

### 2.3. ПАРАЗИТНЫЕ ТОКИ И ИХ ИСКЛЮЧЕНИЕ

**Паразитные токи в схеме измерений.** Источником паразитных токов является напряжение измерительной установки. Они протекают от вывода источника напряжения и соединенных с ним проводов на заземленные или имеющие низкий потенциал элементы схемы.

Характерные пути протекания паразитных токов в схеме измерений и соответствующие им проводимости паразитных связей приведены на рис. 2.19. В установках постоянного тока пути протекания паразитных токов определяются сопротивлениями конструктивных элементов и наличием короны. В установках переменного тока паразитные токи имеют, как правило, емкостный характер; активная составляющая их вызвана проводимостью и диэлектрическими потерями по пути протекания.

От шин (проводов), соединенных с выводом источника напряжения, текут токи  $I_{п1}$ ,  $I_{п2}$  (на землю) и  $I_{п3}$  (на низкопотенциальный вывод объекта). Внутри источника напряжения имеется несколько путей протекания паразитных токов от измерительного напряжения и напряжения сети питания; они определяют суммарный ток  $I_{п4}$ .

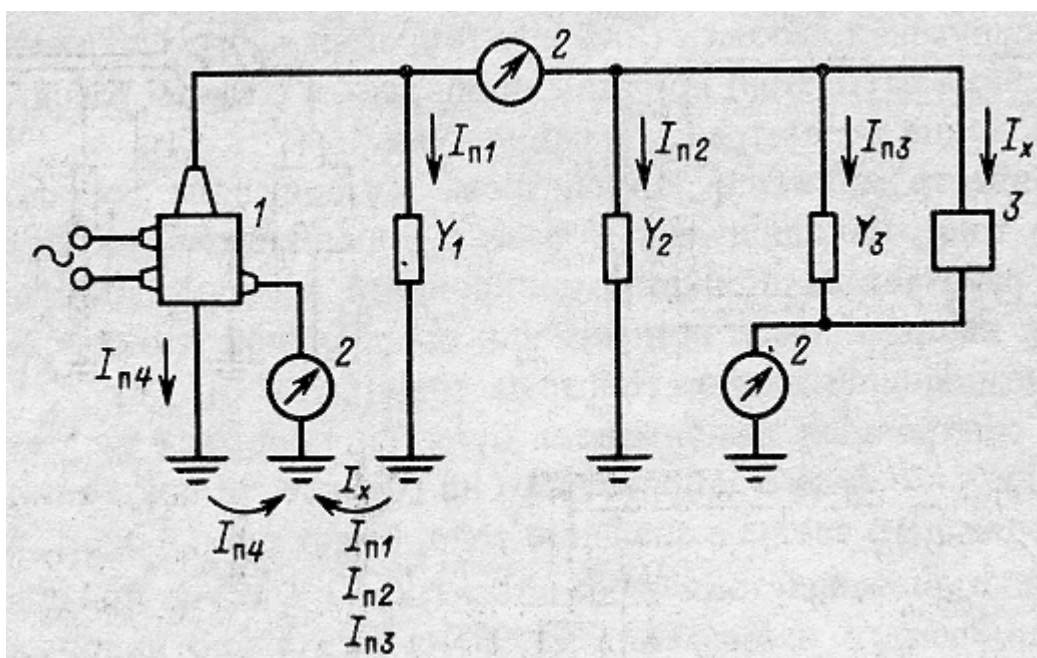


Рис. 2.19. Паразитные токи в схеме измерений:  
1 — источник напряжения; 2 — средство измерений; 3 — объект контроля

Устранение погрешностей измерения, связанных с паразитными токами, производится экранированием элементов схем измерения или введением расчетных поправок в полученные результаты. Экранирование является основным методом исключения паразитных токов. Введение поправок допустимо лишь в случае, если полное экранирование схемы произвести невозможно.

В зависимости от схемы включения в СИ протекают разные составляющие суммарного паразитного тока. В соответствии с этим используются разные способы экранирования.

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 и погрешности в результаты измерений не внося. Исключить ток  $I_{п3}$  можно, заключив в заземленный экран Э измерительный элемент СИ, низкопотенциальный вывод объекта и соединяющий их провод (рис. 2.20, а).

В перевернутой схеме включения СИ через его измерительный элемент протекают токи  $I_{п2}$  и  $I_{п3}$ . Остальные паразитные токи замыкают< помимо СИ. Ток  $I_{п2}$  проходит через СИ лишь той его частью, которая обусловлена проводимостью на землю измерительного элемента участка провода между ним и объектом (включая и вывод объекта). Исключить ток  $I_{п2}$  можно, заключив указанные элементы в экран, присоединенный к соответствующему выводу источника напряжения (рис. 2.20, б). При этом исключается и ток  $I_{п3}$ .

В обратной схеме включения СИ через его измерительный элемент протекают все указанные паразитные токи.

