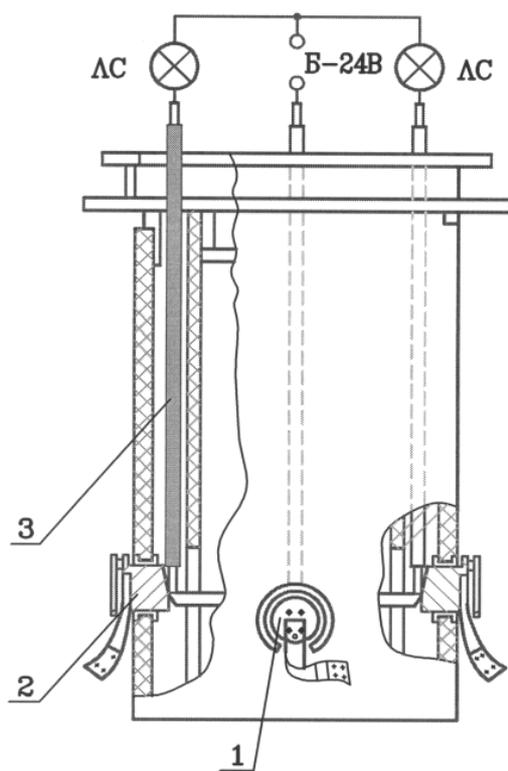
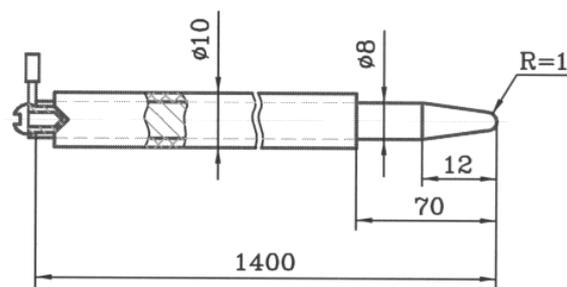


Рисунок 43. Схемы снятия круговых диаграмм

Для подключения схемы в ПУ типа РНОА используется приспособление, приведенное на рисунке 44б.



а)



б)

Рисунок 44. Снятие круговой диаграммы устройства типа РНОА:

а – монтажная схема;

б - контактные щупы;

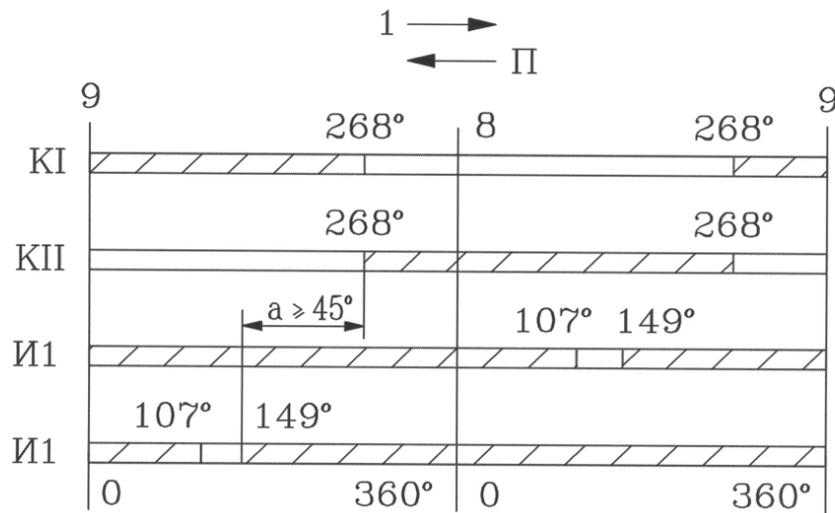
1 – подсоединение к втычному контакту;

2 – втычной контакт; 3 – щуп;

