

2.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Установка для измерения характеристик изоляции электрооборудования в общем случае состоит из средства измерения (измерительного устройства), источника измерительного (испытательного) напряжения и шин (проводов), соединяющих их с объектом контроля.

Источник напряжения может быть конструктивно объединен со средством измерения. При высоком напряжении или при большой мощности источника целесообразна раздельная компоновка элементов измерительной установки. В случае контроля оборудования без вывода из эксплуатации измерительным напряжением является рабочее напряжение на объекте. Схемы измерений при рабочем напряжении будут рассмотрены в следующей главе.

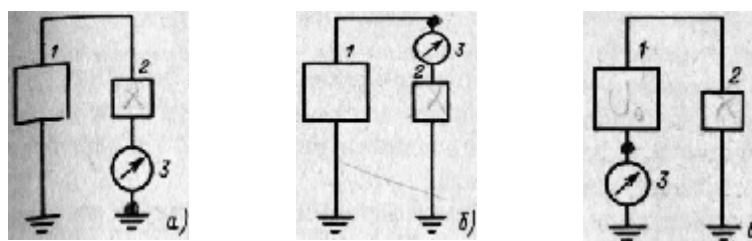


Рис. 2.. Схемы измерительных установок:

а — прямая; б — перевернутая; в — обратная; 1 — источник напряжения; 2 — объект контроля; 3 — средство измерений

По месту средства измерения (СИ) в цепи измерительной установки различают прямую, перевернутую и обратную схемы включения (рис. 2.7).

Прямой схемой включения называется схема, в которой СИ расположено между низкопотенциальным выводом изоляции объекта и заземлением. В этой схеме СИ находится под небольшим потенциалом относительно земли. Прямая схема включения обладает наибольшей помехозащищенностью и применяется во всех случаях, когда имеется возможность доступа к обоим выводам объекта (при контроле оборудования, имеющего специальные измерительные выводы, в лабораторных условиях и т. п.).

Перевернутой называется схема, в которой СИ включено в цепь высокого напряжения между источником и объектом. Эта схема позволяет производить измерения на объектах, у которых один из выводов не может быть отключен от заземления. Недостатком перевернутой схемы является то, что СИ находится под высоким напряжением относительно земли. Это усложняет его конструкцию и затрудняет производство измерений.

Обратная схема отличается тем, что СИ включается в цепь заземления источника напряжения. Обратная схема включения, как и перевернутая, позволяет производить измерения на объектах с одним заземленным выводом. Однако конструкция измерительной установки в этом случае существенно усложняется. Широкого распространения обратная схема не получила.

Характеристики элементов измерительной установки определяются исходя из решаемых ею задач. Применяются источники напряжения постоянного или переменного тока и соответствующие контролируемым параметрам средства измерений.

Рассмотрим схемы измерений, наиболее часто применяемые в практике эксплуатационного контроля изоляции электрооборудования.

Измерение сопротивления изоляции

Сопротивление изоляции определяется по значению тока через нее при приложении постоянного напряжения. При напряжениях до нескольких киловольт применяются мегаомметры. При более высоких напряжениях используются источники выпрямленного напряжения и измеряется ток проводимости.

Мегаомметр (рис. 2.8) состоит из источника напряжения постоянного тока U , образцового резистора R_0 и вольтметра V , измеряющего падение напряжения U_0 на нем от тока I_x через изоляцию объекта. Объект с сопротивлением изоляции R_x и емкостью C_x присоединяется к зажимам "r_x" и "-" - мегаомметра. Зажим "Э" предназначен для присоединения цепей экранирования (их сопротивление обозначено резистором R_{II}). Схемы включения мегаомметра - прямая и перевернутая (соответственно заземляются выводы "Э" или "-" -).

Для исключения необходимости в измерении напряжения на объекте используется стабилизированный источник напряжения или же мегаомметр калибруется перед применением (путем регулировки напряжения источника или чувствительности вольтметра). Иногда применяются специальные приборы - логометры, показания которых пропорциональны отношению U/I_x , что исключает необходимость в калибровке.