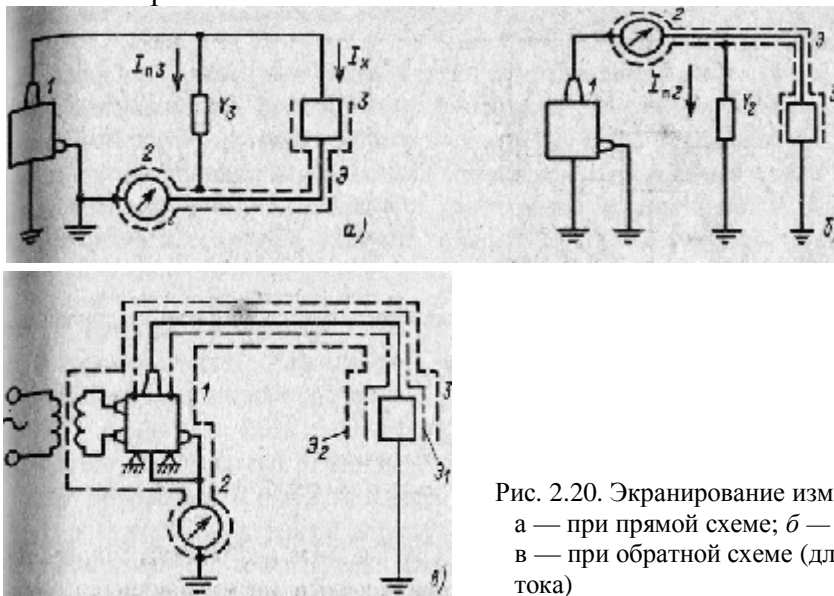


Рис. 2.20. Экранирование измерительных устройств:  
 а — при прямой схеме; б — при перевернутой схеме;  
 в — при обратной схеме (для устройств переменного тока)

Полное экранирование в обратной схеме (рис. 2.20, в) обеспечивается двумя экранами. Экран  $\mathcal{E}_2$  охватывает провод, идущий от источника измерительного напряжения, и сам источник. В качестве экрана источника напряжения обычно используется его кожух. Изоляция экрана  $\mathcal{E}_1$  от провода должна выдерживать полное напряжение источника. Кроме того, в установках переменного тока необходимо обеспечивать экранирование по цепям питания. Для этого источник измерительного напряжения должен иметь специальную конструкцию или, как на рис. 2.20 в, разделительный экранированный трансформатор. Наружный экран  $\mathcal{E}_2$  заземляется.

В измерительных устройствах обычно имеются внутренние экраны, обеспечивающие защиту от паразитных токов. К зажимам этих экранов следует присоединять и наружные экраны схемы измерений. Кроме решения основной задачи - отделения паразитных токов - экранирование обеспечивает также снижение уровня токов влияния, протекающих через измерительный элемент СИ.

В правильно сконструированной измерительной установке погрешности от паразитных токов обычно ниже допустимых. В тех случаях, когда полное экранирование осуществить сложно (например, при обратной схеме включения), погрешность можно исключить расчетным путем. Для этого измерения проводят дважды: сначала измеряют сумму тока объекта и паразитных токов; затем только паразитные ток (объект отключен).

Расчетное исключение погрешности возможно только при аддитивной помехе, т. е. когда измерение суммы токов производится в области линейности СИ. В измерительных установках постоянного тон результат измерения вычисляется как разность данных, полученных при первом и втором измерениях. В установках переменного тока необходимо учитывать не только модули, но и фазы измеряемых токов.

Для случая измерения диэлектрических потерь и емкости изоляции действительные значения

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C'_x \operatorname{tg} \delta' - C_n \operatorname{tg} \delta_n}{C'_x - C_n};$$

$$C_x = C'_x - C_n,$$

где  $C'_x$  и  $\operatorname{tg} \delta$  — результаты измерений объекта при наличии помех;  $C_n$  и  $\operatorname{tg} \delta_n$  — результаты измерений только помех.

При больших паразитных токах расчетное исключение погрешности будет очень не точным, так как действительное значение параметра будет определено как разность двух больших значений, погрешность измерения которых сопоставима с определяемым значением параметра. Так, при измерении  $\operatorname{tg} \delta$  введением расчетной поправки можно пользоваться при условии, что  $C_n \operatorname{tg} \delta_n < 0,15 C'_x \operatorname{tg} \delta'$ , а  $C_n \leq 0,3 C'_x$ .

До сих пор рассматривались паразитные токи, причиной появления которых является электрическое поле. В установках переменного тока паразитные токи могут возникать и при воздействии электромагнитных полей. Токи, индуцированные в измерительных цепях, складываются с измеряемыми и являются источниками погрешностей.

Обычно при конструировании СИ площадь контуров, в которых могут индуцироваться паразитные токи, делают минимальной и при необходимости ставят электромагнитные экраны. Поэтому в условиях эксплуатации возможны лишь остаточные погрешности из-за не удачного взаимного расположения СИ и элементов установки, имеющих большие внешние электромагнитные поля (регуляторы, трансформаторы).

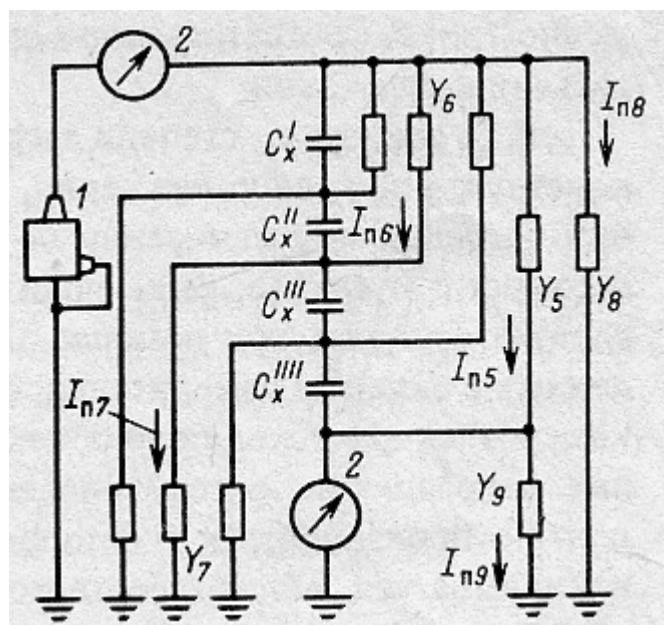
Наиболее подвержены электромагнитным влияниям высокочувствительные узлы СИ, имеющие в своем составе трансформаторы, дроссели и т. п.