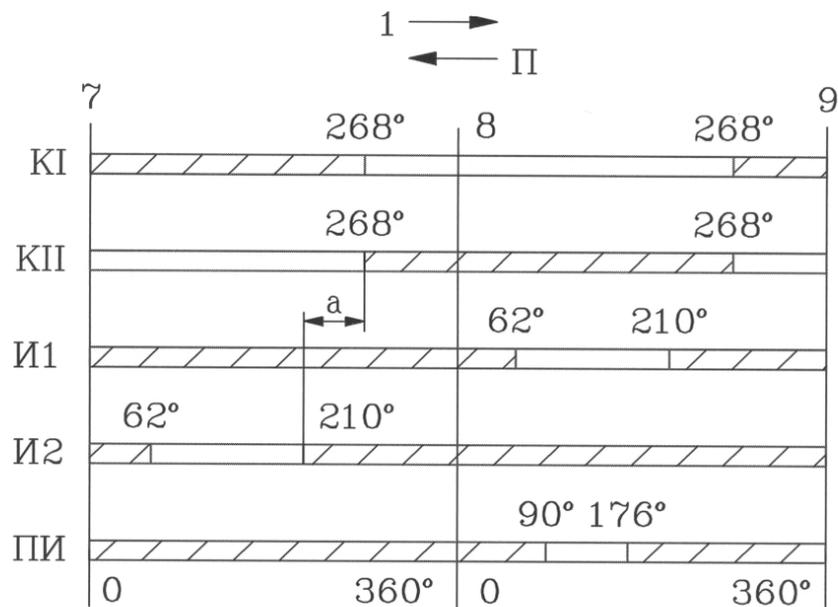
ЛС – сигнальные лампы.

Кафедра

Типовые круговые диаграммы.



а)



б)

Рисунок 45. Круговая диаграмма устройства РНОА-110/1000:
 а – без предызбирателя; б – с предызбирателем; К – контактор;
 И – избиратель; ПИ – предызбиратель.

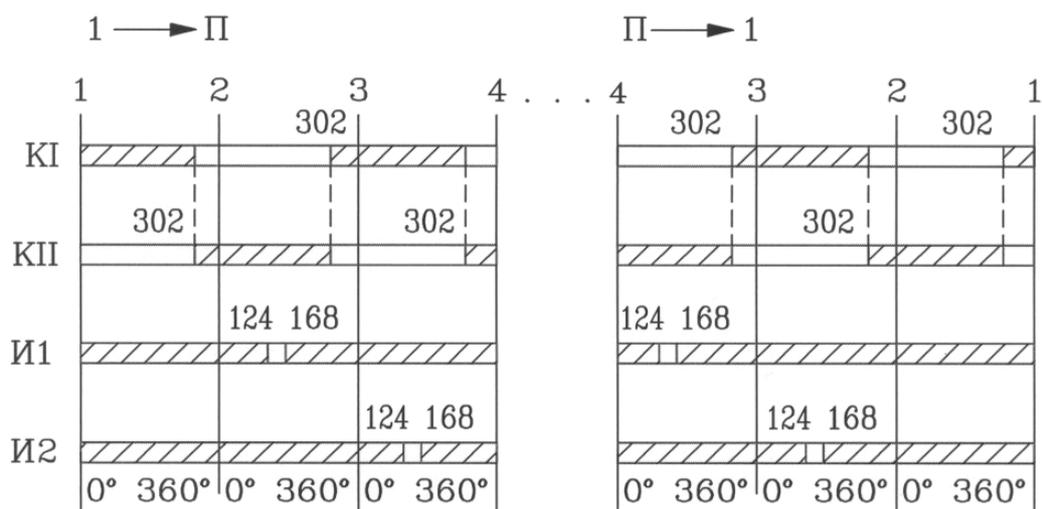


Рисунок 46. Круговая диаграмма переключающего устройства типа ЗРНОА-110/100:

К_I, К_{II} – контакторы; И₁, И₂ – избиратели; заштрихованная часть – контакт замкнут; незаштрихованная часть – контакт разомкнут.

Для РНОА контакты контактора переключаются в диапазоне 255 – 276, контакты избирателя переключаются в диапазоне, ограниченном $\pm 15^\circ$ от типовой диаграммы.

Схемы осциллографирования.

