

## 2.4. ТОКИ ВЛИЯНИЯ И ИХ ИСКЛЮЧЕНИЕ

Напряжение и ток рабочего режима устройства, в котором находится контролируемое оборудование, являются источниками токов помех промышленной частоты - токов влияния. Эти токи вызваны электрическим полем, созданным рабочим напряжением, а также магнитным полем тока, протекающего по токоведущим частям.

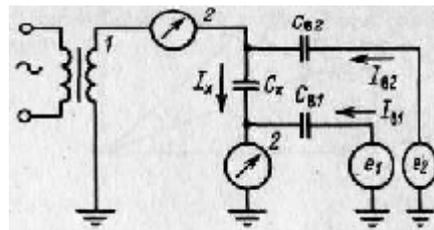
Ток рабочего режима индуцирует в замкнутых контурах схем измерений ток электромагнитных влияний. Наиболее чувствительным элементом схемы при этом является СИ, где влияниям подвержены трансформаторы измерительной цепи. При конструировании СИ это учитывается; обычно оно имеет соответствующую защиту. Кроме того, всегда можно изменить положение СИ в пространстве, уменьшив при этом индуктивную связь с влияющим элементом. Поэтому практически возникает необходимость исключения лишь небольших осевых токов от электромагнитного влияния.

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

### Токи влияния

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

Рис. 2.28. Схема замещения для учета



Частичных емкостей, создающих пути для токов влияния, много. Они определяются конструкцией оборудования и его расположением относительно других элементов распределительного устройства. Токи, протекающие по каждому из этих путей, имеют различные значения и фазу. Поэтому суммарный ток влияния, протекающий через данную точку схемы измерений, имеет случайное значение модуля и фазы. На схеме замещения источник суммарного тока влияния может быть представлен в виде источника ЭДС и эквивалентной емкости влияния [9]. Эта емкость мала по сравнению с емкостью остальных элементов схемы измерений, и поэтому источник влияния может рассматриваться как источник тока.

Будем рассматривать два пути протекания суммарных токов влияния (рис. 2.28); один - на низкопотенциальный вывод объекта ( $I_{B1}$ ), второй - на его вывод ВН ( $I_{B2}$ ). В действительности частичные токи влияния протекают через всю поверхность объекта, а указанные электроды есть лишь точки объекта, через которые суммарные токи влияния стекают в схему измерения. При прямой схеме включения измерительного устройства определяющим является ток  $I_{B1}$ ; при перевернутой - ток  $I_{B2}$ . Необходимость одновременного рассмотрения обоих токов будет оговорена особо.

Строго говоря, часть тока влияния будет протекать через емкость объекта, минуя измерительное устройство. Но таким малым изменением можно пренебречь. В дальнейшем рассматривается лишь ток, который влияет на результаты измерений.

Протекая через измерительный элемент схемы и складываясь с подлежащим контролю током через изоляцию объекта, ток влияния является источником погрешностей измерения.

Погрешности измерения от токов влияния существенны лишь для измерительных установок переменного тока промышленной частоты. В дальнейшем будут рассматриваться лишь эти установки. В других случаях (например, при измерениях на постоянном токе) погрешности появляются лишь тогда, когда токи влияния создают нелинейный режим измерительного устройства или же выпрямляются каким-либо образом в процессе измерения.

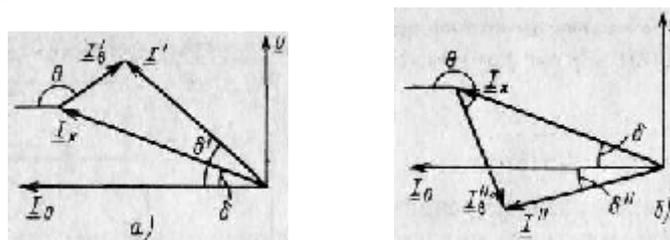


Рис. 2.29. К расчету погрешностей от тока влияния:  
 а — измеренный угол потерь больше действительного;  
 б — измеренный угол потерь меньше действительного

Протекая по входным цепям мегаомметра, токи влияния, превышающие определенное значение, выпрямляются устройствами его защиты от перегрузок. Это создает недопустимые погрешности измерений, например, при применении мегаомметра Ф4100. Возможно выпрямление токов влияния при коммутациях, проводимых для измерения абсорбционных характеристик.

