

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь в условиях влияния внешнего электромагнитного поля

1. Что такое диэлектрические потери?

Диэлектрические потери – электрическая мощность, поглощаемая в диэлектрике (объёме изоляции) под действием приложенного к нему напряжения. Эта мощность рассеивается в объёме изоляции, превращаясь в тепло.

Если участок изоляции с сопротивлением $R_{из}$ [Ом] находится под постоянным напряжением U [В], величина мощности диэлектрических потерь P [Вт] определяется по формуле:

$$P = \frac{U^2}{R_{из}} = U \cdot I = I^2 R_{из} \quad (1)$$

где I – сквозной ток утечки через изоляцию, А.

Помимо полной мощности диэлектрических потерь P во всём объёме изоляции существуют **удельные диэлектрические потери**, т.е. предел отношения диэлектрических потерь к объёму изоляции, когда последний стремится к нулю. Удельные диэлектрические потери $P_{уд}$ (без учёта потерь от тока поверхностной утечки) определяются по формуле:

$$P_{уд} = \frac{E^2}{\rho} = E^2 \gamma \quad (2)$$

где E – напряжённость электрического поля, В/м;

ρ – удельное объёмное сопротивление изоляции, Ом·м;

γ – удельная объёмная проводимость, См/м.

Однако чаще рассматриваются диэлектрические потери не под постоянным, а под переменным напряжением.

Величина потерь P [Вт] на участке изоляции с ёмкостью C [Ф] при действующем значении приложенного к этому участку переменного синусоидального напряжения U [В] частотой f [Гц] определяется по следующей формуле:

$$P = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с;

δ – угол диэлектрических потерь, [°] угловых градусов.

Угол диэлектрических потерь δ – угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в диэлектрике.

$$\delta = 90 - \varphi, [^\circ]$$

Угол диэлектрических потерь δ – важнейшая характеристика электроизоляционных свойств как материала изоляции, так и всей электроизоляционной конструкции (опорного или проходного изолятора, изоляции обмоток трансформатора или электрической машины, и т.п.), которая в общем виде представляет собой конденсатор. Чем меньше угол δ , тем выше качество изоляции.

Обычно при испытаниях изоляции измеряется не сам угол диэлектрических потерь δ , а его тангенс, безразмерная величина равная отношению активного I_a и реактивного I_p токов, протекающих через эту изоляцию:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p} \quad (4)$$

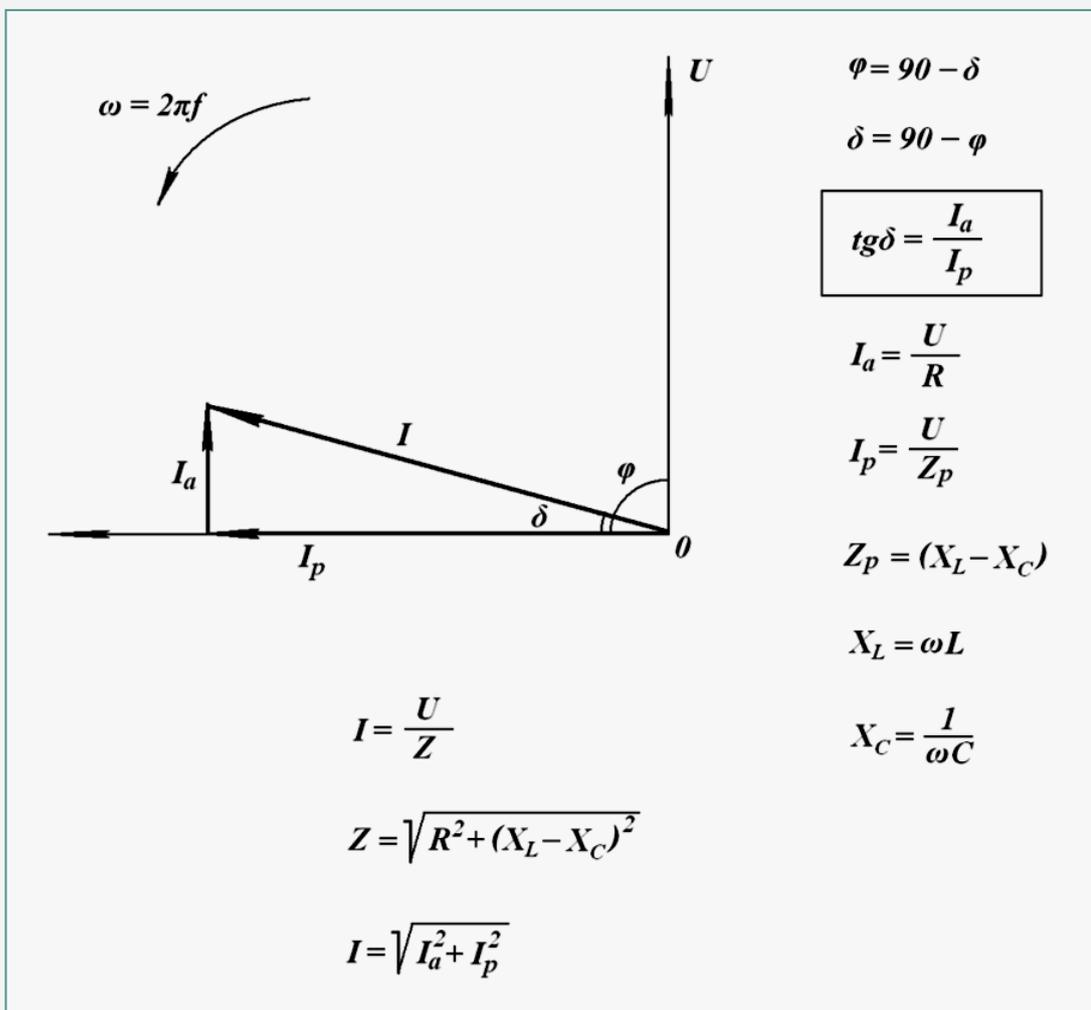
Абсолютное значение $\operatorname{tg} \delta$ для лучших электроизоляционных материалов составляет тысячные и даже десятитысячные доли единицы. Однако на практике чаще используются относительные значения $\operatorname{tg} \delta$, выраженные в процентах, где за 100 % принимается абсолютное значение тангенса, равное 1 (единице):

$$\operatorname{tg} \delta = 1 = 100 \%$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,01 = 1 \%$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,001 = 0,1 \%$$

Физический смысл тангенса угла диэлектрических потерь более понятен при построении векторной диаграммы токов и напряжений, действующих в изоляторе (диэлектрике):



где:

U – действующее переменное напряжение, приложенное к изолятору;

I – полный ток, протекающий через изолятор;

I_a – активная составляющая тока утечки через изолятор;

I_p – реактивная составляющая тока через изолятор;

Z – полное сопротивление изолятора (импеданс);

Z_p – реактивное сопротивление изолятора;

X_L – индуктивное сопротивление изолятора (обычно пренебрежимо мало);

X_C – ёмкостное сопротивление изолятора;

φ – угол сдвига фаз между напряжением и током;

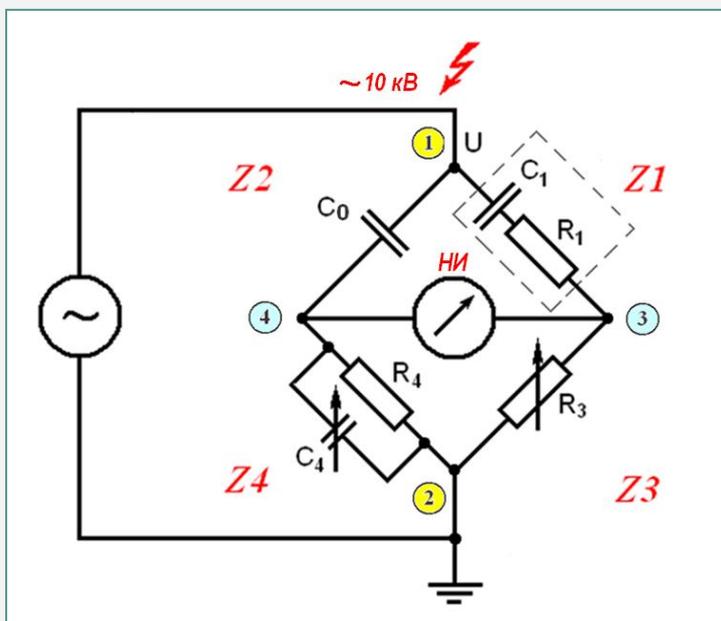
δ – угол диэлектрических потерь в изоляторе.

2. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь

На практике при контроле изоляции высоковольтного электрооборудования для измерения $tg\delta$ применяют мост переменного тока Шеринга.

Мост Шеринга — измерительный мост переменного тока, предназначенный для измерения электрической ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции высоковольтного электрооборудования, а также, в электрических кабелях. Назван так по имени немецкого инженера и изобретателя этого устройства Геральда Шеринга (1880-1959).

Упрощённая схема моста Шеринга



C_1 — ёмкость испытываемой изоляции объекта контроля;

R_1 — активное сопротивление объекта контроля;

C_0 — ёмкость образцового (эталонного) конденсатора;

R_3 — безындукционный резистор;

C_4 — магазин ёмкостей с переменным конденсатором;

R_4 — переменный безындукционный резистор, включённый параллельно C_4 .

2.1 Принцип действия моста Шеринга

Мост Шеринга представляет собой одинарный мост переменного тока, имеющий четыре плеча Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , в одно плечо которого включается магазин ёмкостей C_4 и параллельно присоединённое к нему постоянное активное сопротивление R_4 , в противоположное плечо включается объект контроля, эквивалентная электрическая схема которого состоит из последовательно соединённых ёмкостного C_1 и активного сопротивления R_1 , в третье плечо включается магазин активных сопротивлений R_3 , в четвертое — эталонный (образцовый) конденсатор C_0 .

На одну диагональ моста (точки 1, 2) подаётся переменное напряжение питания измерительной схемы (обычно 10 кВ). К другой диагонали подключается нуль-индикатор (**НИ**) переменного напряжения. Мост Шеринга — это по сути мост Уитстона, в котором активные сопротивления заменены комплексными сопротивлениями, имеющими активно-ёмкостный характер. С точки зрения схемотехники, одинарные мосты — это комбинация двух делителей напряжения и нуль-индикатора, включённого между ними. Рассматривая схему моста с этой точки зрения, можно прийти к выводу, что при равенстве произведения комплексных сопротивлений двух противоположных плеч произведению двух других противоположных плеч моста, разность потенциалов на нуль-индикаторе будет равна нулю.

Равновесие моста переменного тока, в отличие от равновесия моста постоянного тока, достигается лишь при соблюдении двух условий:

1) Отношение модулей полных сопротивлений смежных плеч моста должны быть равны между собой:

$$Z_1/Z_2 = Z_3/Z_4$$

откуда следует, что произведения модулей полных сопротивлений противоположных плеч моста должны быть равны между собой:

$$Z_1 \times Z_4 = Z_2 \times Z_3; \quad (5)$$

где Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 — комплексные (полные) сопротивления плеч моста.

2) Разности фазовых углов смежных плеч моста должны быть равны между собой:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$$

откуда следует, что суммы фазовых углов противоположных плеч моста должны быть равны между собой:

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (6)$$

Данное утверждение верно, если входное сопротивление нуль-индикатора очень велико, а в идеале — равно бесконечности. При конечном входном сопротивлении нуль-индикатора последний будет вносить погрешность в измерительную схему, что необходимо учитывать.

Приведение моста в состояние, при котором нуль-индикатор покажет нулевое значение, называется *балансировкой моста*.

Из условий равновесия моста переменного тока следует, что для балансировки необходима регулировка не менее двух параметров мостовой схемы. Процесс уравнивания заключается в попеременном регулировании этих параметров. При этом равновесие моста достигается большим или меньшим числом переходов от регулирования одного параметра к регулированию другого.

Балансировка моста производится поочерёдными изменениями сопротивления R_3 и ёмкости магазина конденсаторов C_4 , при этом происходит выравнивание напряжений в диагонали (в точках 3 и 4) моста.

При наступлении равновесия моста, которое контролируется по показаниям нуль-индикатора, выполняется равенство (5) откуда определяются параметры изоляции контролируемого объекта:

$$tg\delta = \omega C_4 \cdot R_4 \quad (7)$$

$$C_1 = \frac{R_4}{R_3} C_0 \quad (8)$$

Для расширения пределов измерения ёмкости контролируемого объекта параллельно резистору R_3 включается шунт, а изменяя сопротивление резистора R_4 можно изменять пределы измерения $tg\delta$.