Влияние электромагнитных наводок целесообразно исключать изменением взаимного расположения элементов установки (путем удаления СИ от влияющих аппаратов). Остаточная погрешность исключается расчетом по результатам двух измерений, проведенных с изменением направления тока в узле, подверженном влиянию. Так, например, в мостах переменного тока наиболее подвержен электромагнитным влияниям указатель равновесия. Проведя два измерения, причем второе с переменной полярности его включения в диагональ моста, можно исключить погрешность, приняв за результат измерения полусумму полученных данных.

Рис. 2.21. Схема замещения и паразитные связи объекта контроля

**Паразитные связи объекта измерений.** Погрешности измерений могут быть также следствием паразитных связей объекта измерений с окружающими его предметами. Кроме того, погрешности измерений могут появиться из-за ряда конструктивных особенностей объекта (наличие обмоток, шунтирования измерительных элементов и т. п.).

На схеме замещения (рис. 2.21) емкость  $C_x$  объекта представлена в виде цепочки из нескольких последовательно соединенных конденсаторов. Такое представление ближе к реальному объекту, так как в большинстве случаев изоляция оборудования высокого напряжения



выполняется в виде ряда последовательно включенных секций (аппаратная изоляция конденсаторного типа и т. п.). Пути паразитных токов показаны включением соответствующих проводимостей.

Паразитный ток  $I_{п5}$  вызывается в основном утечками по поверхности контролируемого объекта между его электродами, а также током короны на проводах схемы измерений. Токи  $I_{п6}$  и  $I_{п7}$  протекают по частичным емкостям изоляционной конструкции объекта относительно деталей, находящихся под напряжением измерительной установки, или заземленным. Паразитный ток  $I_{п8}$  обусловлен емкостью и проводимостью деталей объекта, связанных с источником напряжения. В ряде случаев ток  $I_{п8}$  может протекать по частям изоляции объекта, включенным параллельно области, параметры которой надо измерить. Ток  $I_{п9}$  протекает по емкостям и проводимостям, шунтирующим измерительный элемент СИ.

Токи  $I_{п5}$ ,  $I_{п9}$  и частично  $I_{п8}$  создают погрешности при измерениях «а постоянном и переменном токе; токи  $I_{п6}$  и  $I_{п7}$  - только при переменном токе. Соответственно в дальнейшем будут рассмотрены и методы их исключения.

Ток  $I_{п5}$  зависит от степени загрязнения поверхности изоляционной конструкции, от ее увлажнения. Поэтому основным способом снижения погрешностей измерения по этой причине является очистка поверхности. В случае, если очистка не помогла, то паразитные токи следует отводить при помощи охранных электродов (колец), соединенных с экраном измерительной схемы. Охранные кольца могут исказить электрическое поле объекта, вызвав тем самым дополнительные погрешности, рассматриваемые ниже. Поэтому экранирование должно производиться с осторожностью. Охранные кольца должны накладываться вблизи соответствующих электродов объекта так, чтобы осуществить полное прилегание кольца ко всей поверхности изолятора.

Погрешности измерения, вносимые токами  $I_{п6}$  и  $I_{п7}$  также нередко связаны с состоянием поверхности объекта. Пути для этих токов могут быть образованы, например, емкостью между обкладками ввода с конденсаторной изоляцией и проводящими загрязнениями на поверхности фарфоровой крышки или неправильно установленными охранными электродами. Паразитные токи  $I_{п6}$  и  $I_{п7}$  замыкаются и через отложения на внутренней поверхности фарфоровой крышки объекта, которые вызваны старением и разложением масла. Существенные погрешности измерения могут быть обусловлены близким расположением к объекту посторонних предметов (например, при попытках контроля ввода в транспортной таре, из-за забытой лестницы, при помощи которой собирали схему измерений, и т. п.). Изменение измеренных значений параметров объекта на месте его установки по сравнению с результатами контроля до монтажа нередко вызвано изменением путей протекания рассматриваемых токов.

Паразитный ток  $I_{п6}$ , так же как и ток  $I_{п5}$ , увеличивает по сравнению с действительным измеренное значение  $\operatorname{tg} \delta$ . При измерении при прямой схеме включения СИ наличие тока  $I_{п7}$  приводит к снижению измеренного значения  $\operatorname{tg} \delta$ . Поэтому существует реальная опасность, что ухудшение состояния изоляции может быть замаскировано паразитными связями объекта.

На рис. 2.22 приведены расчетная схема и векторная диаграмма для этого случая. Эквивалентная паразитная емкость  $C_{п}$  включена между двумя емкостями  $C'$  и  $C''$ , составляющими емкость объекта. Для упрощения пренебрегаем диэлектрическими потерями в изоляции объекта.