На векторной диаграмме (рис. 2.29, а) ток  $I'_в$ , протекающий через измерительный элемент схемы, показан как сумма тока объекта  $I'_х$  и тока влияния  $I'_в$ . Действительный угол потерь  $\delta$ ; измеряется угол  $\delta'$ . Фаза тока влияния (угол  $\theta$ ) может быть любой, поэтому измеренное значение  $\operatorname{tg} \delta$  может быть больше или меньше действительного. Возможно отрицательное значение ("отрицательный"  $\operatorname{tg} \delta$  при суммарном токе  $I''$  и угле  $\delta''$ , рис. 2.29, б).

Активная составляющая тока  $I'$

$$I'_a = I_X \sin \delta + I_B \sin \theta ;$$

реактивная составляющая

$$I'_p = I_X \cos \delta + I_B \cos \theta .$$

Следовательно, измеренные значения

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{I_X \sin \delta + I_B \sin \theta}{I_X \cos \delta + I_B \cos \theta} \quad \text{и} \quad C'_x = k_C (I_X \cos \delta + I_B \cos \theta),$$

где  $k_C$  - коэффициент, определяемый чувствительностью измерительного устройства.

Введем коэффициент  $k_B$ , равный отношению модулей токов влияния и объекта (коэффициент влияния)<sup>1</sup>. При этом

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{\sin \delta + k_B \sin \theta}{\cos \delta + k_B \cos \theta} \tag{2.12}$$

$$C'_x = k_C I_X (\cos \delta + k_B \cos \theta) . \tag{2.13}$$

<sup>1</sup> В [9] коэффициентом влияния названо отношение модуля тока влияния к реактивной составляющей тока объекта. Принятое нами определение представляется методически более верным.

Погрешности измерения:

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta' - \operatorname{tg} \delta = \frac{k_{\text{в}} (\sin \theta - \operatorname{tg} \delta \cos \theta)}{\cos \delta + k_{\text{в}} \cos \theta} \quad (2.14)$$

и

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{C_x' - C_x}{C_x} = k_{\text{в}} \frac{\cos \theta}{\cos \delta} \quad (2.15)$$

Наибольшая погрешность измерения  $\operatorname{tg} \delta$  соответствует случаю, когда ток влияния близок по фазе к активной составляющей тока объекта ( $\theta \approx 90^\circ$ ); при этом с учетом малости угла  $\delta$   $(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{нб}} \approx k_{\text{в}}$ . Заметим, что погрешность отсутствует при  $\theta = \delta$ . Наибольшая погрешность измерения емкости  $(\Delta C_x / C_x)_{\text{нб}} \approx k_{\text{в}}$  будет при  $\theta = 0^\circ$ .

Ток влияния определяется габаритами контролируемого объекта, его расположением и номинальным напряжением установки. При прочих равных условиях коэффициент влияния и, следовательно, погрешность измерения будут обратно пропорциональны емкости объекта. Наибольшие погрешности создают токи влияния при контроле вводов и трансформаторов тока.

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

В табл. 2.3 приведены статистические данные о реальных уровнях влияния, измеренных при контроле вводов и трансформаторов тока Распределительных устройствах, а также прогнозируемые предельные значения коэффициентов влияния [10]. Прогноз сделан по распределению наибольших членов выборки.

Эти данные подтверждают, что по помехозащищенности прямая схема измерений является наилучшей. Однако наибольшее возможное значение погрешности измерения, которое, как показано выше, близко к значению  $k_{\text{в}}$ , так велико, что результаты измерений в целях диагностирования изоляции использовать нельзя. Необходимо исключение погрешности измерений, вызванной токами влияния.