Измеряется напряжение $U_0 = R_0 (U - U_0) / R_x \approx R_0 U / R_x = k_{III} / R_x$ (так как $U_0 \ll U$). Шкала прибора градуируется в значениях сопротивления R_x . Для изменения пределов измерения служит резистор R_0 (множитель шкалы $k_{III} = R_0 U$).

Шкала мегаомметра зависит от характеристик измерительного преобразователя и показывающего прибора, входящих в вольтметр, измеряющий напряжение U_0 . При линейном образовании показание прибора $\alpha = k'_{III} / R_x$; шкала R_x прибора — гиперболическая. Такая шкала неудобна для отсчета показаний и имеет сравнительно малый диапазон значений измеряемой величины. Более удобна логарифмическая шкала: $\alpha = \log U_0 = \log k'_{III} - \log R_x$. В этом случае диапазон значений измеряемой величины может охватывать несколько порядков.

Одним из основных диагностических показателей при контроле электрооборудования по сопротивлению изоляции является его изменение. Поэтому точность контроля определяется относительной погрешностью измерения.

Относительная погрешность измерения при линейном преобразовании $\Delta R_x / R_x = - \Delta \alpha / \alpha$, а при логарифмическом преобразовании $\Delta R_x / R_x = - \Delta \alpha$. При стрелочном показывающем приборе, у которого относительная погрешность зависит от значения измеряемой величины, точность измерения в начале шкалы прибора очень мала. Следовательно, при линейном преобразовании в случае измерения значений R_x , близких к предельным на данной шкале, будет получена большая относительная погрешность. При логарифмическом преобразовании относительная погрешность измерения от значения R_x не зависит.

В ряде конструкций мегаомметров последовательно с образцовым резистором R_0 включают ограничивающий резистор $R_{ог}$, защищающий источник напряжения от перегрузки. Это создает высокое выходное сопротивление мегаомметра, что является причиной пониженного по сравнению с номинальным значения напряжения на объекте (рис. 2.9).

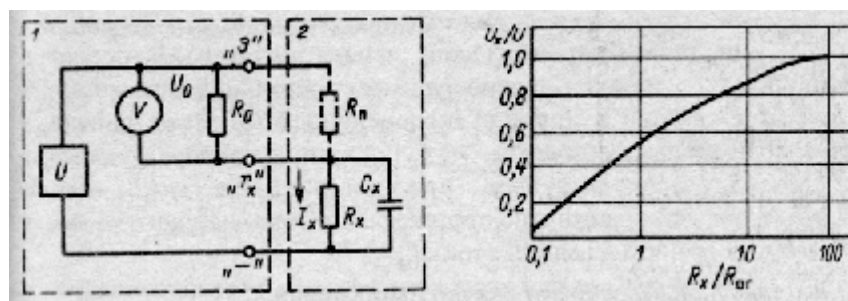


Рис. 2.8. Схема измерения мегаомметром: 1- мегаомметр; 2 — объект контроля

Рис. 2.9. Зависимость напряжения на объекте от его сопротивления

Высокое выходное сопротивление мегаомметра может внести погрешности в результаты измерения коэффициента абсорбции (отношения R_{60} / R_{15}). В начале измерения, когда токи абсорбции еще велики, эквивалентное сопротивление объекта мало. При этом напряжение на объекте будет ниже нормированного. С ростом этого сопротивления напряжение на объекте увеличивается, что приводит к дополнительному заряду абсорбционной емкости и последующему изменению сопротивления. Как следствие, результаты измерений мегаомметрами, имеющими разное выходное сопротивление, не совпадут.

Возможности снижения напряжения на объекте следует учитывать также и в случае, когда производится испытание изоляции приложенным напряжением, источником которого является мегаомметр.

Еще одна погрешность измерения сопротивления изоляции, определяемая абсорбционными процессами, может возникнуть из-за остаточного заряда емкости объекта. Поэтому перед повторным измерением сопротивления изоляции необходимо не менее чем на 5 мин соединить выводы объекта, создав путь для стекания абсорбированного заряда.

В мегаомметрах без стабилизации выходного напряжения (например, со встроенным генератором) возможно протекание зарядных токов емкости объекта, искажающих результаты измерений. Эти токи возникают при изменении напряжения.