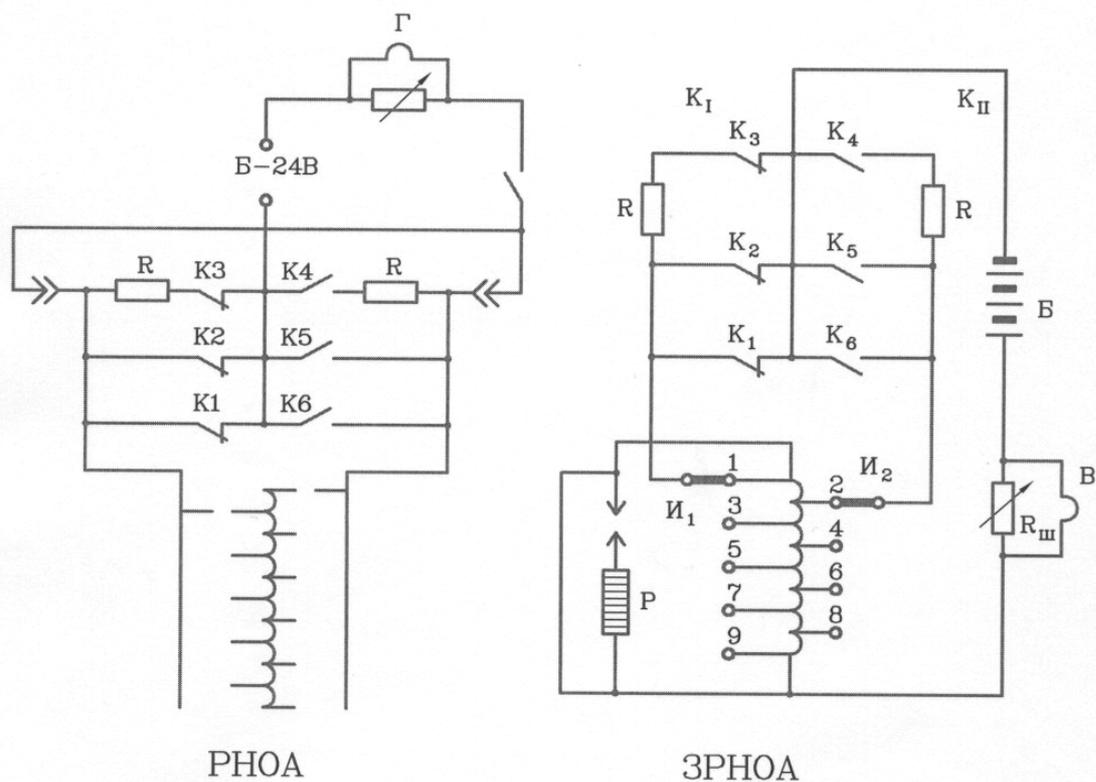


Рисунок 47. Схемы осциллографирования РНОА и ЗРНОА

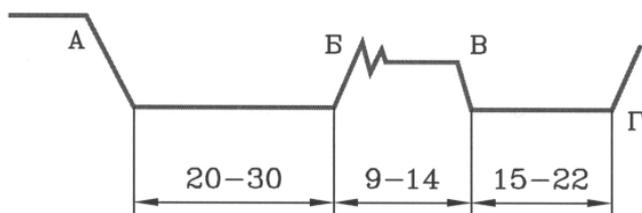


Рисунок 48. Типовая осциллограмма

Время на осциллограмме дано в мс.

Контакты, работающие на замыкание, имеют вибрацию. Допускается следующая вибрация: в начале участка Б В - до 3 мс. На участке В Г - до 2 мс. После точки Г - 4 мс. Осциллограмма снимается при ПУ, заполненном маслом. Данные времена являются суммарными.

ПУ типа РС-3, РС-4, РС-9.