На векторной диаграмме  $I''$  - измеряемый ток через объект. Напряжение  $U''$  - падение напряжения от тока  $I''$  на емкости  $C''$  — отстает по фазе от тока на  $90^\circ$  (емкость  $C''$  без потерь). Паразитный ток  $I_{п}$ , вызванный этим же напряжением, имеет активную составляющую и, следовательно, опережает напряжение на угол  $90^\circ - \delta_{п}$ , где  $\delta_{п} = \operatorname{arctg} \omega C_{п} R_{п}$ .

Суммарный ток  $I = I' + I_{п}$ , протекая по емкости  $C'$ , вызовет падение напряжения  $U'$ , сдвинутое относительно тока на  $90^\circ$  (емкость  $C'$  без потерь). Сумма напряжений  $U'$  и  $U''$  и есть испытательное напряжение  $U$ , относительно которого будет измерена фаза тока  $I''$ . На векторной диаграмме видно, что этот ток опережает напряжение  $U$  на угол  $90^\circ + \delta'$ , т. е. будет измерено отрицательное значение угла диэлектрических потерь. Напомним, что при построении диаграммы предполагалось отсутствие потерь в

изоляции объекта. В реальном случае вместо действительного значения  $\operatorname{tg} \delta$  будет измерено уменьшенное значение  $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} = \operatorname{tg} (\delta - \delta')$ .

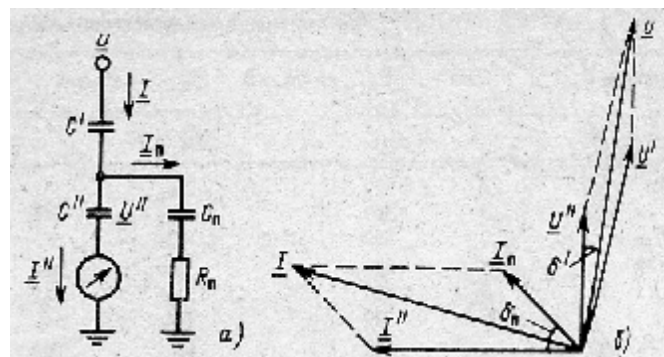


Рис. 2.22. К расчету погрешности от паразитных связей при прямой схеме включения средства измерения: а — схема замещения; б — векторная диаграмма

Учитывая малость углов, можем принять  $\operatorname{tg} \delta_{\text{изм}} \approx \operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \delta'$

Расчет показал, что при  $\operatorname{tg} \delta_{\text{п}} < 1$ :

$$\operatorname{tg} \delta' \approx \frac{m}{m+1} \frac{n}{n+1} \operatorname{tg} \delta_{\text{п}},$$

где  $m = C'/C''$ , а  $n = C_{\text{п}}/C''$

В качестве примера приведем результаты измерений ввода 110 кВ, в котором паразитные связи имитировались путем установки под шестым ребром крышки бандажа из гибкого провода. Загрязнения с поверхности ввода не удалялись. Измерения проводились в сухую погоду при прямой схеме включения моста. Получены следующие данные:

	$\operatorname{tg} \delta, \%$	$C_{\text{х}}, \text{пФ}$
Бандаж отсутствует	0,5	190
Бандаж соединен с проводом ВН схемы	1,1	197
Бандаж заземлен	0,0	184

Опыт показал, что паразитная емкость, примерно равная 3% емкости изоляции объекта, полностью обесценила результаты измерений.

При испытаниях вводов, установленных на силовых трансформаторах, паразитный ток  $I_{\text{пб}}$  частично протекает через емкостные связи с обмоткой ВН трансформатора [9]. Значение и фаза паразитного тока определяются распределением напряжения вдоль обмотки. Обмотка ВН соединена с источником измерительного напряжения, и по ней протекает ток, вызванный емкостью обмотки относительно заземленных частей трансформатора. Ввиду наличия потерь в сердечнике трансформатора из-за потока намагничивания падение напряжения на обмотке будет иметь активную составляющую. Поэтому паразитный ток между обкладками ввода и обмоткой внесет в результаты измерения  $\operatorname{tg} \delta$  ввода значительную погрешность.

Таблица 2.1. Измеренные значения  $\operatorname{tg} \delta$ , вводов силовых трансформаторов

Тип трансформатора	Фаза	$U_{\text{ном}}$ ввода, кВ	Схема А		Схема Б		Схема В	
			$\operatorname{tg} \delta, \%$	$C_{\text{х}}, \text{пФ}$	$\operatorname{tg} \delta, \%$	$C_{\text{х}}, \text{пФ}$	$\operatorname{tg} \delta, \%$	$C_{\text{х}}, \text{пФ}$
ТДЦ-206000/500	А	500	0,8	632	0,5	634	—	—
	В	500	1,2	640	0,45	645	—	—
	С	500	0,75	593	0,45	595	—	—
ТДЦГ-360000/220	А	220	1,8	560	0,4	560	—	—
	В	220	2,3	565	0,45	565	—	—
	С	220	1,1	543	0,45	543	—	—
АОДЦН-167000/500	—	500	0,7	600	0,4	600	0,4	600
ТДЦ-360000/220	В	220	—	—	0,6	555	0,7	555
АОДЦТ-135000/500	А	500	1,63	—	0,23	—	—	—
ОДЦГ-135000/500	С	500	1,0	—	—	—	0,4	—

Примечание. Схемы: А — все обмотки раскорочены; Б — все обмотки закорочены; В — закорочена только обмотка НН.