При мгновенном увеличении напряжения на объекте через резистор R_0 (см. рис. 2.8) будет протекать импульс зарядного тока емкости $I_{зар} = I_M e^{-t/\tau}$, где $I_M = \Delta U / R_0$, ΔU — амплитуда скачка напряжения, а $\tau = C_x R_0$ — постоянная времени цепи заряда (влиянием R_x пренебрегаем). Отсчетное устройство прибора имеет постоянную времени установления показаний τ (принят экспоненциальный закон движения стрелки). Поскольку обычно $\tau_y \gg \tau$, показания прибора будут пропорциональны заряду импульса. При этом $I_{эк} = I_M \tau / \tau_y$, где $I_{эк}$ — эквивалентное значение длительно протекающего тока, дающего то же показание прибора, что и импульс тока I_M .

Погрешность измерения от скачка напряжения:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{I_{эк}}{I_x} = \frac{\tau I_M}{\tau_y I_x} = \frac{\tau_x}{\tau_y} \frac{\Delta U}{U},$$

где $\tau_x = C_x R_x$.

При контроле объектов с большой емкостью, когда τ_x — десятки секунд, а τ_y — секунды, погрешность может быть недопустимой.

Не все типы выпускаемых мегаомметров имеют достаточную защиту от токов промышленной частоты, стекающих с объекта (токов влияния). При этом появляется погрешность из-за нелинейности или перегрузки измерительных элементов. Уменьшение указанной погрешности в условиях эксплуатации достигается только путем снижения уровня помех.

Измерение абсорбционных характеристик

Измерение производится при приложении к изоляции напряжения постоянного тока. Измеряются ток абсорбции или значение заряда абсорбционной емкости.

Схема измерения тока абсорбции (рис. 2.10, а) содержит источник постоянного напряжения, коммутатор и измерительный прибор. Заряженная источником емкость объекта коммутатором SA включается на вход прибора, который в заданные моменты времени измеряет падение напряжения на сопротивлении резистора R_0 . При малом значении этого сопротивления измеряемое напряжение будет пропорционально току абсорбции. Кроме того, в момент начала разряда определяется значение заряда q_6 геометрической емкости объекта.

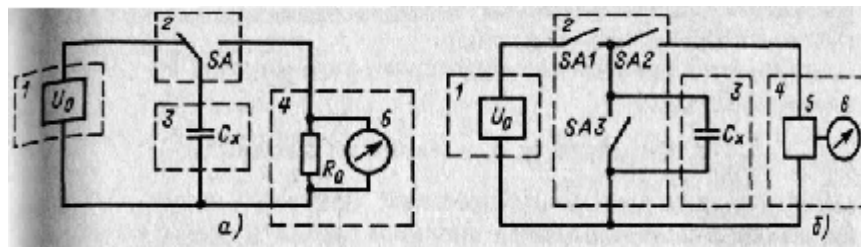


Рис 2.10. Схемы измерения абсорбционных характеристик изоляции:

а — измерение тока абсорбции; б — измерение абсорбционной составляющей емкости; 1 — источник напряжения; 2 — коммутатор; 3 — объект контроля; 4 — измерительный прибор; 5 — интегратор; 6 — показывающий прибор

Для определения коэффициента состояния измеряются значения тока через 0,06 и 0,1 с после переключения коммутатора SA ($i_{0,06}$ и $i_{0,1}$).

Значение коэффициента состояния рассчитывается по формуле

$$K_c = \frac{\Delta i}{\Delta t q_5} = \frac{i_{0,06} - i_{0,1}}{0,04 q_5}$$

Для определения абсорбционной емкости измеряется соответствующий ей заряд, причем измерение (интегрирование тока абсорбции) производится в течение заданных промежутков времени.

Схема измерений (рис. 2.10, б) содержит источник постоянного напряжения, коммутатор и измерительный прибор. Измерение производится при циклах заряда и разряда емкости объекта. Определяемые параметры - отношение абсорбционной составляющей емкости изоляции к геометрической.

При замкнутом контакте переключателя SA1 производится заряд емкости объекта. После отключения SA1 кратковременным замыканием контакта SA2 объект разряжается на интегратор; показания индикатора при этом будут соответствовать геометрической емкости изоляции. Если после заряда объект кратковременно замкнет контактом SA3, а затем замкнет контакт SA2, то показания индикатора будут соответствовать абсорбционной емкости изоляции.