Для упрощения расчётов сопротивление резистора R_4 выбирается равным $10^n/\pi$, где n – целое число. Тогда при промышленной частоте 50 Гц круговая частота будет равна:

$$\omega = 2\pi f = 100\pi, \quad (9)$$

а тангенс угла диэлектрических потерь:

$$tg\delta = 10^{n+2} C_4 \quad (10)$$

Если значение ёмкости C_4 выразить в микрофарадах, то значение измеренного $tg\delta$ будет определяться следующими соотношениями:

R_4	$100/\pi$	$1000/\pi$	$10000/\pi$
$tg\delta$	$0,01 \cdot C_4$	$0,1 \cdot C_4$	C_4
$tg\delta\%$	C_4	$10 \cdot C_4$	$100 \cdot C_4$

Измерения мостом Шеринга могут выполняться по прямой, перевёрнутой и обратной схемам включения. При прямой схеме измерений заземляется точка 2 моста; при перевёрнутой схеме – точка 1; при обратной схеме – точка 3. Поэтому обратная схема измерений иногда называется схемой с заземлённой диагональю.

При наличии внешнего электромагнитного поля (напряжения влияния) возможны случаи, когда ток образцового конденсатора отстаёт по фазе от тока, протекающего по плечу Z_3 моста и являющегося суммой тока возбуждения и тока помех. При этом для измерения так называемого отрицательного значения $tg\delta$, конденсатор C_4 следует включать параллельно резистору R_3 .

Значение отрицательного тангенса рассчитывается по формуле:

$$tg\delta (-) = \omega C_4 R_3 \quad (11)$$

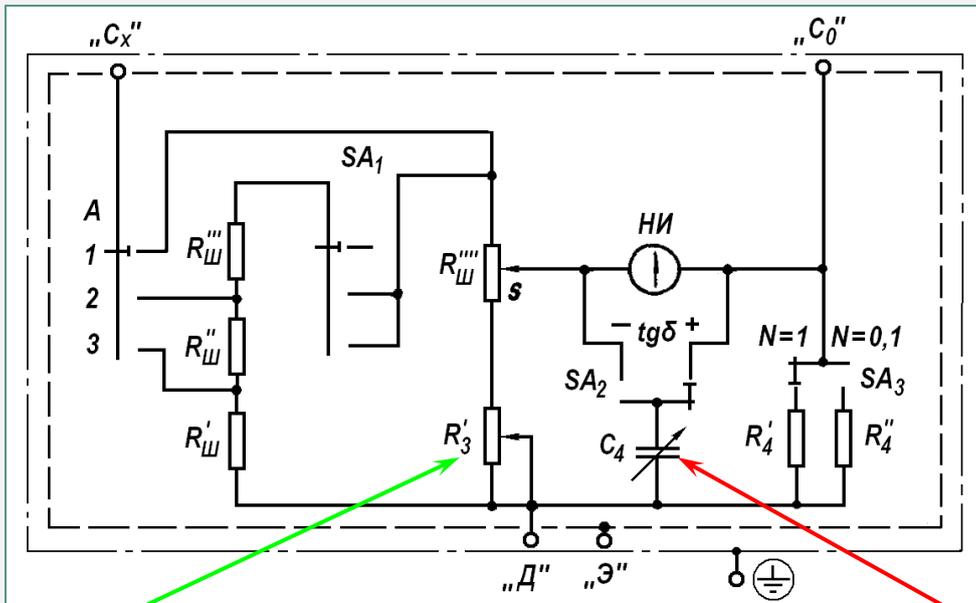
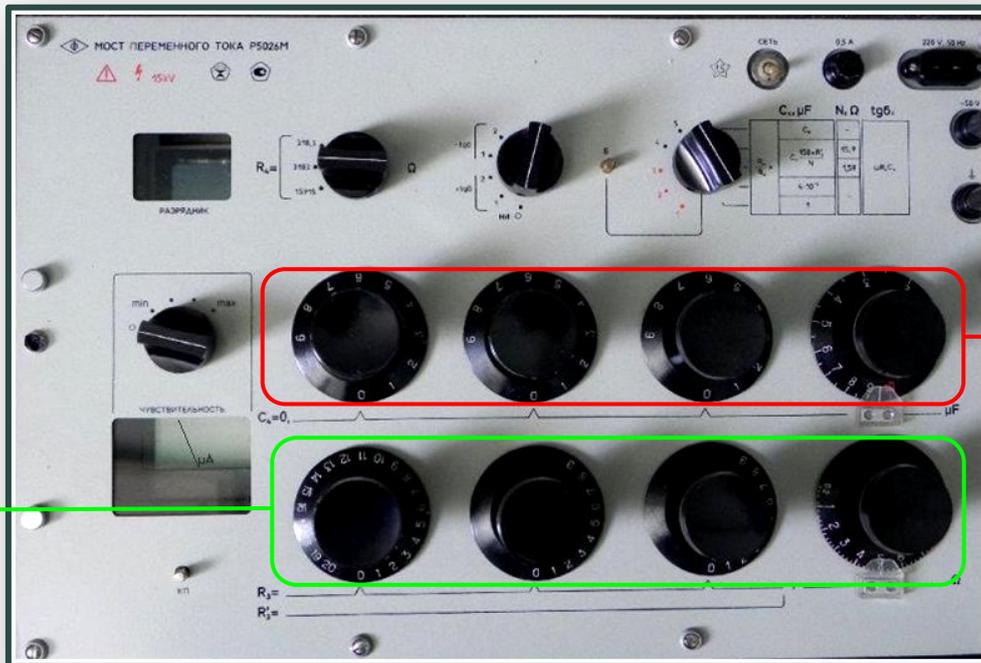


Схема моста переменного тока P5026

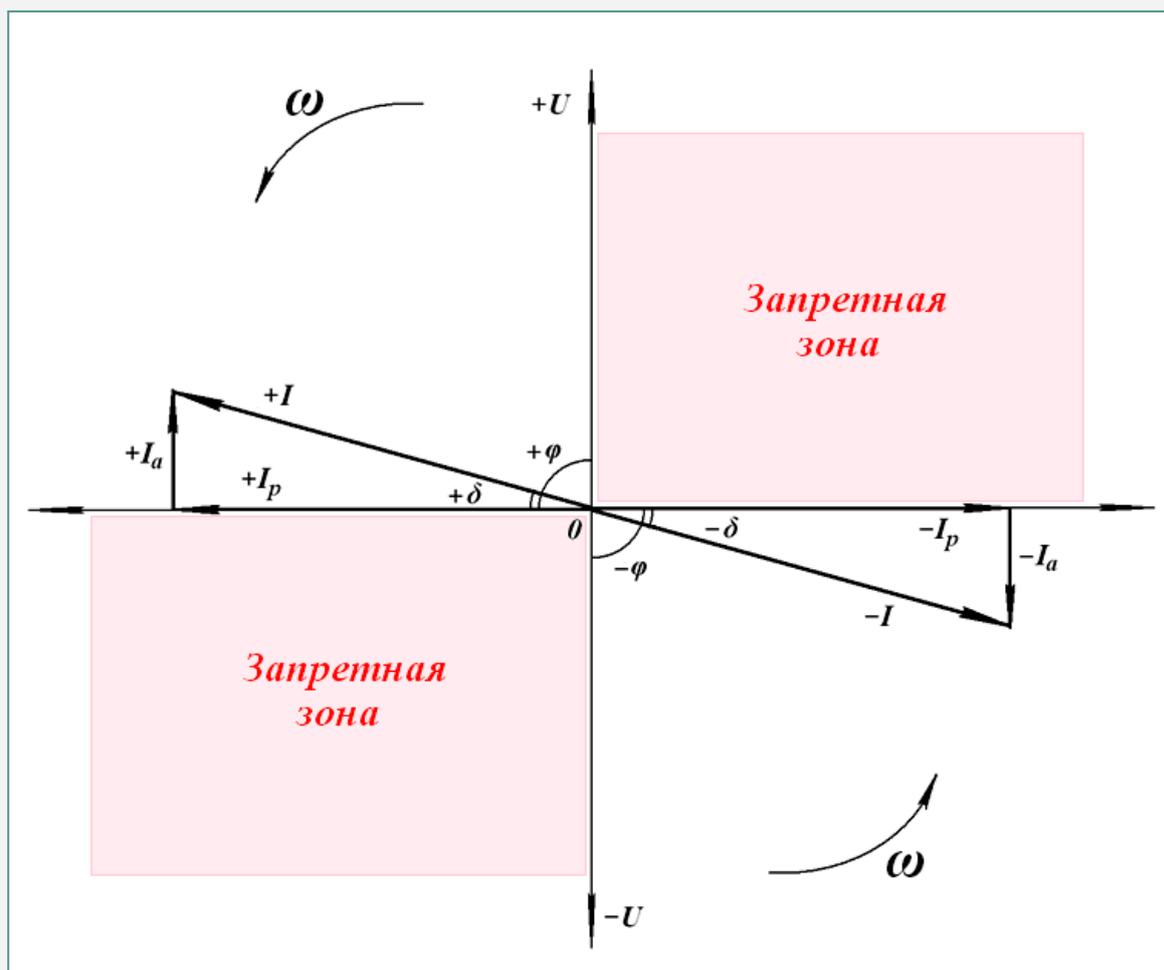


Лицевая панель моста переменного тока P5026M

3. Измерение $\operatorname{tg}\delta$ в условиях влияния внешнего поля

На величину $\operatorname{tg}\delta$ оказывает влияние не только температура изоляции и величина приложенного к ней испытательного напряжения, так называемого «напряжения возбуждения», но и величина внешнего электромагнитного поля. Последнее может достигать значений, сопоставимых со значением напряжения возбуждения изоляции объекта испытаний, вызывая значительные погрешности измерений.

Сначала рассмотрим векторную диаграмму при измерении $\operatorname{tg}\delta$ в идеальных условиях (при отсутствии внешних электромагнитных полей):



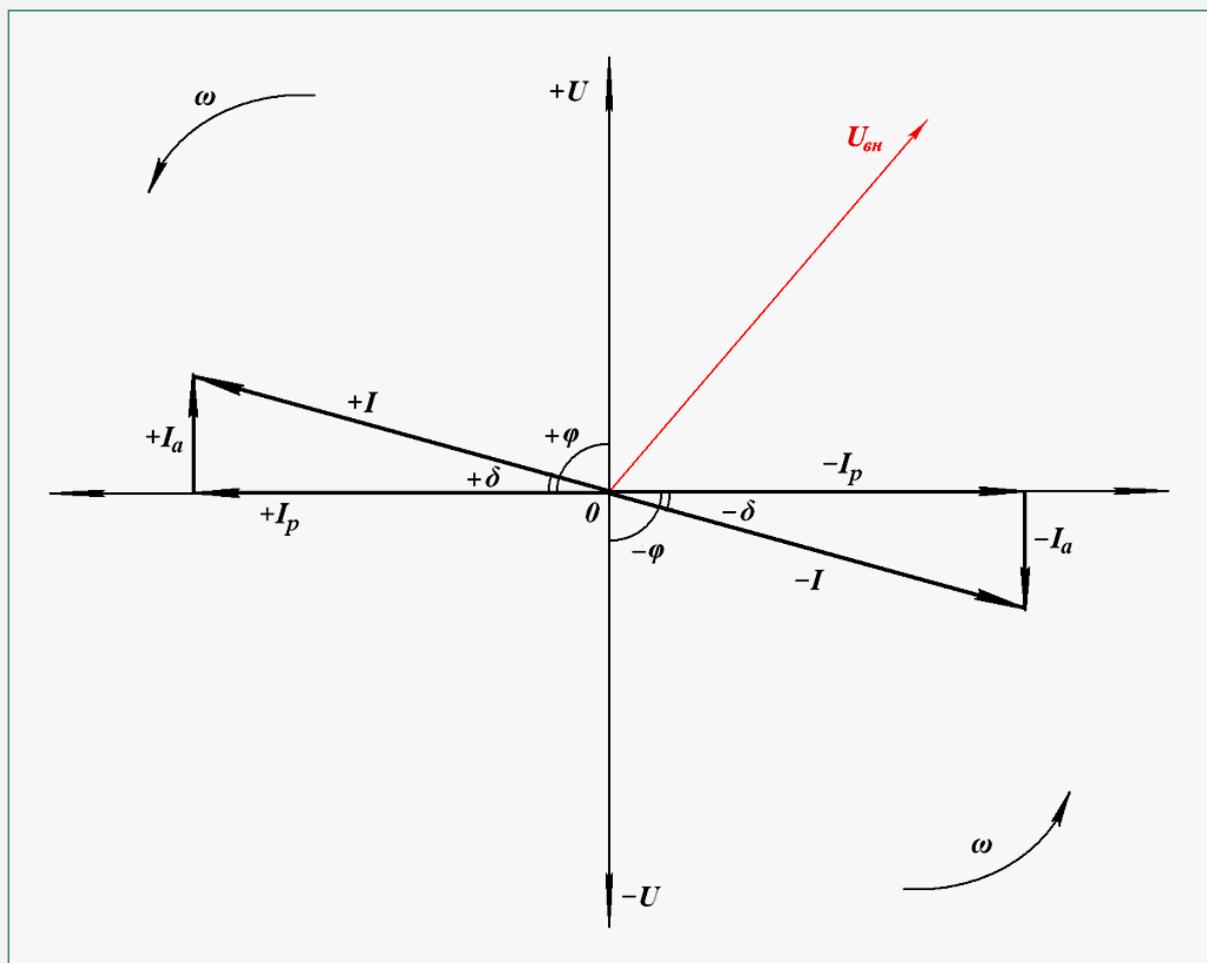
Для того, чтобы убедиться в отсутствии влияния внешних полей при выполнении измерений $\operatorname{tg}\delta$ выполняют два измерения: первое измерение при «положительном» значении напряжения возбуждения, фаза которого условно принимается равной 0° , а второе измерение при «отрицательном» значении напряжения возбуждения, переключив фазу напряжения возбуждения на 180° . На векторной диаграмме, показанной выше, векторы и углы со знаком «+» соответствуют измерениям при «положительном» значении напряжения возбуждения, а векторы и углы со знаком «-» соответствуют измерениям при «отрицательном» значении напряжения возбуждения измерительной схемы.