Исключение этой погрешности возможно лишь путем устранения вызвавшей ее причины - потока намагничивания в сердечнике трансформатора. Для этого необходимо закоротить все выводы обмоток, в табл. 2.1 приведены результаты измерений, подтверждающие эту рекомендацию.

Закорачивание обмоток необходимо и при измерении диэлектрических потерь их изоляции. Ток, протекающий через обмотку по ее частичным емкостям относительно заземленных элементов трансформатора, возбуждает, как уже указывалось, магнитный поток в сердечнике. Следовательно, в ток через обмотку будет внесен фазовый сдвиг, определяемый потерями в железе. Именно этот ток и измеряется при контроле обмоток трансформатора, причем фазовый сдвиг, внесенный потерями в сердечнике, может привести к полной утере информации о состоянии изоляции обмотки.

Паразитный ток  $I_{п8}$  вносит погрешности измерения при перевернутой схеме включения СИ. Основной способ исключения этих погрешностей - уменьшение тока  $I_{п8}$  путем изменения схемы измерений или подачи на части объекта, мешающие измерению, потенциала экрана схемы.

Так, например, при испытании вводов некоторых выключателей паразитный ток  $I_{п8}$  протекает с гасительных камер на бак. Для уменьшения его влияния следует опустить бак или слить масло из выключателя.

При контроле наружных слоев изоляции вводов и трансформаторов тока (рис. 2.23) значение тока  $I_{п8}$  определяется тем, куда будет присоединен вывод ВН объекта. При заземлении этого вывода будут измерены характеристики соединенных параллельно емкостей  $C_1$  и  $C_3$ . Если вывод ВН никуда не присоединен, возникает неопределенность, так как результат измерения зависит от сопротивления изоляции этого вывода (особенно в случае, когда шины от объекта не отключены). Если же на вывод ВН подать потенциал экрана схемы, то ток  $I_{п8}$  не возникнет, поскольку отсутствует вызывающая его разность потенциалов между выводами ВН и И объекта.

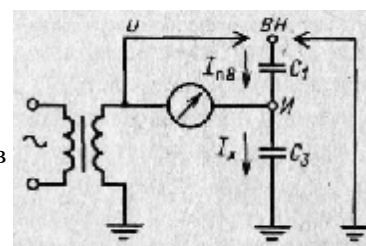


Рис. 2.23. Схема измерения  $\text{tg } \delta$  наружных слоев изоляции:

$C_1$  — емкость основной изоляции;  $C_3$  — емкость наружных слоев изоляции; ВН — вывод высокого напряжения; И — измерительный вывод

В ряде конструкций аппаратов высокого напряжения имеются два вывода от обкладок изоляционного остова: от предпоследней (специальный) и последней (измерительный). Специальный вывод предназначен для присоединения устройств измерения напряжения (ПИН), а измерительный вывод — для контроля изоляции. У таких объектов измерение  $\text{tg } \delta$  изоляции при подключении прибора к измерительному выводу из-за снижения изоляции специального вывода может привести к существенным ошибкам, аналогичным рассмотренным выше.

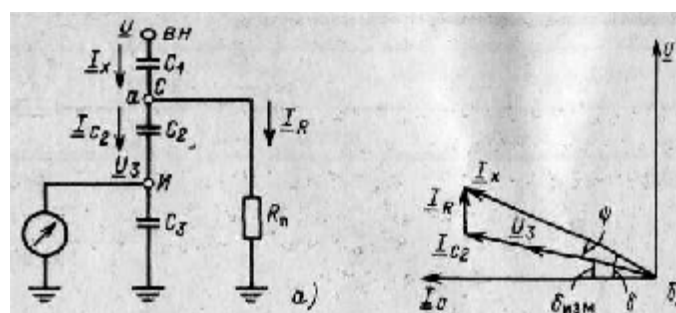


Рис. 2.24. Измерение  $\text{tg } \delta$  изоляции ввода с ПИН:

$a$  — схема замещения;  $b$  — векторная диаграмма;  $C_1$  — емкость основной изоляции  $C_2$  — емкость изоляции конденсатора ПИН;  $C_3$  — емкость наружных слоев изоляции  $R_{п}$  - сопротивление изоляции

специального вывода;  $VH$  — вывод высокого напряжения;  $C$  — специальный вывод;  $I$  — измерительный вывод

На рис. 2.24 приведены схема замещения и векторная диаграмма для такого случая. Ток  $I_x$  через объект в точке  $a$  разветвляется на две составляющие: ток  $I_{C2}$ , проходящий по емкости  $C_2$  обкладки ПИН, и ток  $I_R$ , проходящий по сопротивлению  $R_{\Pi}$  изоляции специального вывода (принято, что емкость  $C_2$  не имеет потерь). Измеряется падение напряжения  $U_3$  на сопротивлении  $R_3$  моста от тока  $I_{C2}$ , практически совпадающее по фазе с этим током ( $R_3 \ll 1/\omega C_2$ ). Из векторной диаграммы следует, что  $\delta_{\text{изм}} = \delta - \varphi$  или с учетом малости углов  $\text{tg } \delta_{\text{изм}} = \text{tg } \delta - \text{tg } \varphi$ . Следовательно,  $\text{tg } \delta = 1/\omega C_2 R_2$  определяет погрешность, измерения потерь ввода из-за сниженной изоляции специального вывода.