Приборами, получившими наибольшее распространение, определяются значения $\Delta C / C_{50}$ и $(C_2 - C_{50}) / C_{50}$, где ΔC - абсорбционная емкость, C_{50} - геометрическая емкость (соответствует значению, измеренному при 50 Гц), C_2 - часть абсорбционной емкости (соответствует значению, измеренному при 2 Гц).

Условия измерения: Определяемый параметр	Условия измерения:		
	C_{50}	$C_2 - C_{50}$	ΔC
Время интегрирования, мс	10	250	$2 \cdot 10^3$
Предварительный разряд геометрической емкости	Нет	Есть	Есть

Дисперсия определяется путем заряда емкости объекта прямоугольным импульсом напряжения U_0 длительностью τ_1 и измерения напряжения на нем U_B через интервал $\tau_2 \gg \tau_1$ когда введенный заряд U_0 распределится между геометрической C_6 и абсорбционной C_M составляющими емкости изоляции. Учитывая, что $q_0 = C_6 U_0 = (C_6 + C_M) U_B$, получим $D = C_6 / C_M = U_B / (U_0 - U_B)$.

Применяются приборы со следующими параметрами: $U_0 = 30$ В; $\tau_1 = 3$ мс; $\tau = 300$ мс.

Измерение tg δ и емкости изоляции

Наиболее широкое распространение получила схема с мостом Шеринга. Используются также различные варианты схем с компаратором тока, с ваттметром или векторметром.

Мостовая схема (рис. 2.11) состоит из контролируемого объекта параметрами C_x и tg δ
 П. М. Сви «Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения» - М.: Энергоатомиздат, 1992

(плечо Z_1), образцового конденсатора C_0 (плечо Z_2) и цепей уравнивания [плечи Z_3 , Z_4 и указатель равновесия (УР)]. Измерительным элементом схемы (первичным преобразователем), через который протекает ток объекта, является плечо Z_3 (резистор R_3).

Мост может использоваться при прямой, перевернутой и обратной схемах включения. При прямой схеме заземляется точка 2 моста; при перевернутой схеме - точка 1, а при обратной - точка 3. Обратная схема включения иногда называется схемой с заземленной диагональю.

Особенностью рассматриваемой схемы является то, что сопротивление плеч Z_1 и Z_2 во много раз превышает сопротивление плеч Z_3 и Z_4 . Поэтому с достаточной для практических целей точностью можно считать, что токи в плечах Z_3 и Z_4 зависят только от параметров объекта и образцового конденсатора. Рассмотрение процесса уравнивания моста целесообразно провести, предположив, что сопротивление указателя равновесия велико и разность потенциалов между точками 3 и 4 схемы определяется лишь параметрами плеч Z_3 и Z_4 моста.

Ток I_0 образцового конденсатора, не имеющего потерь, опережает приложенное напряжение U точно на 90° (рис. 2.12). Ток I_x опережает напряжение на меньший угол. Разность фаз этих токов - угол δ , тангенс которого и следует определить. Уравнивание моста заключается в изменении значений параметров плеч Z_3 и Z_4 с целью создания равенства падений напряжения на них. В начале уравнивания $C_4 = 0$ и напряжение U_4' на плече Z_4 совпадает по фазе с током I_0 (рис. 2.12, а, точка а). Изменяя значение R_3 и тем самым изменяя по модулю напряжение U_3 , добиваются минимального значения напряжения в диагонали $U_{Д'} = U_4' - U_3'$ (точка б). Очевидно, что это будет в случае, когда вектор $U_{Д'}$ станет перпендикулярным вектору U_4' . На втором этапе уравнивания, изменяя значение C_4 , изменяют фазу напряжения U_4 до получения минимального значения напряжения в диагонали. При этом конец вектора U_4 будет перемещаться по кривой ac . Второй этап уравнивания закончится по совпадении фаз напряжений U_4' и U_3' . При этом напряжение на диагонали равно $U_{Д''}$. Остается, вновь изменяя R_3 , свести его к нулю (рис. 2.12,5).