Если измеренные значения тангенса угла диэлектрических потерь в обоих случаях будут равны между собой, это говорит об отсутствии влияния внешних полей. Как видим на векторной диаграмме, углы диэлектрических потерь при этом равны между собой:

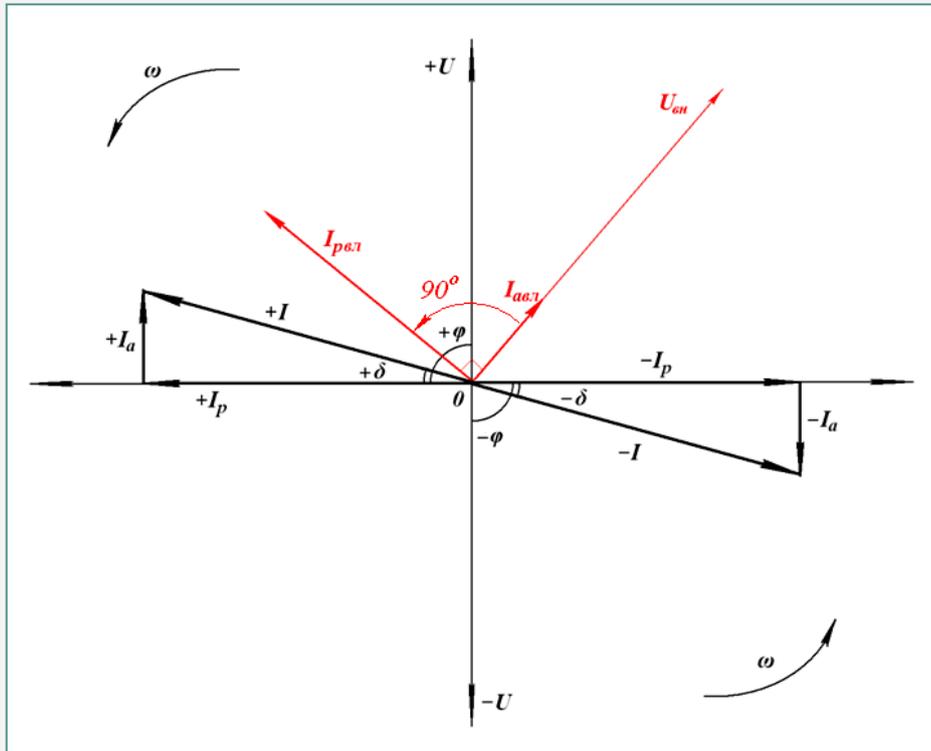
$$+\delta = -\delta, \text{ следовательно: } +\operatorname{tg}\delta = -\operatorname{tg}\delta$$

При наличии влияния внешнего электромагнитного поля значительной напряжённости, на изоляцию контролируемого объекта, помимо напряжения возбуждения, воздействует напряжение внешнего электромагнитного поля, вызывая протекание тока влияния через изоляцию контролируемого объекта.

В общем случае частота и фаза тока влияния внешнего поля $I_{вн}$ не совпадает с частотой и фазой тока возбуждения I . Чтобы упростить понимание происходящих процессов при измерении $tg\delta$ в условиях влияния внешнего электромагнитного поля, рассмотрим частный случай, когда частота тока влияния совпадает с частотой тока возбуждения изоляции контролируемого объекта, но не совпадает по фазе. Построим векторную диаграмму для этого случая, считая, что напряжение внешнего поля $U_{вн}$ не совпадает по фазе с напряжением возбуждения U схемы измерений тангенса угла диэлектрических потерь (в нашем примере отстаёт на некоторый произвольный угол, приблизительно равный $40^\circ \div 45^\circ$):



Через изоляцию объекта контроля будет протекать ёмкостный (реактивный) ток влияния $I_{рвл}$, вызванный влиянием внешнего напряжения $U_{вн}$, который на 90° опережает это напряжение, а также активный ток $I_{авл}$, который совпадает по фазе с внешним напряжением $U_{вн}$ (см. векторную диаграмму ниже):

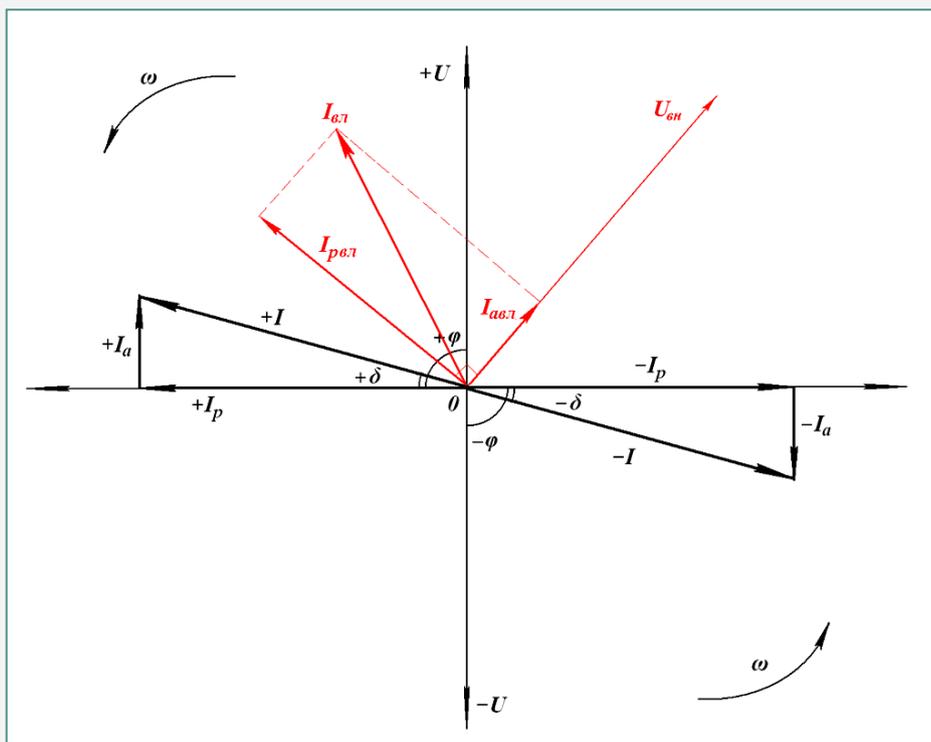


$U_{вн}$ – напряжение от воздействия внешнего поля;

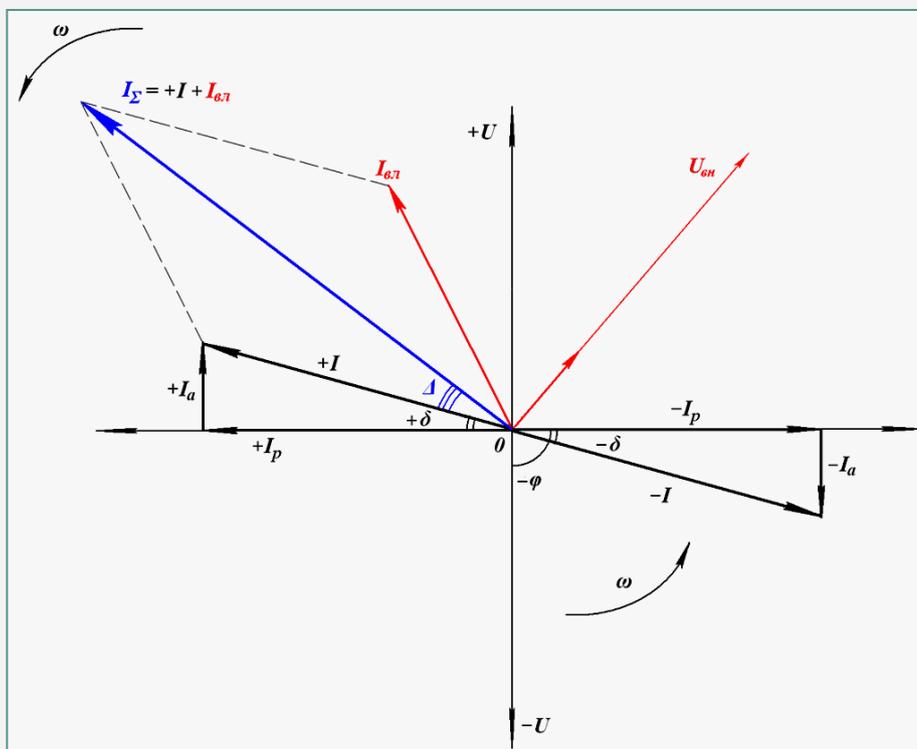
$I_{рв\lambda}$ – реактивная составляющая тока влияния;

$I_{ав\lambda}$ – активная составляющая тока влияния.

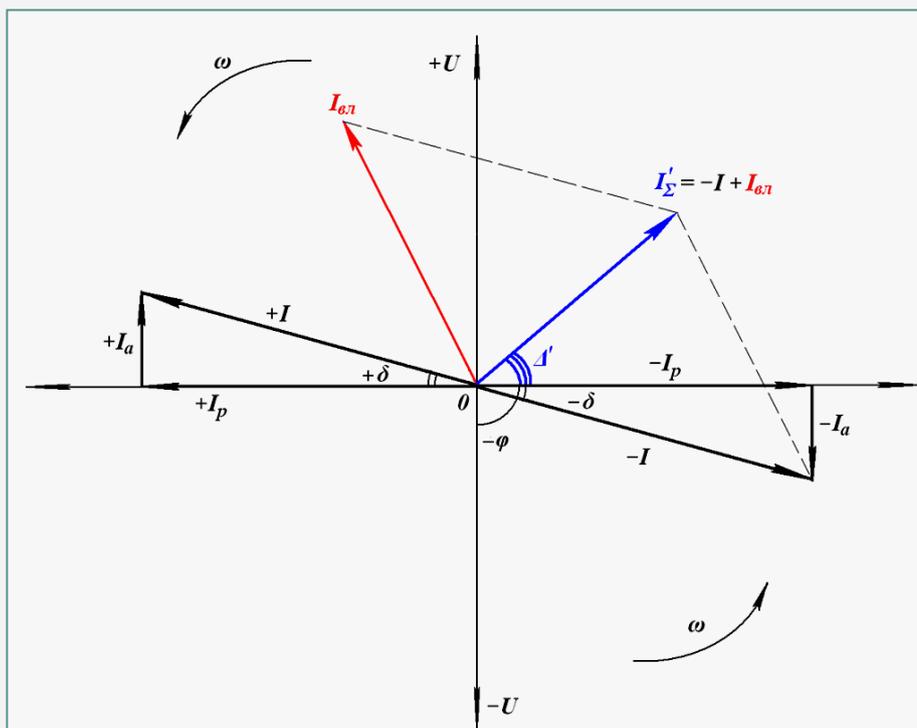
В результате сложения векторов активной $I_{ав\lambda}$ и реактивной $I_{рв\lambda}$ составляющих получается вектор тока влияния $I_{вл}$, как показано на векторной диаграмме ниже:



Ток влияния $I_{вл}$, суммируясь с током возбуждения $+I$, вызывает изменение угла диэлектрических потерь $+\delta$ на некоторый угол Δ , внося погрешность измерения тангенса угла диэлектрических потерь при «положительном» напряжении возбуждения, так как теперь фактически измеряется не $+tg\delta$, а $+tg(\delta+\Delta)$ (см. векторную диаграмму ниже):



При «отрицательном» напряжении возбуждения получается следующая картина:

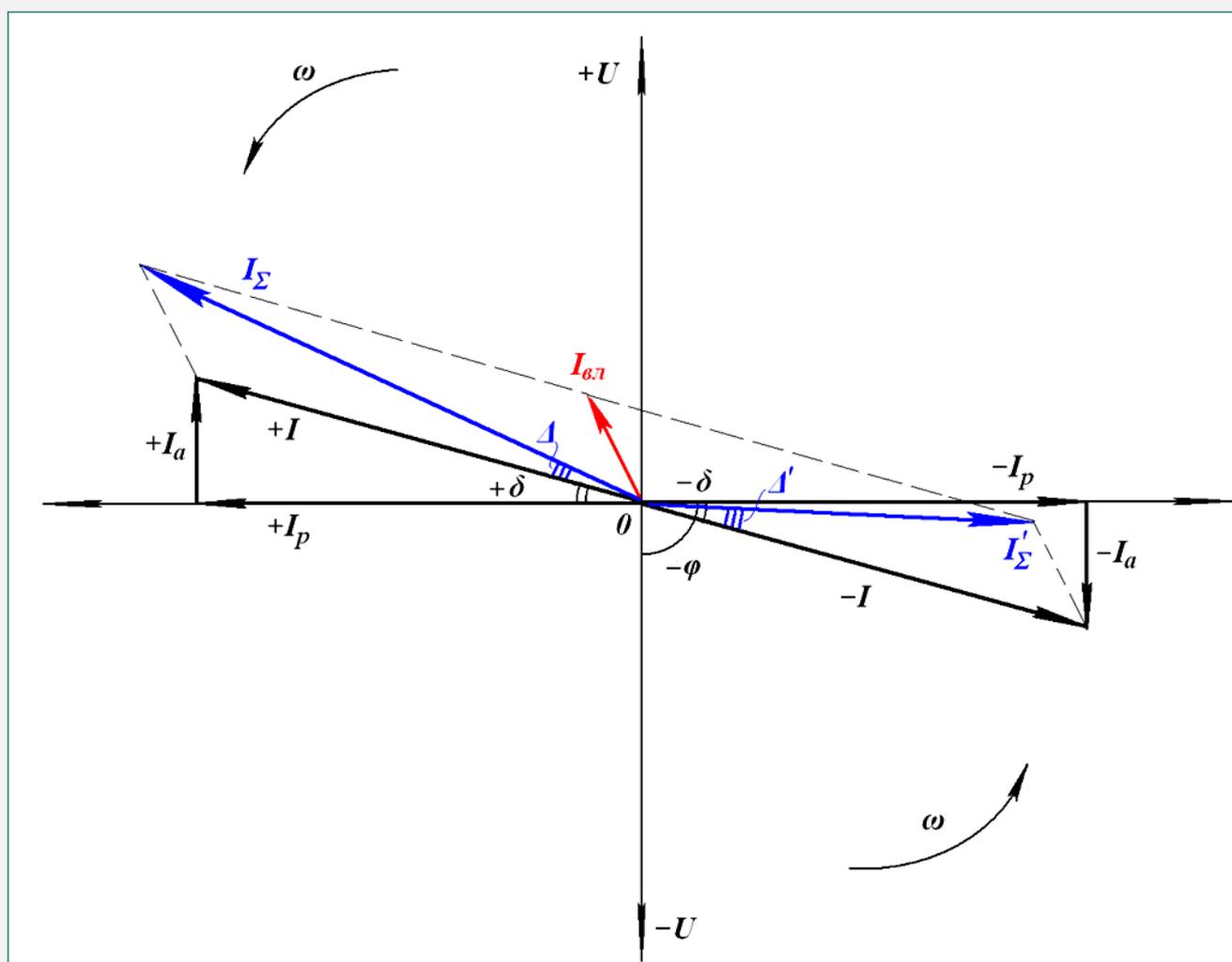


Как хорошо видно на векторной диаграмме, ток влияния вызывает неприемлемо большую погрешность, смещая суммарный вектор I_{Σ} в «запретную зону» (в нашем случае – в первый квадрант),

где тангенс угла диэлектрических потерь принимает отрицательное значение из-за того, что результирующий вектор I_{Σ}' стал опережающим по отношению к вектору реактивной составляющей напряжения возбуждения $-I_p$, чего в принципе быть не должно (в нормальных условиях). В такой ситуации сказать что-либо определённое об истинном значении $tg\delta$ невозможно, так как теперь мост измеряет не тангенс угла диэлектрических потерь δ , а тангенс угла Δ' , который может отличаться от истинного значения $tg\delta$ в десятки раз!

Естественно, описанная выше ситуация доставляет массу проблем операторам испытательных лабораторий, выполняющим измерения тангенса угла диэлектрических потерь с целью контроля качества изоляции высоковольтного электрооборудования в действующих электроустановках напряжением 330 кВ и выше.

В электроустановках напряжением до 110 кВ влияние внешних электромагнитных полей выражено не столь значительно, поэтому здесь получение отрицательного значения тангенса угла диэлектрических потерь при его измерениях встречается реже. Воздействие небольших токов влияния выглядит на векторной диаграмме следующим образом:



Как видим, в данном случае углы Δ и Δ' , вызывающие погрешность измерений $tg\delta$, имеют небольшую величину и приблизительно равны между собой, поэтому, измерив $+tg(\delta+\Delta)$ при положительной фазе напряжения возбуждения и измерив $-tg(\delta-\Delta')$ при отрицательной фазе напряжения возбуждения, можно затем вычислить среднее арифметическое полученных результатов измерений и тем самым уменьшить погрешность этих измерений расчётным методом, используя простую формулу:

$$tg\delta \approx \frac{tg(\delta+\Delta)+tg(\delta-\Delta')}{2} \quad (12)$$

Подчеркнём ещё раз, что этот метод приемлем лишь при незначительной напряжённости внешнего электромагнитного поля, когда результаты измерений тангенса отличаются не более чем на $\pm 10\%$.

Вот что говорится в известном **Сборнике методических пособий по контролю состояния электрооборудования** под редакцией Ф.Л.Когана, ОАО «Фирма ОРГРЭС», Москва, 2001г.:

2.4.3 Токи влияния и их исключение

Токи влияния электрического поля протекают по ёмкостным связям объекта контроля с находящимися под рабочим напряжением элементами распределительного устройства (оборудованием, системой шин и т.п.). Некоторая часть тока влияния связана с короной на этих элементах. Источниками токов влияния являются фазные напряжения сети.

Ток влияния определяется габаритными размерами контролируемого объекта, его расположением и номинальным напряжением распределительного устройства.

Протекая через измерительный элемент СИ и складываясь с подлежащим контролю током через изоляцию объекта, ток влияния является источником погрешностей измерения. Наибольшая погрешность измерения $tg\delta$ соответствует случаю, когда ток влияния близок по фазе или сдвинут на 180° по отношению к активной составляющей тока объекта; наибольшая погрешность измерения ёмкости будет при совпадении фаз тока влияния и реактивной составляющей тока объекта.

Уровень помех, создаваемых током влияния, характеризуется коэффициентом влияния – отношением модуля тока влияния к модулю тока через объект. При прочих равных условиях коэффициент влияния и, следовательно, погрешность измерения будут обратно пропорциональны ёмкости объекта. Наибольшие погрешности от токов влияния наблюдаются при контроле вводов и трансформаторов тока.

Обычно ток влияния, протекающий в прямой схеме включения измерительного устройства, много меньше тока влияния при перевёрнутой схеме включения.

Ток рабочего режима, протекающий по токоведущим частям распределительного устройства, также является источником токов влияния, индуктируемых в замкнутых контурах схемы измерений. Наиболее чувствительным элементом в этом случае является измерительный мост, что учитывается при его конструировании. Кроме того, всегда можно изменить положение моста так, чтобы уменьшить индуктивную связь с влияющим элементом.

Помехи в схеме измерений, вызванные обоими влияющими факторами, имеют одинаковый характер; методы их исключения из результатов измерений различий не имеют. В дальнейшем будут рассматриваться лишь влияния электрического поля как основные.

Получить достоверные результаты при измерениях в условиях влияний можно следующими способами:

- уменьшив до приемлемого значения ток влияния;
- повысив напряжение на объекте при измерениях;
- применив помехоустойчивое измерительное устройство;
- исключив погрешность из результатов измерения расчётным методом.

Уменьшить ток влияния можно отключив соседние с контролируемым объекты или установив вокруг него заземлённые экраны (сетки). Этот метод для обычных эксплуатационных измерений нецелесообразен; возможно применение его лишь в исключительных случаях.

Повышение испытательного напряжения не всегда возможно, так как необходим специальный высоковольтный образцовый конденсатор, мощный источник напряжения и при перевёрнутой схеме мост с соответствующей изоляцией.

Способ измерений с применением помехоустойчивого СИ наиболее удобен в эксплуатационных условиях и обеспечивает необходимую достоверность полученных данных.

Используется частотное разделение контролируемого тока и тока влияния. Частота напряжения измерительной установки отличается от промышленной, причём фильтр указателя равновесия обеспечивает подавление помех от токов влияния.

Применяются устройства с частотой напряжения 25 или 100 Гц. При частоте 25 Гц выявляемость дефектов, связанных с увлажнением изоляции, несколько повышается. При частоте 100 Гц наблюдается небольшое снижение значения $\text{tg}\delta$ изоляционных конструкций с преобладанием масла (по сравнению с измеренным при частоте 50 Гц).

При контроле современного, особенно герметизированного оборудования, эти обстоятельства не имеют существенного значения. Выявляемость основных наблюдаемых дефектов такого оборудования практически не зависит от частоты испытательного напряжения (выбранной в указанных пределах).

Наиболее широкое применение получил расчётный метод исключения погрешности, особенно в сочетании с методом измерений при совмещении фаз тока объекта и тока влияния.

Исключение погрешности от токов влияния расчётным методом производится по результатам двух измерений, проведённых при фазах напряжения испытательной установки, отличающихся на 180° (метод двух измерений). Расчёт результата измерений производится по формулам:

$$\text{tg}\delta = \frac{\text{tg}\delta' R_3'' + \text{tg}\delta'' R_3'}{R_3' + R_3''} = \frac{\text{tg}\delta' C_X' + \text{tg}\delta'' C_X''}{C_X' + C_X''}$$

$$C_X = \frac{C_0 R_4}{2} \left(\frac{1}{R_3'} + \frac{1}{R_3''} \right) = \frac{C_X' + C_X''}{2}$$

Одним штрихом обозначены результаты первого измерения, а двумя штрихами – результаты второго измерения.

Значения $\text{tg}\delta$ подставляются в формулу с тем знаком, с каким они были получены при измерениях.

Если результаты обоих измерений ёмкости не отличаются более чем на 10 %, то допускается расчёт по упрощённой формуле:

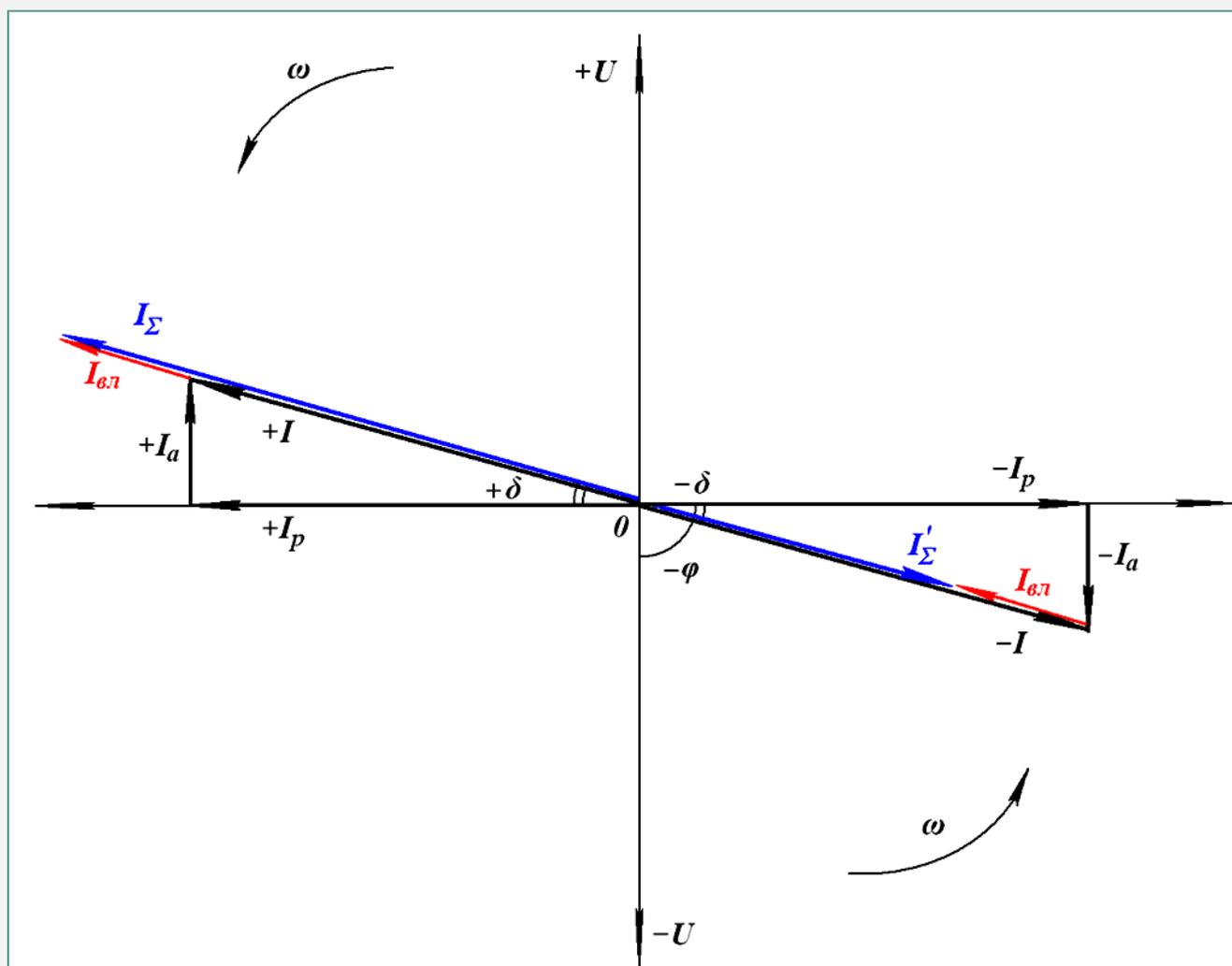
$$\text{tg}\delta = 0,5(\text{tg}\delta' + \text{tg}\delta'').$$