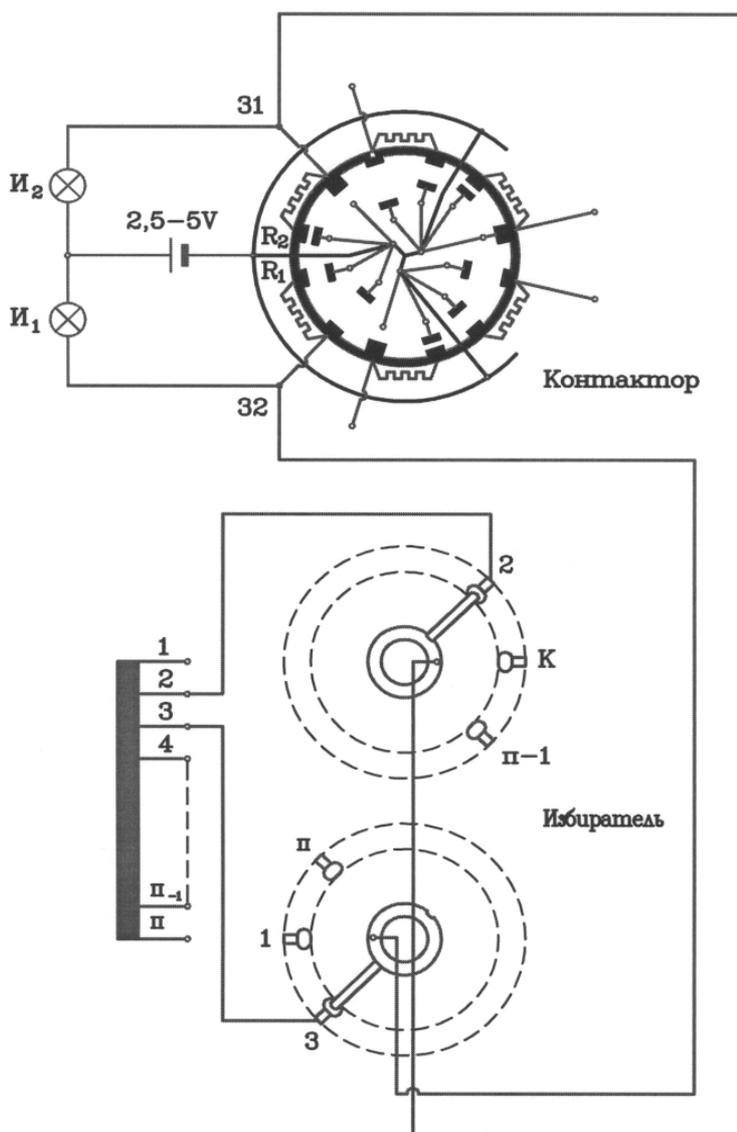


Рисунок 49. Схема снятия круговой диаграммы

Требования к круговой диаграмме.
Обороты выходного вала

Таблица 11

Тип ПУ	До разъединения контактов избирателя	До соединения контактов избирателя	Работа контактора
РС-3	4 – 7	12 -15	25 – 28
РС-4; РС-9	4 – 12	13 – 21	24 - 28

Для подключения к схеме в ПУ типа РС-4 и РС-9 необходимо иметь штангу для подключения к контактам 31 и 32.