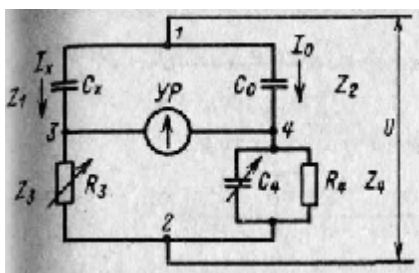


Рис. 2.11. Схема моста Шеринга

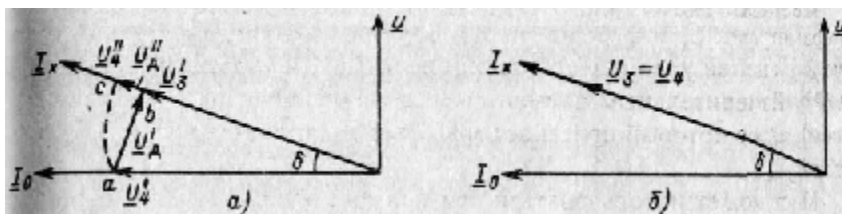


Рис. 2.12. Векторные диаграммы токов и напряжений в мостовой схеме: а - процесс уравнивания моста; б - токи и напряжения уравновешенного моста

Обычно сопротивление указателя равновесия невелико и ток, проходящий в диагонали, несколько изменяет потенциалы точек 3 и 4 моста. Кроме того, начальные циклы уравнивания проводятся при малой чувствительности указателя. Поэтому полное уравнивание моста потребует еще нескольких циклов, последовательно приближающих мост к равновесию.

При равновесии моста выполняется условие $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$. В рассматриваемой схеме определяются параметры последовательной схемы замещения объекта, поэтому

$$Z_1 = r + \frac{1}{j \omega C_x}, \text{ а } \operatorname{tg} \delta = \omega r C_x$$

Параметры остальных плеч моста:

$$Z_2 = \frac{1}{j \omega C_0}; Z_3 = R_3; Z_4 = \frac{R_4}{1 + j \omega C_4 R_4}$$

Подставив полученные данные в уравнение равновесия моста и выделив действительную и мнимую части, получим

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4; \tag{2.5}$$

$$C_x = C_0 R_0 / R_3. \tag{2.6}$$

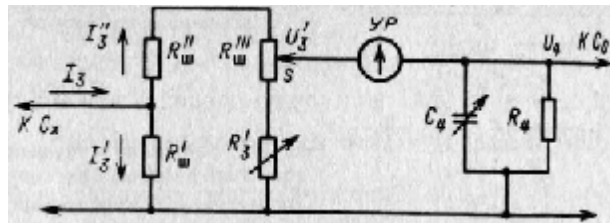


Рис. 2.13. Схема включения шунта плеча Z_3 моста

Для упрощения расчетов сопротивление R_4 выбирается равным $10^n / \pi$, где n — целое число. Тогда при промышленной частоте $\omega = 2 \pi f = 100 \pi$ и $\operatorname{tg} \delta = 10^{n+2} C_4$. Если значение C_4 выразить в микрофарадах, то значение измеренного $\operatorname{tg} \delta$ определится следующими соотношениями:

$R_4, \text{ Ом}$	$100/\pi$	$1000/\pi$	$10\,000/\pi$
$\operatorname{tg} \delta$	$0,01 C_4$	$0,1 C_4$	C_4
$\operatorname{tg} \delta, \%$	C_4	$10 C_4$	$100 C_4$

Для расширения пределов измерения емкости в плечо Z_3 мост вводится шунт (рис. 2.13). Часть шунта R'_3 включается в цепь тока объекта. Остальная часть шунта вместе с резистором R'_3 создает делитель напряжения, обеспечивающий уравнивание схемы (изменение напряжения U'_3). Плавное уравнивание обеспечивается реохордом R''_3 , часть которого s включается в плечо R_3 .

Из равенства напряжений плеч U'_3 и U'_4 , следует

$$\left. \begin{aligned} C_x &= C_0 \frac{R_4}{R'_3} \left(\frac{R_{ш} - s}{R_3} + 1 \right); \\ \operatorname{tg} \delta &= \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_0 \left(\frac{R_{ш} - s - R'_3}{R_3} \right), \end{aligned} \right\} \tag{2.7}$$

где $R_{ш} = R'_3 + R''_3 + R'''_3 - s$, а $R_3 = R'_3 + s$.