Расчётное исключение погрешностей по методу двух измерений следует применять в случаях, когда оба измеренные значения $\text{tg}\delta$ положительны. При получении при одном измерении отрицательного значения $\text{tg}\delta$ можно предварительно снизить погрешность подбором фазы сети питания измерительного устройства и лишь потом производить исключение остаточной погрешности расчётом.

Приведенные формулы верны при любом токе влияния. Однако на практике невозможно обеспечить измерение без погрешностей и при значительных токах влияния, когда при одной из полярностей питания будет измерено большое отрицательное значение $\text{tg}\delta$, расчётное значение $\text{tg}\delta$, определённое как разность больших значений, будет иметь недопустимое отклонение от действительного. В этом случае измерения следует производить методом совмещения фаз, а остаточную погрешность исключать расчётом по приведенным формулам.

Метод измерений путём совмещения фаз тока через объект и тока влияния заключается в предварительном выборе фазы напряжения, подаваемого на объект, таким образом, что при обоих измерениях, проведённых при отличающихся на 180° фазах питания измерительного устройства, будут получены одинаковые или хотя бы положительные значения $\text{tg}\delta$. Остаточная погрешность измерения исключается расчётным методом, описанным в предыдущем разделе.

Построим векторную диаграмму, поясняющую метод измерений тангенса угла диэлектрических потерь путём совмещения фаз тока возбуждения и тока влияния при помощи фазорегулятора:



Как видим, в данном случае вектор тока влияния $I_{\epsilon l}$ совпадает по фазе с вектором тока возбуждения I , изменяя амплитуду последнего, однако его фаза относительно напряжения возбуждения измерительной схемы остаётся неизменной. Следовательно, угол диэлектрических потерь δ , а также его тангенс $tg\delta$, тоже останутся неизменными, т.е. такими, какими они бы были при отсутствии влияния внешнего поля!

Поэтому данный метод измерения тангенса угла диэлектрических потерь в условиях влияния внешнего электромагнитного поля, несмотря на его сложность и трудоёмкость, до сих пор остаётся наиболее распространённым.

Цитируем далее **Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования** под редакцией Ф.Л.Когана, (подраздел 2.4.3 Токи влияния и их исключение):

Схема измерительного устройства для измерений $\operatorname{tg}\delta$ методом совмещения фаз (см. рис.) содержит фазорегулятор, коммутатор фазы питания (0° - 180°), регулятор напряжения с испытательным трансформатором и измерительный мост. Для измерений при прямой схеме включения заземляется точка «Э» моста и соединённый с ней вывод трансформатора; для измерений по перевёрнутой схеме заземляется другой вывод трансформатора.

Выбор фазы напряжения питания измерительного устройства производится методом последовательных приближений (см. табл.).

Если оба значения $\operatorname{tg}\delta$, полученные при измерениях на этапах 4 и 5, будут положительными, по ним можно рассчитать действительные значения параметров. При получении на одном из этапов отрицательного значения $\operatorname{tg}\delta$ процесс коррекции фазы (этапы 3, 4 и 5) следует повторить ещё один-два раза. Наибольшая точность измерений будет получена при полном совпадении фаз тока через объект и тока влияния; при этом практически совпадают результаты измерений $\operatorname{tg}\delta$ при фазах напряжения питания, отличающихся на 180° . Если $\operatorname{tg}\delta' - \operatorname{tg}\delta'' \leq 5 \cdot 10^{-3}$, то в качестве действительного значения $\operatorname{tg}\delta$ принимается полусумма измеренных.

Следует учитывать, что при некоторых дефектах изоляции действительное (измеренное) значение $\operatorname{tg}\delta$ даже при отсутствии помех может быть отрицательным. Поэтому, получив при обоих измерениях с переменной на 180° фазы питания отрицательные, но близкие по значению результаты, следует прекратить коррекцию фазы питания фазорегулятором и по данным этих уравниваний моста рассчитать значения контролируемых параметров.

При прямой схеме включения измерительного устройства не обязательна расшиновка ряда объектов (трансформаторов тока, вводов). Достаточно отключить шины ближайшими разъединителями и выбрать испытательный трансформатор, имеющий необходимую мощность.

При этом надо учитывать возможность дополнительной погрешности от тока влияния, протекающего с шин через испытательный трансформатор. Падение напряжения от тока влияния на сопротивлении короткого замыкания трансформатора входит в напряжение, подаваемое на мостовую схему, причём при перемене фазы питания на 180° фаза этого падения напряжения не меняется. В итоге при перемене на 180° фазы питания напряжение на мостовой схеме меняется на угол, отличающийся от 180° . Это вызывает дополнительную погрешность при методах измерений, основанных на двух уравниваниях моста с переменной фазы питания на 180° .

Значение рассматриваемой погрешности связано с токами влияния, протекающими через измерительный орган и через трансформатор, и сопротивлением короткого замыкания трансформатора.

Наибольшее значение погрешности определения $\operatorname{tg}\delta$:

$$(\Delta \operatorname{tg}\delta)_{\text{нб}} = \frac{I_{B1} \cdot I_{B2}}{\omega C_X U^2} Z_K ,$$

где I_{B1} — ток влияния, протекающий через измерительное устройство;

I_{B2} — ток влияния, протекающий через трансформатор;

C_X — ёмкость объекта;

U — напряжение испытательной установки;

Z_K — сопротивление короткого замыкания трансформатора.

Для измерительных устройств с трансформатором НОМ-10 наибольшее допустимое значение тока, стекающего с шин через трансформатор $I_{B2} = 5$ мА. Если ток превышает это значение, надо принять меры по его снижению или расшиновать объект. В ряде случаев снижение рассматриваемого тока

влияния может быть получено путём соединения вместе шин трёх фаз объекта. Решение об отказе от расшивки объекта принимается после проверки отсутствия недопустимой погрешности.

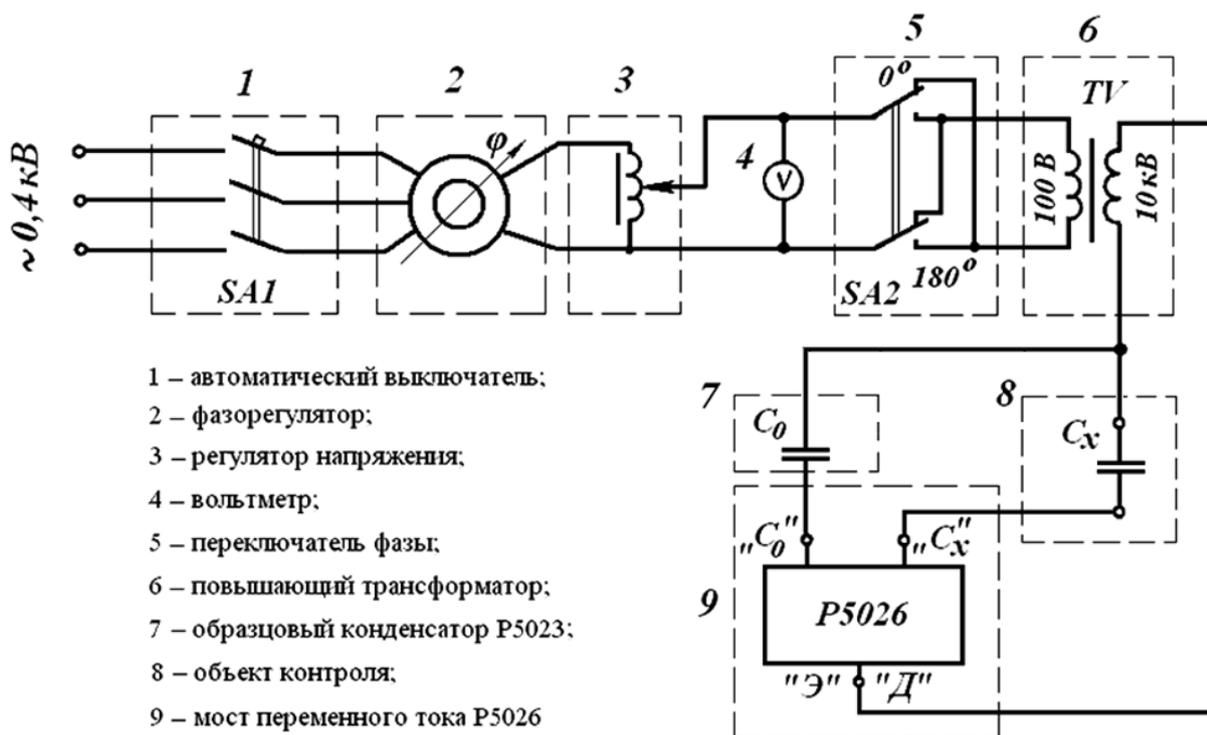
Коэффициент влияния (отношение тока влияния, протекающего через объект, к измеряемому току) может быть определён по результатам двух измерений, проведенных с изменением на 180° фазы напряжения питания:

$$K_{\text{в}} = \left[\frac{(\operatorname{tg}\delta' R_3'' - \operatorname{tg}\delta'' R_3')^2 + (R_3' - R_3'')^2}{(\operatorname{tg}\delta' R_3' + \operatorname{tg}\delta'' R_3'')^2 + (R_3' + R_3'')^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

В случае, когда $\operatorname{tg}\delta' \approx \operatorname{tg}\delta''$, например, при измерениях методом совмещения фаз:

$$K_{\text{в}} \approx \frac{R_3' - R_3''}{R_3' + R_3''}$$

Схема измерительной установки



**Последовательность операций по измерению $\text{tg}\delta$
методом совмещения фаз**

Этап	Условная фаза питания (положение коммутатора)	Устанавливаемые значения плеч моста		Операция
		C_4	R_3	
1	0°	Соответственно ожидаемому $\text{tg}\delta$		Изменяя R_3 и вращая фазорегулятор, уравновесить мост
2	180°	То же, что на этапе 1	Полученное на этапе 1	Уравновесить мост, изменяя R_3 и C_4 ; фазорегулятор — в положении, выбранном на этапе 1
3	180°	Полусумма начального и полученного на этапе 2	Полученное на этапе 2	Уравновесить мост, изменяя R_3 и вращая фазорегулятор
4	0°	То же, что на этапе 3	Полученное на этапе 3	Уравновесить мост, изменяя R_3 и C_4 ; фазорегулятор — в положении, выбранном на этапе 3
5	180°	Полученное на этапе 4	Полученное на этапе 4	Уравновесить мост, изменяя R_3 и C_4 ; фазорегулятор — в положении, выбранном на этапе 3

Примечание: Получив на этапе 2 отрицательное значение $\text{tg}\delta$, для определения значения C_4 на этапе 3 использовать расчетное значение: $C_{4p} = C_4 R_3 / R_4$.

Следует отметить, что в данной таблице по умолчанию опущены промежуточные операции включения и плавного подъёма напряжения возбуждения измерительной схемы и его плавное снижение до нуля на каждом этапе переключения фазы с 0° на 180° и наоборот, а также операция расчёта среднего арифметического значения после выполнения первых двух этапов. Если учесть это всё, то оператору требуется выполнение не менее 20 операций для получения одного единственного значения $\text{tg}\delta$!