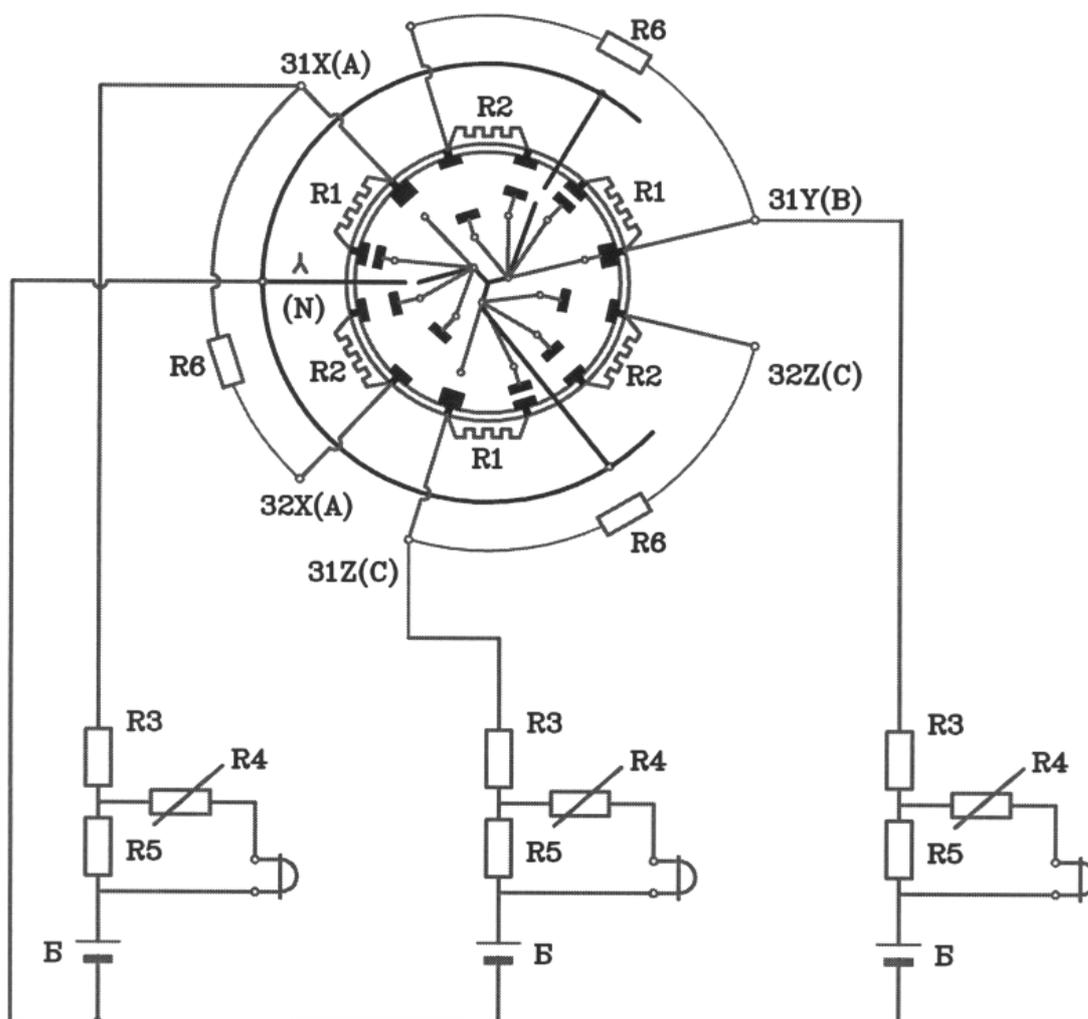


Рисунок 50. Схема осциллографирования работы контактов контактора

Для подключения схемы необходимо прислать масло из контейнера. Осциллограмма снимается при полностью залитом маслом контакторе. ▲

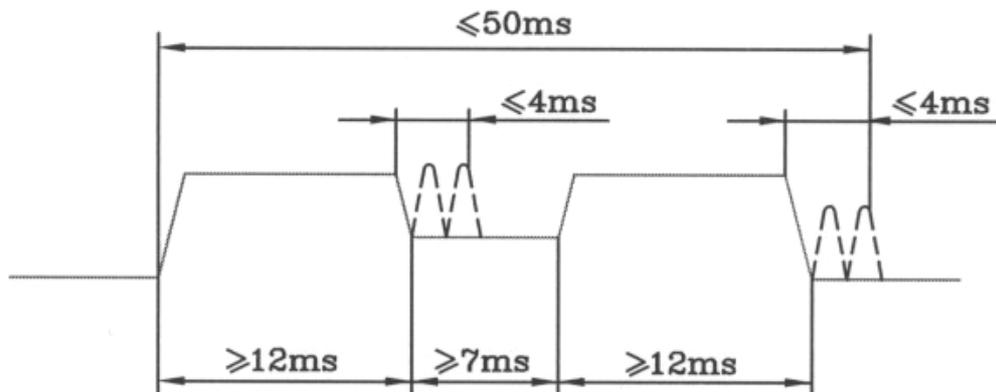
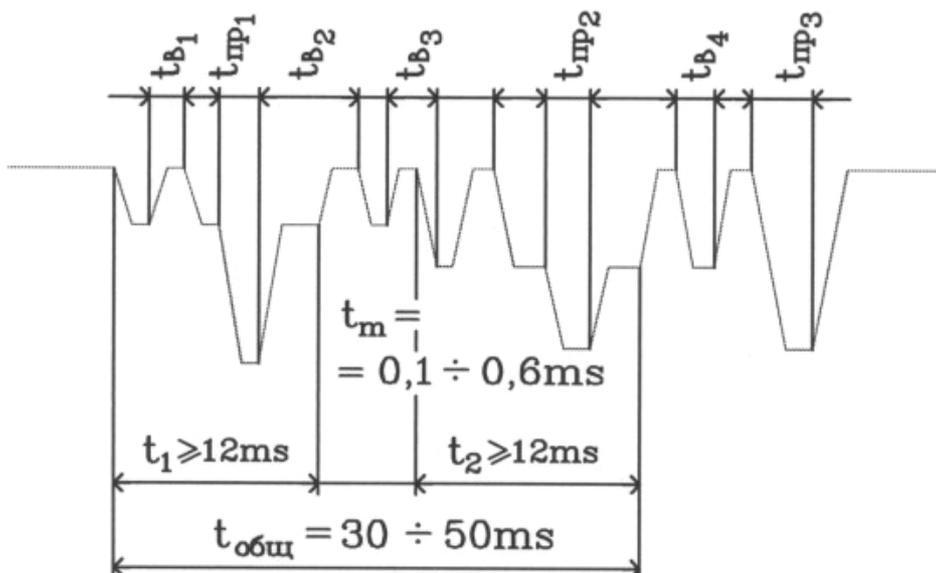