Оценим возможную погрешность при измерении объекта емкостью 600 пФ с помощью измерительного вывода. Величина  $C_2 = 30 C_1 \approx 30 \cdot 600 = 18\,000$  пФ. Примем  $R_1 = 10$  МОм тогда,  $\Delta \text{tg } \delta = \text{tg } \varphi = 1,4 \cdot 10^{-2}$ . Очевидно, что при хорошей изоляции ввода в результате может быть измерено даже отрицательное значение  $\text{tg } \delta$ .

Как видно из примера, если использовать измерительный вывод, даже при достаточно высоком значении сопротивления изоляции специального вывода результат измерения практически не будет связан с состоянием основной изоляции. Поэтому во всех случаях контроля диэлектрических потерь таких объектов измерение при прямой схеме измерительной установки надо вести, используя специальный вывод, соединив его с измерительным. Это соединение необходимо для исключения другой погрешности - от шунтирования измерительного элемента. Вопросы, связанные с исключением погрешностей от такого шунтирования, будут рассмотрены в следующем параграфе.

**Шунтирование входа средства измерений.** Под входом СИ понимается его измерительный элемент (первичный преобразователь), по которому протекает измеряемый ток. Шунтирование входа СИ в схеме измерений проводимостью  $Y_{\text{п9}}$  (см. рис. 2.21) может привести к недопустимым погрешностям измерений.

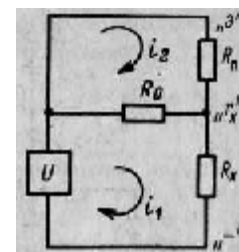


Рис. 2.25. К расчету погрешности измерения мегаомметром

При измерении мегаомметром и использовании цепей экранирования для исключения паразитных токов параллельно измерительному элементу  $R_0$  (рис. 2.25) включается сопротивление  $R_{\Pi}$ , эквивалентное сопротивлению путей протекания этих токов. Уравнения контурных токов в схеме:

$$\begin{aligned} i_1(R_0 + R_X) - i_2 R_0 &= U; \\ i_2(R_0 + R_{\Pi}) - i_1 R_0 &= 0; \end{aligned}$$

Будет измерено значение  $R'_X = U / (i_1 - i_2)$ ; действительное значение  $R_X$ . Решение приведенных уравнений дало выражение для погрешности измерения

$$\frac{\Delta R_X}{R_X} = \frac{R'_X - R_X}{R_X} = \frac{R_0}{R_X} + \frac{R_0}{R_{\Pi}}$$

Погрешность, определяемая отношением  $R_0/R_X$ , пренебрежимо мала. Для обеспечения допустимой погрешности измерения  $R_X$  сопротивление  $R_{\Pi}$  не должно быть ниже определенного значения. Если принять, что дополнительная относительная погрешность, вызванная шунтированием, не должна превышать 2%, то предельное (нижнее) значение  $R_{\Pi} = 50 R_0$ .

При измерении мостовой схемой шунтирующими элементами могут быть емкость  $C_{\Pi}$  и сопротивление  $R_{\Pi}$  между проводами схемы и экранами. При контроле ряда аппаратов в схему измерений входит значительная емкость между выводом, к которому присоединяется плечо  $Z_3$  моста, и заземленными частями конструкции. Сопротивление  $R_{\Pi}$  вносит погрешность в измеренную емкость объекта, а емкость  $C_{\Pi}$  - в значение измеренного  $\text{tg } \delta$  изоляции.

Из-за шунтирования сопротивлением  $R_{\Pi}$  при балансе мостовой схемы будет получено значение  $R_3$  отличающееся от действительного на  $\Delta R_3$ . Допустимое значение  $\Delta R_3$  определяется допустимой погрешностью определения емкости.

Так как  $R_3$  и  $R_{\Pi}$  соединены параллельно, то:

$$\left( \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)_{\text{доп}} = \frac{R_3}{R_3 + R_{\Pi}} \approx \frac{R_3}{R_{\Pi}} \leq \left( \frac{\Delta C_x}{C_x} \right)_{\text{доп}}$$

Наличие емкости  $C_{\Pi}$  приводит к изменению фазы напряжения  $U_3$  на плече  $Z_3$  моста. Погрешность измерения определяется фазовым углом плеча  $Z_3$ .

Наличие шунтирующей емкости увеличивает измеренное значение  $\text{tg } \delta$ . С учетом (2.5) и (2.6) эта погрешность

$$(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{ш}} = \omega R_3 C_{\Pi} = \omega R_4 C_0 C_{\Pi} / C_x.$$

Примем допустимые погрешности измерения  $\Delta C_x / C_x = 1\%$  и  $\Delta \text{tg } \delta = 1 \cdot 10^{-3}$ . При этом  $\Delta R_3 / R_3 \approx R_3 / R_{\Pi} \leq 0,01$ , а  $\omega R_4 C_0 C_{\Pi} / C_x \leq 0,001$ . Для моста P5026 наибольшее значение  $R_3 = 20$  кОм;  $R_4 = 10000/\pi$  Ом и  $C_0 = 50$  пФ. При этих данных предельные значения шунтирующих элементов:  $R_{\Pi} \geq 100 R_3 = 2$  МОм, а  $C_{\Pi} \leq 20 C_x$ .