Как видим, при измерении $\text{tg}\delta$ в условиях влияния внешнего электромагнитного поля для балансировки моста необходимо регулировать уже не два, а три параметра: ёмкость C_4 , сопротивление R_3 и фазу напряжения питания измерительной установки. Всё это многократно усложняет процесс измерения $\text{tg}\delta$ и требует немало времени для его выполнения.

Естественно, возникает вопрос, а нельзя ли упростить процесс измерений тангенса угла диэлектрических потерь данным методом, который, несмотря на высокую трудоёмкость, позволяет получить в конечном итоге неплохие результаты измерений даже в условиях сильного влияния внешних электромагнитных полей?

Анализируя данный метод измерения $\text{tg}\delta$, нетрудно понять, что выполнение всех промежуточных операций, перечисленных в вышеупомянутой таблице, производится только ради одной цели — нахождения нужной фазы напряжения питания измерительной схемы. Поскольку невозможно изменить фазу напряжения, вызванного внешним переменным электромагнитным полем, остаётся подстраивать фазу напряжения источника питания измерительной установки, чтобы получить разность между этими фазами равную 0° или 180° , как описывается выше. Основным недостатком данного метода заключается в том, что поиск нужной фазы производится вслепую, методом последовательных приближений, сверяясь с результатами, полученными мостом переменного тока, который не предназначен для измерения фазы переменного напряжения или тока.

Продолжая разбираться в данной проблеме, можно прийти к следующему выводу: желательно иметь в составе измерительной установки какое-либо устройство, позволяющее измерять фазу напряжения влияния и фазу напряжения питания, чтобы получить возможность сравнить их между собой, а ещё лучше — устройство одновременного измерения разности этих фаз в режиме реального времени. Тогда

описанная выше проблема решается легко и просто – ориентируясь по показаниям измерителя разности фаз и вращая фазорегулятор в сторону уменьшения этой разности, оператор добивается совпадения векторов тока влияния и тока возбуждения, и далее выполняет измерение $tg\delta$ обычным методом! Не нужно быть великим специалистом в области электрофизических измерений в целом и измерений тангенса угла диэлектрических потерь в частности, чтобы понять – время выполнения измерения $tg\delta$ при этом, по самым скромным оценкам, уменьшится как минимум в десять раз!

4. Как измерить разность фаз напряжения возбуждения и напряжения влияния?

Итак, наступил момент, когда мы подошли вплотную к решению вопроса по реализации «в металле» идеи упрощения измерения $tg\delta$ комбинированным методом, т.е. комбинацией процесса совмещения фаз векторов тока возбуждения и тока влияния с расчётным методом.

Анализируя выше данный метод измерения тангенса угла диэлектрических потерь, мы пришли к выводу, что для получения недостающей информации о разности фаз напряжения питания $\varphi 1$ и напряжения влияния $\varphi 2$ в схему измерительной установки необходимо ввести устройство для измерения разности этих фаз $\Delta\varphi = \varphi 1 - \varphi 2$. Желательно осуществить эту затею с минимальными изменениями существующей схемы измерительной установки. Вторым немаловажным условием является то, что устройство измерения разности фаз не должно оказывать влияния на процесс измерения $tg\delta$ контролируемого объекта, чтобы не вносить дополнительные погрешности.

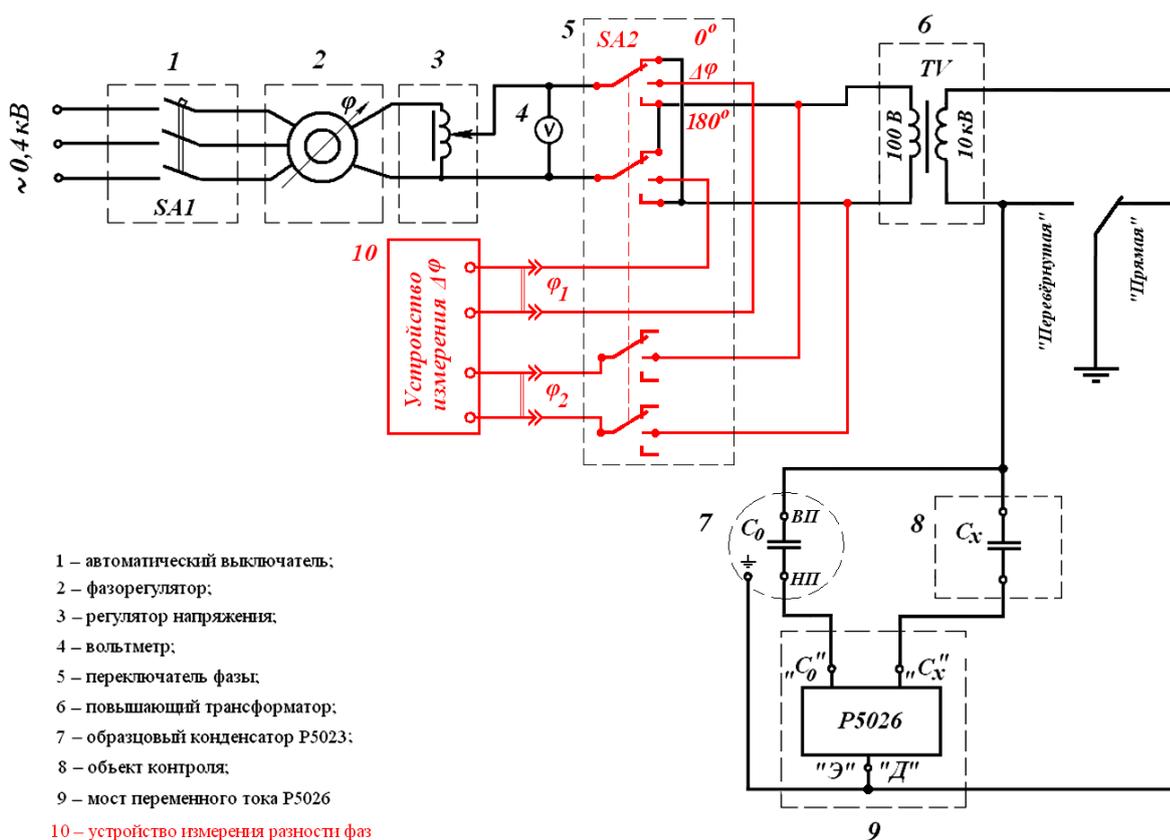
В результате многолетних поисков, исследований и экспериментов, решение данной проблемы было найдено. Для практической реализации измерения разности фаз напряжения питания и напряжения влияния необходимо заменить существующий двухпозиционный переключатель фазы питающего напряжения «0° - 180°» (переключатель SA2 на схеме выше), имеющий две группы переключающих контактов, трёхпозиционным переключателем, который имеет фиксированное нейтральное положение и четыре группы переключающих контактов (переключатель SA2 на схеме, показанной ниже).

К контактам среднего положения первых двух групп нового переключателя SA2 подключается один из входов устройства измерения разности фаз $\Delta\varphi$ для измерения фазы питающего напряжения $\varphi 1$, а второй вход устройства измерения разности фаз другой парой групп контактов переключателя SA2 подключается к низковольтной (100 В) обмотке трансформатора напряжения TV , на клеммах которой за счёт обратной трансформации присутствует напряжение влияния внешнего электромагнитного поля.

Устройство измерения $\Delta\varphi$ одновременно измеряет фазу напряжения влияния $\varphi 2$ и фазу напряжения возбуждения $\varphi 1$, в результате чего оператор получает информацию о разности этих фаз в любом удобном для него виде.

Изменения, внесённые в существующую схему измерительной установки показаны красным цветом на изображении ниже:

Схема измерительной установки после доработки



После такой модернизации схемы измерительной установки, порядок операций, выполняемых оператором, будет следующим:

1. Установить переключатель фазы SA2 в положение измерения разности фаз « $\Delta\varphi$ »;
2. Включить питание измерительной установки (при этом одновременно автоматически включается питание устройства измерения $\Delta\varphi$) и плавно поднять напряжение возбуждения, контролируя его по вольтметру 4;
3. Вращением фазорегулятора 2 установить разность фаз равную 0° или 180° (в зависимости от того, какое значение будет ближе), контролируя значение разности фаз $\Delta\varphi$ по показаниям устройства измерения разности фаз 10;
4. Перевести переключатель фазы SA2 в положение « 0° » и измерить значение $tg\delta$ мостом переменного тока P5026;
5. Перевести переключатель фазы SA2 в положение « $\Delta\varphi$ » и проверить значение разности фаз по показаниям устройства измерения разности фаз 10, которое должно быть равно 0° или 180° (в зависимости от того, какое значение было установлено на этапе 3). При необходимости, подстроить его фазорегулятором 2;
6. Перевести переключатель фазы SA2 в положение « 180° » и измерить значение $tg\delta$ мостом переменного тока P5026.
7. Сверить полученные результаты измерений $tg\delta$, которые должны быть положительными и равными между собой. Если результаты измерений тангенса, полученные при положениях переключателя фазы SA2 на « 0° » и « 180° », отличаются не более чем на 10 %, рассчитать среднее арифметическое значение по упрощённой формуле:

$$tg\delta = 0,5(tg\delta_{0^\circ} + tg\delta_{180^\circ})$$

5. Чем измерить разность фаз напряжения возбуждения и напряжения влияния?

Существует несколько методов измерения разности фаз синусоидального напряжения (или тока), как и довольно большой выбор измерительных приборов, реализующих различные методы измерения разности фаз.

Наша цель – выбрать оптимальное с практической точки зрения техническое решение. Устройство измерения разности фаз должно быть несложным, недорогим, малогабаритным, надёжным, простым в использовании и достаточно точным.

Ниже рассматривается несколько вариантов, удовлетворяющих в той или иной степени вышеизложенным требованиям.

Измеритель разности фаз ИРФ-1/1



ИРФ-1/1. Общие данные

Измеритель разности фаз ИРФ-1/1 предназначен для измерения в режимах автономного и дистанционного управления следующих параметров переменных напряжений, действующих как в обычных, так и в гальванически развязанных цепях:

- 1) разности фаз двух синусоидальных напряжений;
- 2) среднеквадратического значения синусоидальных напряжений;
- 3) частоты переменного напряжения, действующего на входе "1" прибора.

- Прибор ИРФ-1/1 обеспечивает в обзорном режиме одновременное измерение разности фаз, частоты и среднеквадратического значения синусоидального напряжения, действующего на входе "1" прибора.

- Прибор ИРФ-1/1 обеспечивает также измерение разности фаз на фиксированных частотах 25, 50 и 75 Гц в условиях воздействия помех, уровни которых не превышают уровни входных сигналов. На рабочих частотах 25 и 75 Гц частота помехи равна промышленной частоте (50 ± 1) Гц, на рабочей частоте 50 Гц частота помехи равна ($25 \pm 0,5$) Гц или ($75 \pm 1,5$) Гц.

- Прибор ИРФ-1/1 выдерживает перегрузку переменным напряжением 300 В по каждому входу. В приборе ИРФ-1 предусмотрена возможность подсветки индикатора.

- Питание прибора ИРФ-1/1 осуществляется напряжением (220 ± 22) В от сети промышленной частоты (50 ± 2) Гц или при автономном питании) от трёх элементов типа "VARTA", каждый из

которых имеет э.д.с. в пределах от 1 до 1,5 В. Мощность, потребляемая прибором не превышает 5 Вт. Ток, потребляемый от батареи при пониженном напряжении 3,1 В при выключенной подсветке индикатора, не превышает 22 мА, при включенной подсветке - 300 мА. Прибор обеспечивает измерение напряжения автономного источника питания с точностью $\pm 0,1$ В и с разрешающей способностью 0,01 В.

• В приборе ИРФ-1/1 предусмотрен сервисный режим записи, хранения и последующего чтения результатов измерений в постоянной электрически перепрограммируемой памяти, что позволяет облегчить работу оператора при измерениях в полевых условиях. Емкость такой "записной книжки" составляет 1000 записей результатов измерений. Как запись, так и чтение возможны с любого номера строки в пределах от 0 до 999.

- Средняя наработка на отказ прибора не менее 20000 ч.
- Средний срок службы прибора - не менее 10 лет.
- Прибор ИРФ-1/1 может быть использован при определении амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик различных низкочастотных электрических цепей, усилителей, фильтров, аттенюаторов, трансформаторов и т.д.