Рисунок 51. Осциллограмма ПУ типа РС-3



$$\begin{aligned} \varepsilon t_{b1} &\leq 4ms & \varepsilon t_{np1} &\leq 4ms \\ \varepsilon t_{b2} &\leq 4ms & \varepsilon t_{np2} &\leq 4ms \\ \varepsilon t_{b2} &\leq 3ms & \varepsilon (t_{b4} + t_{np3}) &\leq 8ms \end{aligned}$$

Рисунок 52. Типовая осциллограмма ПУ РС-4 и РС-9

ПУ типа MR.

Осциллограмма снимается без вскрытия контактора. Напряжение осциллографа подается на нулевой вывод и фазу трансформатора.

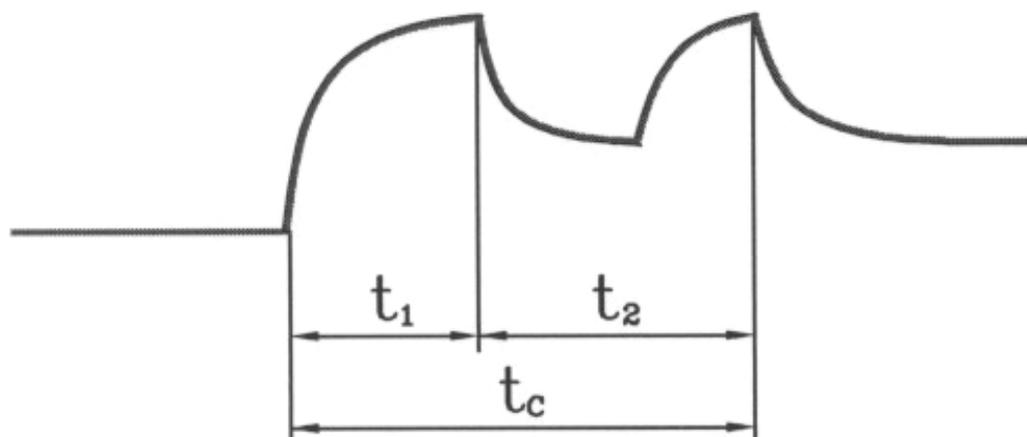


Рисунок 53. Типовая осциллограмма

Таблица требований к осциллограмме

Таблица 12

	t1	t2	tc	Фазная разновременность
MRGIIIY602-60/D-10	24 - 30	8 - 11	58 - 70	<3
MRGIII1601/60/D/0193/2	26 - 37	16 - 12	55 - 65	<2
MRR/110R1/K6-100	12 - 15	9 - 12	32 - 36	<2
MRF-III-1600/30	12 - 18	11 - 17	44 - 50	<2
MR3Xmi-1800	20 - 25	5 - 9	43 - 47	<200
MRM-I-1800-725/B	18 - 20	7 - 9	40 - 50	<100
MRM-I-1500	18 - 23	2 - 5	35 - 50	<200
MR3Xm-i-501	21 - 25	2 - 5	41 - 46	<200
MRMII500-220/D	18 - 20	40 - 44	45 - 50	<60
MR3Xfi1000/60/60	16 - 20	15 - 18	47 - 53	<200
MIII300/200D	17 - 22	1 - 4	37 - 32	<2
MRFIII1000	17 - 20	13 - 17	49 - 50	<2
MRHIII400Y	13 - 15	16 - 17	46 - 47	<2
MRMIII350Y	21 - 23	3 - 4	43 - 44	<2
MRMIII035Y123/B	20 - 25	2 - 5	40 - 60	<2
MRVIII200Y	24 - 26	8 - 11	56 - 59	<2
MRVIII350Y	20 - 25	15 - 20	55 - 60	<2
MRVIII500Y	20 - 25	8 - 10	50 - 60	<2
MRVIII0200Y076	20 - 25	8 - 10	50 - 60	<2

Определение времени вибраций на примере РПН типа ЗРНОА.