Поскольку $C_4 \gg C_0$ и, как правило, $R_3 > R_{ш}$, с достаточной для практики точностью можно и при наличии шунта рассчитывать $\operatorname{tg} \delta$ по формуле (2.5).

Сопротивление шунта R'_3 выбирают так, чтобы уравнивание моста производилось не менее чем тремя декадами магазина сопротивлений R_3 .

При наличии помех (тока влияний) возможны случаи, когда ток I_0 отстает по фазе от тока, протекающего по плечу Z_3 моста и являющегося суммой тока I_x и тока влияния. В этих случаях для измерения так называемого отрицательного $\operatorname{tg} \delta$ конденсатор C_4 приходится включать параллельно резистору R_3 . При этом

$$\operatorname{tg} \delta_{(-)} = - \operatorname{tg} \delta = - \omega C_4 R_3. \tag{2.8}$$

Если шкала магазина C_4 моста отградуирована в значениях тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{шк}$, то

$$\operatorname{tg} \delta_{(-)} = - \operatorname{tg} \delta_{\text{инк}} \frac{R_3}{R_4} = - \operatorname{tg} \delta_{\text{инк}} \frac{C_0}{C_x}$$

При включенном шунте плеча Z_3 моста

$$\operatorname{tg} \delta_{(-)} = - \omega C_4 R_3 \frac{R_{\text{ш}} - s}{R_3 + R_{\text{ш}} - s} \approx - \omega C_4 R_3 \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_3} \quad (2.9)$$

Чувствительность мостовой схемы определяет наименьшие выявляемые значения изменений измеряемых параметров. Из (2.5) и (2.6) следует

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \omega R_4 \Delta C_4; \quad \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\Delta C_4}{C_4} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta R_3}{R_3}$$

Приведенные соотношения указывают на достаточно простой способ определения чувствительности моста при измерениях. Для этого после уравнивания схемы следует изменить по очереди значения C_4 и R_3 до появления отчетливых показаний указателя равновесия. Полученные значения ΔC_4 и ΔR_3 определяют реальную чувствительность.

При избыточной чувствительности указателя равновесия, усложняющей уравнивание схемы, можно, определив указанным способом, что точность измерения достаточна, не добиваться равновесия моста при наибольшей чувствительности указателя.

При рассмотрении процесса уравнивания принималось, что в момент равновесия схемы напряжение $U_{\text{д}}$ в диагонали моста равно нулю. Реальные указатели равновесия имеют ограниченную чувствительность, т. е. всегда есть такие напряжение $\Delta U_{\text{д}}$ или ток $\Delta I_{\text{д}}$, которые не могут быть обнаружены прибором (напряжение или ток нечувствительности указателя равновесия).

В случае небаланса по фазе (рис. 2.14, а)

$$\Delta \operatorname{tg} \delta \approx \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U_4} = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U} \frac{1}{\omega C_1 R_4} \quad (2.10)$$

При небалансе по напряжению (рис. 2.14, б)

$$\Delta R_3 = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{I_3} \approx \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U} \frac{1}{\omega C_x}$$

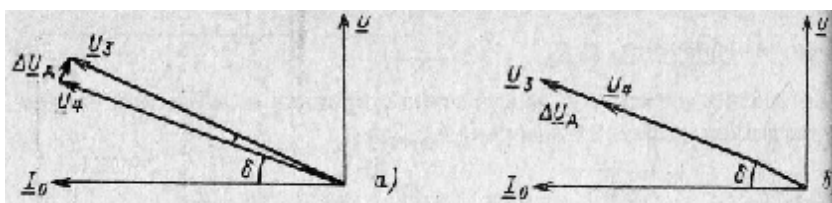


Рис. 2.14. К расчету погрешностей из-за нечувствительности указателя равновесия: а — мост не уравновешен по фазе; б — мост не уравновешен по напряжению

Погрешность в определении R_3 вызовет погрешность расчета C_x . Поскольку $\Delta C_x / C_x = \Delta R_3 / R_3$, то

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U} \frac{1}{\omega C_x R_3} = \frac{\Delta U_{\text{д}}}{U} \frac{1}{\omega C_0 R_4} \quad (2.11)$$

Из сравнения (2.10) и (2.11) следует, что $\Delta \operatorname{tg} \delta = \Delta C_x / C_x$, т. е. абсолютная погрешность определения $\operatorname{tg} \delta$ равна относительной погрешности определения C_x .