ИРФ-1/1. Технические характеристики

Диапазон рабочих частот при измерении разности фаз	20...5600 Гц
Диапазон входных напряжений	0,1...250 В
Пределы измерения разности фаз, градусов	0...360
Устанавливаемая разрешающая способность, градусов	1 или 0,1⁰
Предел допускаемой погрешности, градусов	$\pm 1^0$
Диапазон измерения среднеквадратичного значений напряжения	от 0,2 до 250 В
Диапазон рабочих частот при измерении напряжения	от 20 Гц до 10 кГц
Предел допускаемой относительной погрешности измерения синусоидального напряжения в диапазоне частот:	
от 20 до 200 Гц	$\pm 2 \%$
свыше 200 Гц	$\pm 2,5 \%$
Разрешающая способность измерения частоты в диапазоне частот от:	
20 до 999,9 Гц	0,1 Гц
в остальном диапазоне	1,0 Гц
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения частоты:	
в диапазоне частот от 20 до 999,9 Гц	$\pm 0,2$ Гц
в диапазоне частот от 1 до 10 кГц	± 2 Гц
Время измерения разности фаз прибора не превышает	2 с
Входное активное сопротивление прибора по обоим входам не менее	300 кОм
Температура окружающего воздуха, °С	от -10 до +40
Относительная влажность воздуха, при 40°С	до 95%
Габариты прибора	220×65×260 мм
Масса прибора, не более	1,9 кг
Цена прибора	≈ 1000 \$

Измеритель разности фаз Ф2-34



Назначение измерителя разности фаз Ф2-34

Измеритель разности фаз Ф2-34 предназначен для измерения разности фаз между двумя синхронными синусоидальными сигналами с цифровым отображением информации.

Прибор может быть использован для снятия фазовых характеристик радиотехнических цепей, фильтров, усилителей, определения последовательного резонанса кварцевых фильтров и резонаторов и т.д.

Условия эксплуатации, при которых реализуется основная погрешность измерителя разности фаз Ф2-34

Напряжение питающей сети, В	220±4,4
Относительная влажность, %	30-80
Окружающая температура, К (°С)	293±5 (20±5)

Технические характеристики измерителя разности фаз Ф 2-34

Диапазон рабочих частот	от 0,5 Гц до 5МГц		
<p>Диапазон выходных напряжений:</p> <p>- частота (F), Гц $0,5 \leq F < 1$ - частота (F), Гц $1 \leq F < 5$ - частота (F), Гц $5 \leq F < 5 \cdot 10^6$</p>	Непосредственно на входах 1 и 2 прибора	С выносными делителями ДН 1:15	С выносными делителями ДН 1:100
	20 мВ - 2 В 10 мВ - 2 В 2 мВ - 2 В	0,5 В - 30 В 0,15 В - 30 В 30 мВ - 30 В	2 В - 200 В 1В - 200 В 0,2 В - 200 В
Диапазон измерения углов фазового сдвига сигналов в рабочем диапазоне частот	от 0 до 360°		
Разрешающая способность индикатора	0,01°		
<p>Погрешность измерения углов фазового сдвига при равных уровнях входных напряжений непосредственно на входах 1 и 2 прибора в диапазоне от 20 мВ до 2 В на частотах от 0,5 Гц до 1 Гц и в диапазоне от 10 мВ до 2 В на остальных частотах при нестабильности частоты сигналов не более 10^{-4} за минуту, град., не превышает:</p> <p>- частота (F), Гц $0,5 \leq F < 1$ - частота (F), Гц $1 \leq F < 20$ - частота (F), Гц $20 \leq F < 5 \cdot 10^6$</p>	$\pm 0,25/F$ $\pm(0,08+0,1/F)$ $\pm(0,1+10^{-7}F)$		
<p>Погрешность измерения углов фазового сдвига при равных уровнях входных напряжений в диапазоне от 2 мВ до 10 мВ непосредственно на входах 1 и 2 прибора и нестабильности частоты сигналов не более 10^{-4} за минуту, в диапазоне частот от 5 Гц до 5МГц, град., не превышает:</p> <p>- частота (F), Гц $5 \leq F < 5 \cdot 10^6$</p>	$\pm(0,5+10^{-7}F)$		
<p>Погрешность измерения углов фазового сдвига из-за неравенства уровней входных напряжений непосредственно на входах 1 и 2 прибора относительно уровня 2 В в диапазоне частот от 0,5 Гц до 200 кГц не должна превышать:</p> <p>- частота (F), Гц $0,5 \leq F < 1$ - частота (F), Гц $1 \leq F < 5$ - частота (F), Гц $5 \leq F \leq 2 \cdot 10^5$</p>	Перепад (A) уровней входных напряжений непосредственно на входах 1 и 2 прибора, дБ		
	$0 < A \leq 20$	$20 < A \leq 40$	$40 < A \leq 60$
	$\pm 0,1 A^\circ$ $\pm 0,075 A^\circ$ $\pm 0,03 A^\circ$	$\pm 0,3 A^\circ$ $\pm 0,075 A^\circ$ $\pm 0,03 A^\circ$	- - $\pm 0,03 A^\circ$
<p>Погрешность измерения углов фазового сдвига из-за неравенства уровней входных напряжений непосредственно на входах 1 и 2 прибора относительно уровня 2 В в диапазоне частот от 200 кГц до 5 МГц не превышает:</p> <p>- частота (F), Гц $2 \cdot 10^5 < F \leq 2 \cdot 10^6$ - частота (F), Гц $2 \cdot 10^6 < F \leq 5 \cdot 10^6$</p>	Перепад (A) уровней входных напряжений непосредственно на входах 1 и 2 прибора, дБ		
	$0 < A \leq 40$	$40 < A \leq 60$	

	$\pm 0,05 \text{ A}^\circ$ $\pm 0,1 \text{ A}^\circ$	$\pm 0,075 \text{ A}^\circ$ $\pm 0,15 \text{ A}^\circ$
Входное активное сопротивление, Ом, не менее	1	
Входная емкость, пФ, не более	25	
Входное активное сопротивление и входная емкость прибора с подключенными выносными делителями ДН 1:15 и ДН 1:100	не менее 1 МОм и не более 15 пФ	
Прибор сохраняет свои технические характеристики в пределах норм при питании его от сети переменного тока: - напряжением, В - частотой, Гц	220±22 50±0,5	
Мощность, потребляемая прибором от сети при нормальном напряжении, не превышает	35 В·А	
Наработка на отказ прибора, часов, не менее	2000	
Габаритные размеры прибора Ф2-34 , мм	317×95×320	
Масса прибора Ф2-34 , кг	4,8	
Цена прибора	≈ 3500 -3600\$	

Как видим, цены на цифровые измерители разности фаз промышленного изготовления довольно «кусачие». Гораздо дешевле самостоятельно собрать несложную схему для измерения разности фаз, тем более, что нам не требуется прецизионная точность измерений, а достаточно точности всего лишь $\pm 5^\circ$, чтобы получить оба положительные значения тангенса угла диэлектрических потерь.

Ниже приводится описание двух несложных схем для измерения разности фаз, отвечающих всем вышеизложенным требованиям, которые когда-то были опубликованы в журнале «Радио».

Электронный фазометр

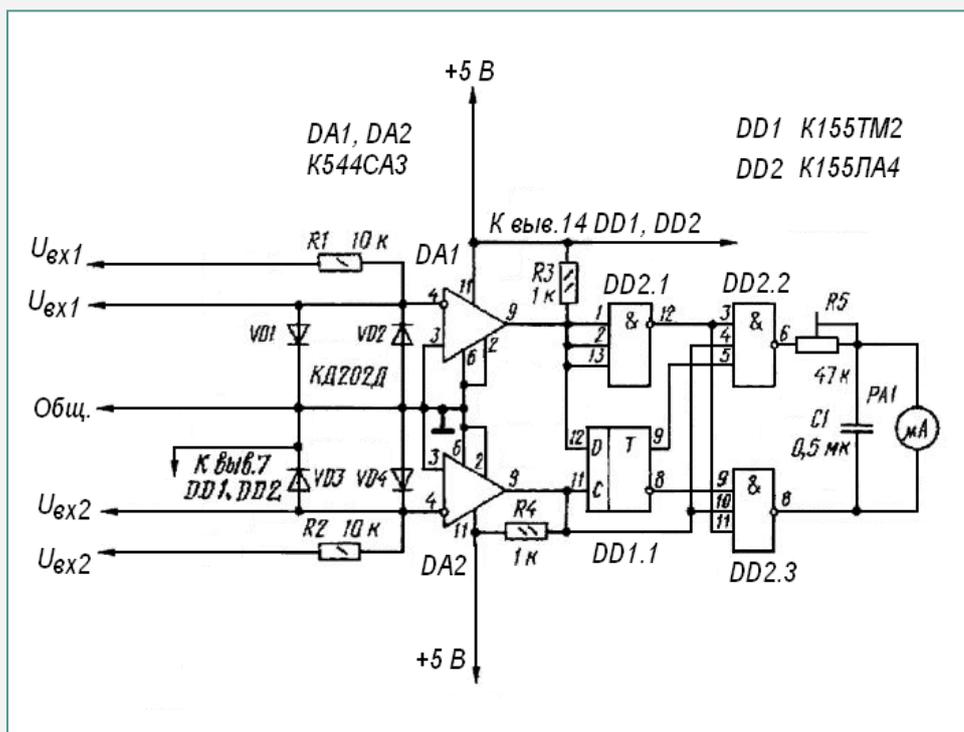
Фазометр предназначен для измерения углов сдвига фаз между двумя периодически изменяющимися электрическими колебаниями и может быть применён в радиолюбительской практике при разработке, регулировке и эксплуатации электронных и электротехнических аппаратов и устройств. Предлагаемый электронный фазометр даёт одновременно информацию о знаке и величине угла сдвига фаз, что делает её более наглядной. В приборе удалось существенно упростить узлы выделения величины и знака угла и совместить функции отдельных элементов.

Основные технические характеристики

- Диапазон измеряемых углов сдвига фаз, эл. град **0...180**
- Диапазон рабочих частот, Гц **10...104**
- Диапазон входных напряжений, В..... **0,01...50**
- Диапазон измеряемых токов, А..... **0,01...2**
- Погрешность измерения, %.....не более **2**

Описание принципиальной схемы

Принципиальная схема электронного фазометра приведена на рисунке 1.



Принципиальная схема электронного фазометра

Входные напряжения $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ произвольной формы (например, синусоидальные) от измеряемых цепей через делители $R1$ и $R2$ поступают на вход формирователей $DA1$ и $DA2$ (компараторы напряжения) и преобразуются в однополярные прямоугольные импульсы с достаточно крутыми фронтами и спадами. Ширина импульсов соответствует длительности полупериода входного сигнала, что иллюстрируется временными диаграммами, представленными на рисунке 2.

Динамический D-триггер ($DD1$) выделяет знак угла сдвига фаз, т.е. фиксирует в момент формирования фронта импульса второго измерительного канала, используемого в данной схеме в качестве синхронизирующего (тактового), опережающий или отстающий характер сигнала первого

измерительного канала, выход формирователя которого соединён с информационным входом D-триггера. При этом синхронизирующий импульс своим фронтом переводит D-триггер в состояние, определяемое уровнем напряжения на его информационном входе в данный момент времени. Поэтому, если входное напряжение $U_{вх1}$ опережает по фазе напряжение $U_{вх2}$ то на прямом выходе D-триггера (вывод 9 DD1.1) устанавливается напряжение, соответствующее логической единице, а на инверсном выходе – логическому нулю.

Измеритель величины угла сдвига фаз реализован на базе элемента совпадения (DD2.2), один из входов которого (4) непосредственно соединён с выходом формирователя DA2, а другой (3) – через инвертор DD2.1 с формирователем DA1 измерительного канала. Ширина формируемого импульса на выходе такого элемента пропорциональна углу взаимного перекрытия входных импульсов, т.е. углу сдвига фаз между напряжениями $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$. Объединение информации о величине и знаке угла в рассматриваемой схеме осуществляется за счёт введения в её состав ещё одного элемента совпадения (DD2.3), выполняющего те же функции измерения величины угла, что и описанный выше. Однако, каждый из этих элементов ЗИ-НЕ (DD2.2 и DD2.3) одним из своих входов соединён соответственно с прямым и инверсным выходами D-триггера, в результате чего последний и определяет, на выходе какого из элементов совпадения выделяется импульс, по ширине равный углу сдвига фаз.

Измерительный прибор PA1 включён между выходами элементов совпадения DD2.2 и DD2.3, образуя при этом дифференциальную схему, вследствие чего его стрелка будет отклоняться в сторону, определяемую знаком угла, и на угол, соответствующий углу сдвига фаз между напряжениями $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$. Конденсатор C1, включённый параллельно индикатору PA1, предназначен для уменьшения пульсации стрелки при измерениях на низких частотах.

Построение входных цепей фазометра позволяет измерять угол сдвига фаз не только между двумя напряжениями, но и между током и напряжением или между двумя токами, для чего входные делители снабжены соответствующими выводами.