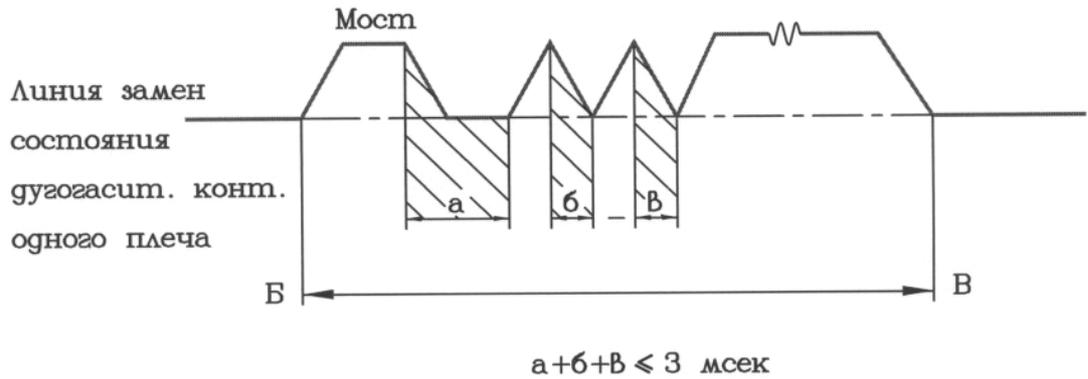


Рисунок 54. Вибрация в положении моста (промежуток БВ)