Обычно указатели равновесия имеют низкое входное сопротивление и нормируется ток нечувствительности $\Delta I_{\text{д}}$. Напряжение небаланса

$$\Delta U_{\text{д}} = \Delta I_{\text{д}} (Z_3 + Z_4 + Z_{\text{ш}}) \approx \Delta I_{\text{д}} (R_3 + R_4 + R_{\text{ш}}),$$

где $R_{\text{ш}}$ — сопротивление указателя равновесия.

С учетом этого формула для определения погрешности измерения примет вид

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta I_{\text{д}}}{U} \frac{R_3 + R_4 + R_{\text{ш}}}{\omega C_0 R_4}$$

Для того чтобы чувствительность моста мало менялась при изменении R_4 , необходимо иметь $R_{\text{ш}} \ll R_4$.

Обычно так и бывает. Это обеспечивает возможность изменения шкал $\operatorname{tg} \delta$ моста путем изменения значения R_4 .

Схемы с компаратором тока - трансформатором с тесной индуктивной связью между обмотками - обеспечивают высокую точность сравнения токов объекта и образцового конденсатора и имеют повышенную чувствительность и помехоустойчивость.

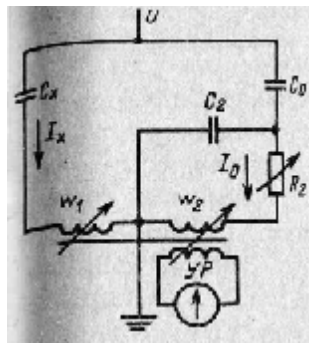


Рис. 2.15. Схема моста с компаратором тока

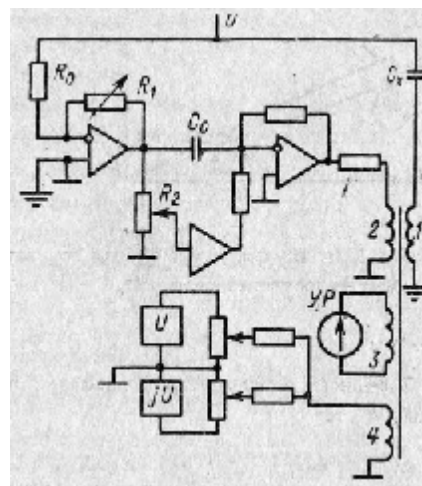


Рис 2.16. Схема моста с операционными усилителями в ветви сравнения

Мост с компаратором тока (рис. 2.15) уравнивается путем изменения числа витков в обмотках [8]. При балансе схемы поток в магнитопроводе трансформатора равен нулю и показания указателя равновесия отсутствуют. При этом $w_1 I_x = w_2 I_0$, откуда

$$C_x = \frac{w_2}{w_1} C_0 \text{ и } \operatorname{tg} \delta = \omega C_0 R_2.$$

С целью упрощения конструкции компаратора цепи уравнивания могут быть выполнены с использованием операционных усилителей (рис. 2.16).

Ток I_x через обмотку 1 компаратора компенсируется током образцового конденсатора I_0 , протекающим по обмотке 2. Баланс схемы фиксируется указателем равновесия по отсутствию напряжения в обмотке 3. Уравнивание токов производится активным делителем R_1 (уравнивание по модулю) и резистором R_2 (баланс по фазе). Применен образцовый конденсатор C_0 на низкое напряжение, а в цепи высокого напряжения включен резистор R_0 . Предусмотрена возможность компенсации помех током в обмотке 4, полученным от двух источников напряжения U и jU .

Ваттметровая схема измерений (рис. 2.17) состоит из ваттметра, амперметра и вольтметра. Значения измеренных параметров определяются по показаниям этих приборов по формулам

$$\operatorname{tg} \delta \approx \cos \varphi = \frac{P}{U_0 I_x} \text{ и } C_x = \frac{I_x}{\omega U},$$

где P - показания ваттметра; I_x - ток через объект измерения; U_0 - напряжение, приведенное к ваттметру.