Конструкция и детали

Электронный фазометр выполнен в виде отдельного блока. На лицевую панель выведены входные клеммы измерительных каналов, микроамперметр, шкала которого проградуирована в эл. град., и выключатель питающей сети. Элементы прибора смонтированы на печатной плате, изготовленной из одностороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм и закрепленной непосредственно на измерительных зажимах микроамперметра. Соединения печатной платы с входными клеммами прибора выполнены экранированным проводом, что обеспечивает его помехоустойчивость.

В устройстве использованы резисторы МЛТ и СПЗ-16 (R5), конденсатор C1 – типа МБМ, а в качестве индикатора PA1 используется микроамперметр типа М906 с двусторонней шкалой (50-0-50) мкА.

Вместо указанных в данной схеме могут быть использованы микросхемы других серий аналогичного функционального назначения при выборе соответствующего напряжения для их питания.

Формирователи однополярных импульсов DA1 и DA2 могут быть выполнены не только на базе функциональных микросхем К554СА3 или 521СА3, но и на операционных усилителях или транзисторных каскадах, работающих в ключевом режиме и обеспечивающих требуемую крутизну формируемых фронтов импульсов.

Диоды VD1÷VD4 выбираются из условий длительного протекания по ним измеряемого тока. Если же фазометр предназначен для измерения сдвига фаз только между двумя напряжениями, то указанные диоды можно заменить любыми другими без предъявления требований по току.

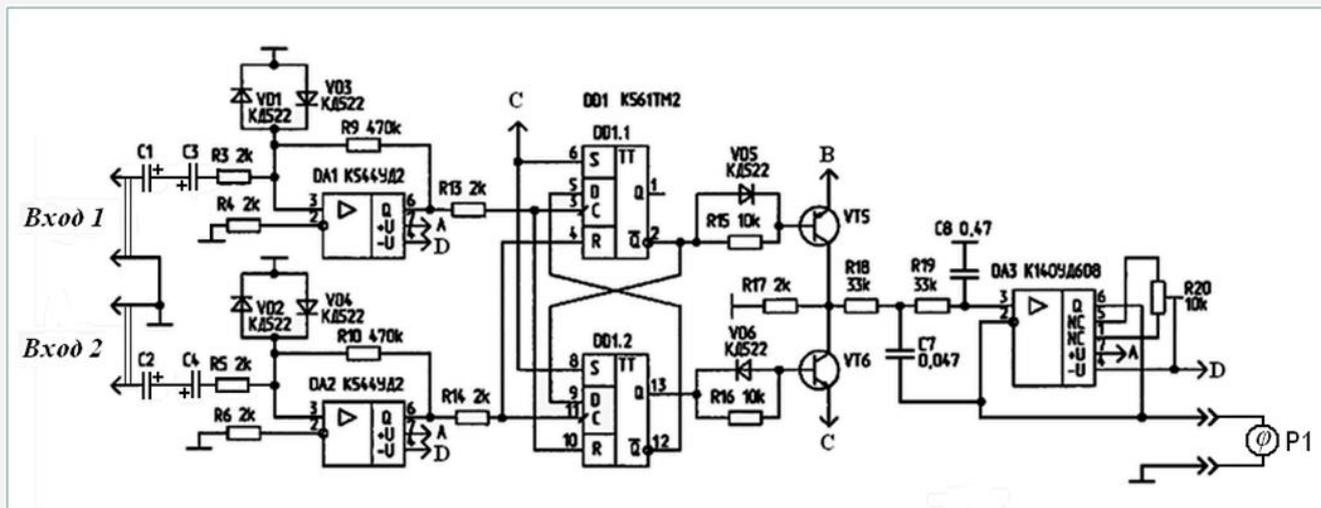
Питание устройства осуществляется от источника однополярного стабилизированного напряжения +5 В, выполненного по любой типовой схеме.

Расширение пределов измерения по напряжению входного сигнала можно осуществить за счёт пропорционального изменения параметров резисторов R1 и R2.

Далее приводится более сложная схема измерения разности фаз, выполненная в качестве приставки к электронному цифровому мультиметру.

Фазометр с импульсным частотно-фазовым детектором

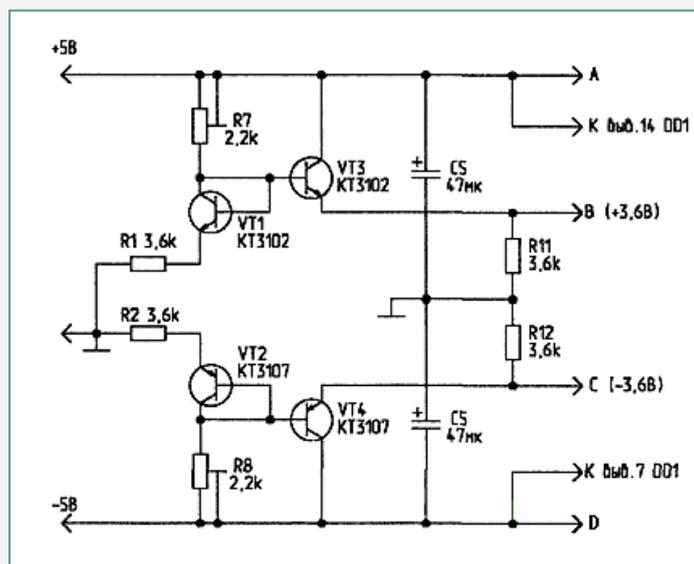
В отличие от фазометров с детектором на RS-триггере или по схеме «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ», фазометр с импульсным частотно-фазовым детектором (ИЧФД) позволяет измерять не только сдвиг фаз, но и фиксировать знак сдвига (опережение или запаздывание). Предлагаемый фазометр выполнен как приставка к цифровому мультиметру:



На входах фазометра на операционных усилителях DA1 и DA2 выполнены гистерезисные компараторы (триггеры Шмитта). Чувствительность компараторов – около 30 мВ. С выходов компараторов сигналы поступают на импульсный частотно-фазовый детектор с тремя состояниями, выполненный на D-триггерах DD1.1, DD1.2 и транзисторах VT5, VT6. Нагрузкой детектора служит резистор R17.

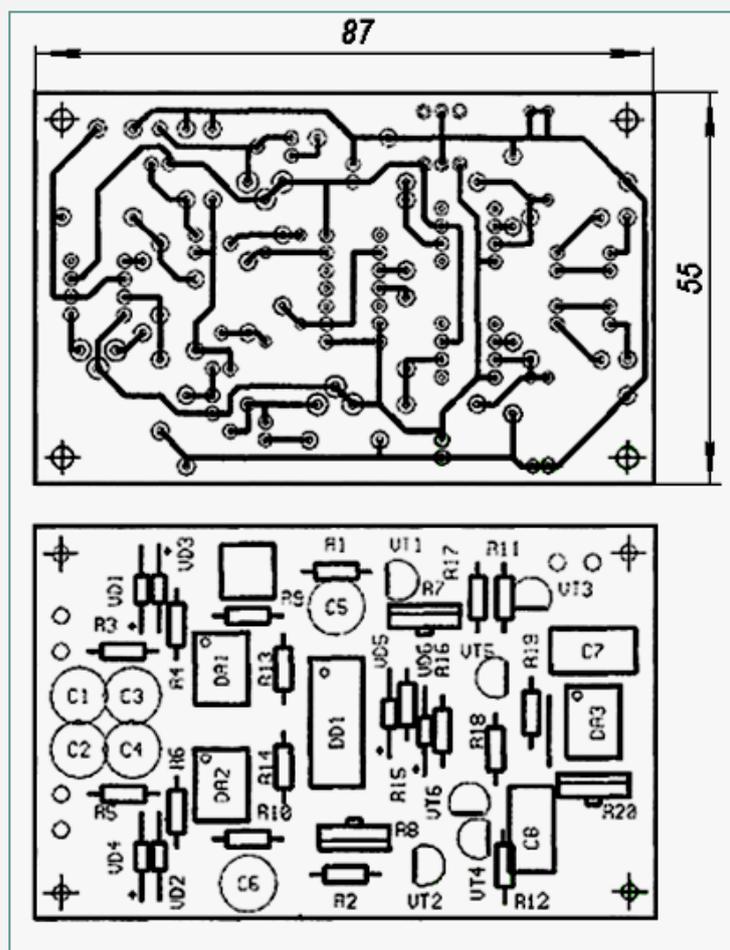
Для выделения постоянной составляющей, пропорциональной сдвигу фаз, служит фильтр НЧ второго порядка на операционном усилителе DA3. Питание транзисторов VT5 и VT6 детектора выбрано равным $\pm 3,6$ В, что соответствует сдвигу фаз $\pm 360^\circ$ (т.е. 1 В соответствует фазовому сдвигу 100°). Точность измерений зависит от амплитуды входных сигналов – чем она больше, тем выше точность измерений. При малых уровнях исследуемых сигналов (до 100...200 мВ) их амплитуды должны быть близки по величине.

Напряжения $\pm 3,6$ В получаются из стабилизированных напряжений питания ± 5 В с помощью схемы на транзисторах VT1...VT4, в которой VT1 и VT2 служат для термостабилизации.



Конструкция и детали

Фазометр выполнен на печатной плате размерами 87×55 мм (см. рис. ниже). Вывод 4 DD1 соединён с выводом 11 перемычкой поверх микросхемы. Аналогично можно соединить и вывод 5 DD1 с выводом 12 и вывод 3 с выводом 10. При наличии двустороннего стеклотекстолита последние две связи можно провести печатным способом со стороны установки элементов. Остальные связи выполнены печатным монтажом. Сборочный чертеж платы показан на рис. ниже. В качестве операционных усилителей DA1, DA2 использованы К544УД2А, DA3 – К140УД608. Триггер DD1 – типа К561ТМ2. Электролитические конденсаторы – типа К50-35 на напряжение 10 В. Транзисторы – КТ3107Б и КТ3102Б. Все микросхемы (цифровые и аналоговые) питаются стабилизированным двухполярным напряжением ± 5 В.



Настройка схемы

Наладка схемы фазометра заключается в установке с помощью резисторов R7 и R8 напряжений $\pm 3,6$ В на эмиттерах транзисторов VT3 и VT4, а также в балансировке операционного усилителя DA3. Для балансировки операционного усилителя DA3 один и тот же сигнал подаётся на оба входа. Поскольку сдвиг фаз при этом равен нулю, на выходе детектора не должно быть никаких импульсов. Резистором R20 добиваются минимального напряжения на выходе фазометра. Затем подавая на входы 1 и 2 сигналы с известным сдвигом фаз выполняется калибровка измерительного прибора P1 (цифрового мультиметра).

Выводы

1. В результате несложной модернизации схемы установки для измерения тангенса угла диэлектрических потерь, реализован новый комбинированный метод измерений $tg\delta$ в условиях влияния внешнего электромагнитного поля, являющийся комбинацией измерения разности фаз напряжения возбуждения и напряжения влияния $\Delta\varphi$ методом непосредственной оценки, и метода измерения $tg\delta$ путём совмещения фаз тока возбуждения и тока влияния при помощи фазорегулятора с компенсацией погрешности измерений расчётным методом.

2. Практическая реализация данного метода измерений не нарушает существующую измерительную схему, а лишь дополняет её, позволяя оператору измерительной установки получать отсутствовавшую ранее информацию о разности фаз напряжения возбуждения и напряжения влияния $\Delta\varphi$ во время выполнения операций совмещения фаз при помощи фазорегулятора. Другими словами, ранее оператор выполнял сведение фаз вслепую, методом последовательных приближений, каждый раз контролируя результат косвенным методом, путём измерения $tg\delta_{0^\circ}$ и $tg\delta_{180^\circ}$ мостом переменного тока, сравнивая полученные результаты, а затем вычисляя промежуточные значения магазина ёмкостей $C4$ моста, и путём многократного повторения этих операций, наконец, добивался долгожданного сведения фаз, но гораздо чаще получал неточное совмещение фаз и был вынужден использовать сложную формулу (см. ниже) для снижения имеющейся погрешности измерений расчётным методом:

$$tg\delta = \frac{tg\delta' R_3'' + tg\delta'' R_3'}{R_3' + R_3''} = \frac{tg\delta' C_X' + tg\delta'' C_X''}{C_X' + C_X''}$$

3. Полученный метод измерений $tg\delta$ в условиях влияния внешнего электромагнитного поля позволяет значительно сократить трудозатраты на выполнение данного вида измерений и уменьшить получаемую погрешность за счёт более точного сведения фаз напряжения возбуждения и напряжения влияния фазорегулятором, контролируя при этом разность фаз методом прямых измерений.

4. Некоторое усложнение существующей схемы измерительной установки не снижает её надёжность, поскольку модернизированная схема позволяет пользоваться старым методом без каких-либо изменений конструкции в случае выхода из строя устройства для измерения разности фаз.

Инженер по испытаниям высоковольтного электрооборудования

И.Иванов

01.08.2017