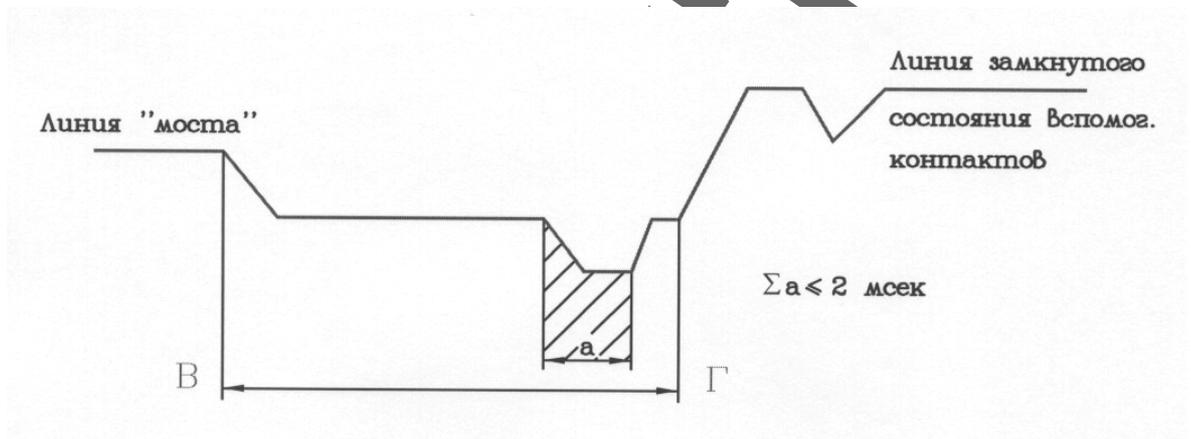


Рисунок 55. Вибрация в промежутке ВГ

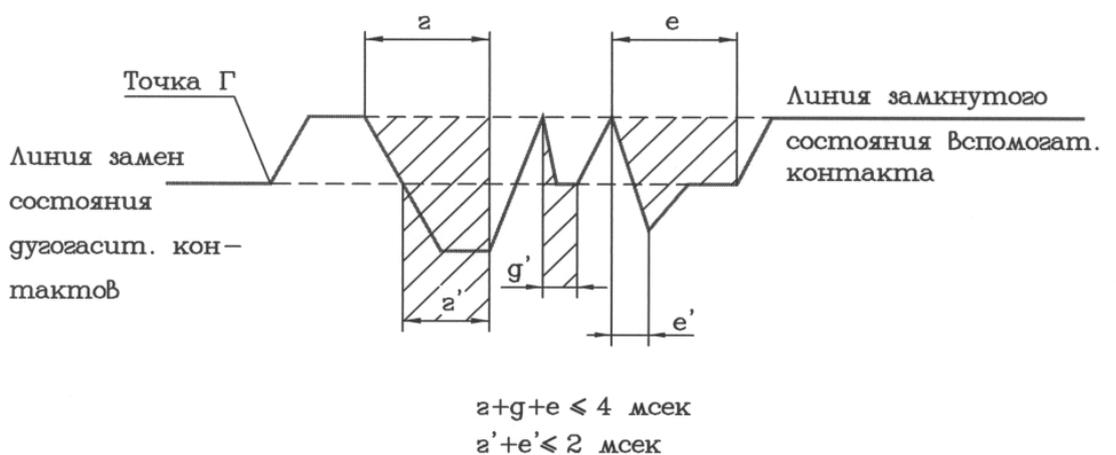


Рисунок 56. Вибрация после замыкания вспомогательного контакта

Определение вибраций (дребезга) контактов на примере РПН типа ЗРНОА.

Особое внимание надо уделять наличию разрывов цепи при производстве переключений. Это может быть следствием повреждения шунтирующих резисторов (определяется при измерении омических сопротивлений), так и нарушения кинематики.

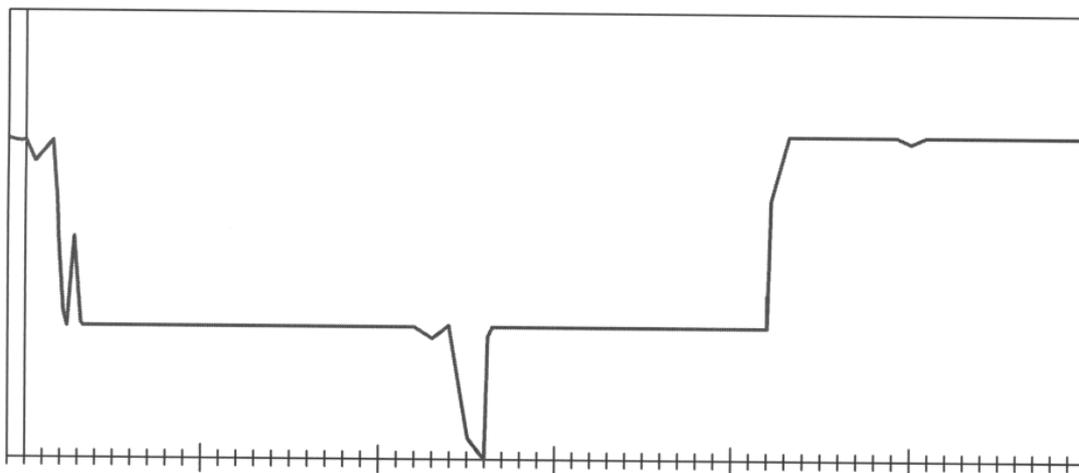


Рисунок 57. Пример работы РПН типа РС-3 с разрывом цепи

Осциллограммы необходимо снимать на прямом и обратном ходу привода РПН.

Кафедра

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы. Минск 2000г.
2. С.А.Божанов, В.Ф. Воскресенский. Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения. Москва 1977г.
3. М.В.Локшин, П.М.Сви. Измерение диэлектрических потерь высоковольтной изоляции.
4. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Выпуск 20. Труды Петербургского энергетического института повышения квалификации . Санкт Петербург 2002г.
5. Современные методы и средства оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации высоковольтного оборудования энергосистем. Материалы второго научно-технического семинара. Москва 2001г.
6. Серия «Трансформаторы». Тома 8; 9; 20; 25; 38.
7. И.А. Якобсон. Наладка быстродействующих переключающих устройств силовых трансформаторов.
8. Б.В. Ванин, Ю.Н.Львов. Показатели состояния изоляции для оценки возникновения внутренних коротких замыканий в силовых трансформаторах. Журнал Электрические станции №2 2003г.
9. М.Ю.Львов, Ю.Н.Львов. О надежности силовых трансформаторов электрических сетей.