В трансформаторе тока ТФНКД-500 (ТФЗМ 500) емкость главной изоляции  $C_x = 100$  пФ, а емкость относительно заземленного фланца внутреннего экрана с присоединенный вторичными обмотками  $C_{\Pi} = 14000$  пФ. В данном случае  $C_{\Pi} / C_x = 140$ , а  $(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{ш}} = 7 \cdot 10^{-3}$ . При вводе в эксплуатацию такие трансформаторы тока имеют  $\text{tg } \delta = (4 \dots 6) \cdot 10^{-3}$ . Следовательно, без исключения погрешности измерения информация о состоянии изоляции будет утеряна.

У вводов со специальным выводом (вывод ПИН)  $C_{\Pi} / C_x = C_2 / C_x > 20$ . При их контроле также необходимо исключение погрешности измерения  $\text{tg } \delta$ .

Расчетный способ исключения погрешности заключается в вычитании из результата измерений поправки, равной  $(\Delta \text{tg } \delta)_{\text{ш}}$ . Для объектов, типовое значение шунтирующей емкости которых известно, поправка может быть рассчитана заранее; при этом измерение  $C_{\Pi}$  не потребуется.

Для моста P5025 (при  $R_4 = 10000/\pi$ ) эта поправка при контроле вводов с ПИН равна

Номинальное напряжение ввода, кВ	$C_{\Pi} / C_x$	$\Delta \text{tg } \delta$
150	22	$1,1 \cdot 10^{-3}$
220	33	$1,6 \cdot 10^{-3}$
330	48	$2,4 \cdot 10^{-3}$
500	72	$3,6 \cdot 10^{-3}$
750	120	$6,0 \cdot 10^{-3}$

Для мостовой схемы известен способ исключения погрешности, требующий измерения  $C_{\Pi}$ . По этому способу измерение  $\text{tg } \delta$  производится в 2 раза при различных значениях  $R_4$  ( $R''_4 = k R_4$ ), а погрешность исключается расчетом.

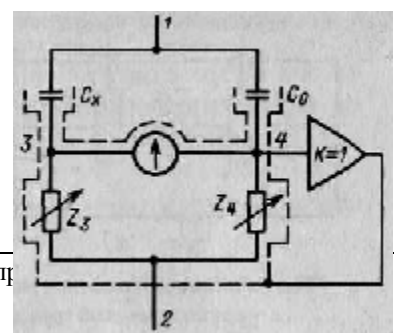
Пусть первое измерение проведено при значении  $R'_4$ . Результат измерения  $\text{tg } \delta' = \text{tg } \delta + \Delta \text{tg } \delta'$ , где  $\text{tg } \delta$  - действительная величина;  $\Delta \text{tg } \delta' = \omega C_{\Pi} R'_3$  - погрешность за счет  $C_{\Pi}$  при  $R'_4$ ;  $\text{tg } \delta'$  - значение, полученное при первом измерении.

Второе измерение проведено при значении  $R''_4$ . При этом  $\text{tg } \delta'' = \text{tg } \delta + \Delta \text{tg } \delta''$ , где  $\Delta \text{tg } \delta'' = \omega C_{\Pi} R''_3$  - погрешность при втором измерении;  $\text{tg } \delta''$  - значение, полученное при втором измерении.

Поскольку  $R''_4 = k R'_4$ , то  $R''_3 = k R'_3$  и  $\Delta \text{tg } \delta'' = k \Delta \text{tg } \delta'$ .

Рис. 2.26. Схема моста с устройством защитного потенциала

Совместное решение полученных уравнений дает





$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta'' - k \operatorname{tg} \delta'}{1 - k};$$

при  $k = 0,5$   $\operatorname{tg} \delta = 2 \operatorname{tg} \delta'' - \operatorname{tg} \delta'$ .

В большинстве встречающихся в эксплуатации случаев нет необходимости в расчетном исключении рассматриваемой погрешности. Проще снизить значение  $R_4$  так, чтобы погрешность  $(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{ш}}$  стала меньше допустимой. Практически достаточно значение  $R_4 = 1000/\pi$  Ом. При этом указанные выше погрешности измерения  $\operatorname{tg} \delta$  изоляции вводов станут в 10 раз меньше и могут не учитываться из-за своей малости.

В мостовой схеме шунтирование емкостью плеча  $Z_4$  также приводит к погрешности измерения. При этом  $(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{ш}} = \omega R_4 C_{\text{п}}$ , а измеренное значение  $\operatorname{tg} \delta$  будет меньше действительного. Поэтому нельзя существенно увеличивать длину экранированного провода к образцовому конденсатору сверх имеющейся в комплектующем мост кабеле; емкость этого кабеля учитывается при конструировании моста.

Если необходима высокая точность измерений, значимой становится погрешность из-за емкости между диагональю моста и его экраном. Учет этой погрешности необходим, например, при контроле изоляционного масла.

Одним из способов устранения такой погрешности является уменьшение разности потенциалов между указателем равновесия и экраном моста. Паразитный ток, вызывающий рассматриваемую погрешность, станет пренебрежимо малым. Один из вариантов моста приведен на рис. 2.26. Усилитель (повторитель напряжения) с коэффициентом передачи  $k = 1$  включен между узлом 4 моста и его экраном, что обеспечивает автоматическое выравнивание потенциалов этих точек. В устройствах с компараторами тока, ввиду того что сопротивление  $I_{\text{х}}$  измерительного элемента (входной обмотки компаратора) очень мало, погрешности от шунтирования практически отсутствуют.