В диапазоне углов δ до 15° ($\operatorname{tg} \delta < 0,25$) значения $\cos \varphi$ и $\operatorname{tg} \delta$ совпадают с достаточной точностью. При больших углах значение $\operatorname{tg} \delta$ определяется по данным измерения $\cos \varphi$ с помощью тригонометрических таблиц.

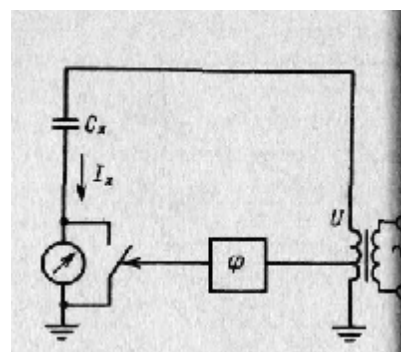
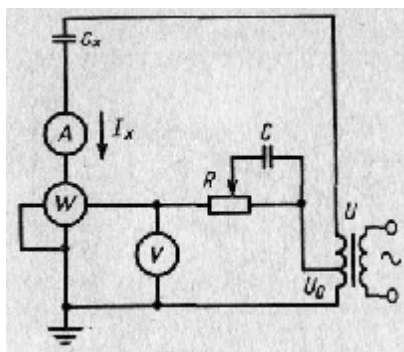


Рис. 2.17. Схема ваттметровой установки
Рис. 2.18. Структурная схема векторметра

Применяются специальные ваттметры, предназначенные для измерений в цепях с небольшим $\cos \varphi$ (так называемые малокосинусные ваттметры).

При построении схемы ваттметровой установки особое внимание следует уделять цепям питания обмотки напряжения ваттметра так как они могут быть источником существенных погрешностей измерения.

Схема ваттметровой установки (см. рис. 2.17), в которой цепи напряжения питаются от специальной измерительной отпайки испытательного трансформатора, обеспечивает наибольшую точность измерений, так как при измерении автоматически поддерживается постоянство отношения напряжения на вольтметре и ваттметре к испытательному напряжению и, кроме того, фазы этих напряжений мало отличаются друг от друга. В качестве источника напряжения U_0 для ваттметра может быть использован также трансформатор напряжения, первичная обмотка которого подключена к объекту.

Погрешность коэффициента трансформации этого трансформатора влечет за собой ошибку в измерении емкости объекта. Фазовая погрешность, получающаяся в результате сдвига фаз между напряжением, подаваемым на объект, и током, протекающим через обмотку напряжения ваттметра, вызывает погрешность в измерении угла потерь. Для устранения фазовых погрешностей ваттметровая установка может быть снабжена компенсирующим устройством, устраняющим сдвиг фаз. Компенсирующее устройство выполняется, например, в виде конденсатора, шунтирующего часть или все добавочное сопротивление обмотки напряжения ваттметра. Компенсацию фазового сдвига можно произвести при контроле образцового конденсатора. Компенсирующая емкость (или шунтируемая часть добавочного сопротивления ваттметра) при этом подбирается с таким расчетом, чтобы отклонение ваттметра было равно нулю.

Векторметр является устройством, измеряющим составляющую вектора тока, находящуюся в фазе с управляющим напряжением. прибор работает по принципу синхронного выпрямления: измеряемый ток выпрямляется при помощи специальной ключевой схемы, управляемой напряжением той же частоты (рис. 2.18).

Если синхронный выпрямитель будет управляться напряжением, находящимся в фазе с напряжением на объекте, то показания прибора, измеряющего среднее значение тока, будут пропорциональны активной составляющей тока через объект: $I_p = k I_x \cos \varphi$. При сдвиге фазы управляющего напряжения на 90° относительно напряжения на объекте показания прибора будут соответствовать реактивной составляющей: $I_p = k I_x \cos 90^\circ - \varphi = k I_x \sin \varphi$. Отношение этих величин и есть подлежащий измерению тангенс угла диэлектрических потерь изоляции: $I_a / I_p = \operatorname{ctg} \varphi = \operatorname{tg} \delta$.

При измерении реактивной составляющей тока показания прибора будут пропорциональны емкости объекта.