**Измерение параметров изоляции по зонам.** Для диагностирования целесообразно иметь данные о параметрах отдельных областей (зон) объекта. При этом улучшается выявляемость дефекта (из-за уменьшения объема контролируемой изоляции) и облегчается определение его местонахождения.

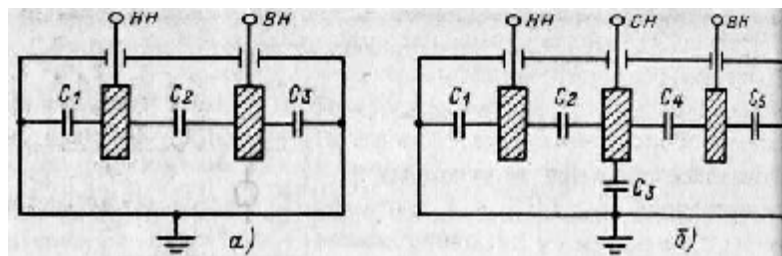


Рис. 2.27. Схемы замещения главной изоляции трансформаторов: а — двухобмоточный трансформатор; б — трехобмоточный трансформатор

Измерение характеристик изоляции объекта по зонам производится путем подачи потенциала экрана в соответствующие точки схемы. Тем самым от измерительного элемента СИ отводятся токи, проходящие через остальную часть изоляции.

Ранее был рассмотрен случай измерения характеристик наружных слоев изоляции ввода. Для исключения погрешности от тока через главную изоляцию вывод ВН ввода при этом соединяется с точкой экрана схемы (см. рис. 2.23).

Наибольшее применение получила оценка состояния изоляции зонам при контроле силовых трансформаторов, проводимая с целью выявления участка с повышенными потерями. На рис. 2.27 приведена схема замещения трансформатора, в которой емкости  $C_1 - C_5$  эквивалентны соответствующим зонам изоляции. В табл. 2.2 приведены данные о схемах, позволяющих измерить характеристики изоляции в не, ограниченной указанными электродами.

Обычно при эксплуатационном контроле производятся не все измерения согласно табл.

2.2; измеряются характеристики изоляции одной обмотки относительно бака и соединенных с ним других обмоток. Измерение ведется по перевернутой схеме.

Таблица 2.2. Схемы измерения при контроле силовых трансформаторов

Тип трансформатора	Измеряемая зона (рис. 2.27)	Схема включения измерительного устройства	Подключение электродов объекта	
			к измерительной схеме	к экрану
Двухобмоточный	$C_1$ $C_2$ $C_3$	Перевернутая Прямая Перевернутая	НН ВН и НН ВН	ВН Бак НН
Трехобмоточный	$C_1$ $C_2$ $C_3$ $C_4$ $C_5$	Перевернутая Прямая Перевернутая Прямая Перевернутая	НК СН и НН СН ВН и СН ВН	СН,ВН Бак, ВН ВН, НН Бак, НН СН, НН

При контроле обмотки ВН двухобмоточного трансформатора в этом случае будут получены следующие значения:

$$\operatorname{tg} \delta_B = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_2 + C_3 \operatorname{tg} \delta_3}{C_2 + C_3}; \quad C_B = C_2 + C_3.$$

При контроле обмотки НН будет получено

$$\operatorname{tg} \delta_H = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}; \quad C_H = C_1 + C_2.$$

Поскольку у двухобмоточного трансформатора производится еще одно измерение - обе соединенные обмотки относительно бака, - то по результатам трех измерений можно с достаточной точностью вычислить  $\operatorname{tg} \delta$  и емкость изоляции основных зон. Дополнительное измерение обеих обмоток относительно корпуса дает

$$\operatorname{tg} \delta_{(B+H)} = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_3 \operatorname{tg} \delta_3}{C_1 + C_3}; \quad C_{(B+H)} = C_1 + C_3.$$

Решая совместно полученные уравнения, можно определить интересующие значения  $\operatorname{tg} \delta$  и емкости зон:

$$C_1 = \frac{C_H - C_B + C_{(B+H)}}{2};$$

$$C_2 = \frac{C_B + C_H - C_{(B+H)}}{2};$$

$$C_3 = \frac{C_{(B+H)} + C_B - C_H}{2};$$

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{C_H \operatorname{tg} \delta_H - C_B \operatorname{tg} \delta_B + C_{(B+H)} \operatorname{tg} \delta_{(B+H)}}{C_H - C_B + C_{(B+H)}};$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{C_H \operatorname{tg} \delta_H + C_B \operatorname{tg} \delta_B - C_{(B+H)} \operatorname{tg} \delta_{(B+H)}}{C_H + C_B - C_{(B+H)}};$$

$$\operatorname{tg} \delta_3 = \frac{C_B \operatorname{tg} \delta_B + C_{(B+H)} \operatorname{tg} \delta_{(B+H)} - C_H \operatorname{tg} \delta_H}{C_B + C_{(B+H)} - C_H}.$$

В случае трехобмоточного трансформатора необходимо произвести пять измерений. При измерении по зонам можно, например, оценить причину повышенных потерь изоляции трансформатора.

В ряде случаев измерение  $\operatorname{tg} \delta$  по зонам дает возможность выявления таких сосредоточенных дефектов изоляции, как науглероженные следы частичных (ползущих) разрядов. Для этого необходимо сравнить результаты измерения  $\operatorname{tg} \delta$  разных зон и, если это возможно, одинаковых зон разных фаз.