Таблица 2.3. Уровни влияния в схемах эксплуатационных измерений

Тип аппарата	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$C_x$ , пФ	Схема измерения	$k_{\text{в,нб}}$ , %	$k_{\text{в,пр}}$ , %
Вводы трансформаторов силовых	110	160-200	Прямая	0,26	0,9
	220	530-615	“	0,11	0,5
	330	530-630	“	0,3	1,2
	500	615-665	“	0,27	1,1
Трансформаторы тока	110	100-150	Перевернутая	5,77	40,0
	110	160-260	“	7,26	52,0
	220	160-260	“	16,08	76,0
	330	640-1000	Прямая	1,64	7,2
	500	270-400	Перевернутая <sup>1</sup>	12,05	58,0
Вводы выключателей	110	200-320	Перевернутая	2,37	13,0
	110	250-500	Прямая	0,45	2,3
	220	230-260	“	1,42	4,2
	220	320-640	Перевернутая	6,0	21,4

<sup>1</sup> ТФНКД-500, два элемента соединены параллельно.

Примечания:

<sup>1</sup>: Измерения проводились при напряжении 10 кВ.

<sup>2</sup>.  $k_{\text{в,нб}}$  - наибольшее измеренное значение;  $k_{\text{в,пр}}$  - наибольшее расчетное (предельное) значение, полученное исходя из статистики наибольших значений.

### Исключение погрешностей измерения

Получить достоверные результаты измерений можно следующими способами: уменьшением до приемлемого значения тока влияния, компенсацией этого тока в

измерительной схеме, применением помехоустойчивого измерительного устройства или исключением погрешности из результатов измерения.

**Уменьшение тока влияния** может быть получено путем выбора соответствующей схемы измерений (см. табл. 2.3). Дальнейшее снижение этого тока дает отключение соседних с контролируемым объектом элементов распределительного устройства. К снижению погрешности за счет уменьшения коэффициента влияния приводит повышение напряжения измерительной установки. Однако все эти мероприятия, улучшая условия измерений, достаточное исключен погрешностей не обеспечивают.

Устранить ток влияния можно экранированием. Для этого контролируемый объект надо окружить заземленным проводящим экраном, например, из проволочной сетки. Для эксплуатационных измерений этот метод неприемлем.

**Компенсация токов влияния** в схеме измерений производится от специального источника, синхронного с напряжением влияющей сети. Компенсацию можно обеспечить, подав на вход СИ ток, равный по модулю току влияния и обратный ему по фазе (см. рис. 2.16).

**Защита от помех** обеспечивается применением специального помехоустойчивого СИ. Такой способ измерений наиболее удобен в эксплуатации и обеспечивает необходимую точность.

Применяется частотное разделение контролируемого тока и тока помех (влияния). Частота напряжения измерительной установки выбирается отличающейся от промышленной, а СИ защищается от тока влияния соответствующим фильтром. В практике энергосистем применяются установки с частотой 25 и 100 Гц.

Указатель равновесия мостового устройства является селективным прибором; частотная характеристика его фильтра (рис. 2.30) предусматривает необходимое подавление помех с частотой, отличающейся от частоты измерительного напряжения  $\omega_n$ . Ввиду неидеальности фильтра ток влияния  $I_B$  с частотой  $\omega_B$  вызовет показания, эквивалентные протеканию тока рабочей частоты моста  $I_{ЭК} = I_B / K_{\omega_B}$  ( $K_{\omega_B}$  – коэффициент подавления фильтра; принято, что на рабочей частоте моста  $K_{\omega} = 1$ ). Это приведет к погрешности измерения. Наибольшая возможная погрешность от тока влияний  $\Delta \operatorname{tg} \delta$  или  $\Delta C_X / C_X$  равна  $k_B$ . С учетом характеристики фильтра

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \frac{\Delta C_X}{C_X} = \frac{k_B}{K_{\omega_B}}$$

Определяющим является случай измерения  $\operatorname{tg} \delta$ . Следовательно, помехозащищенность СИ будет обеспечена, если

$$K_{\omega_B} \geq k_B / (\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{доп}}$$

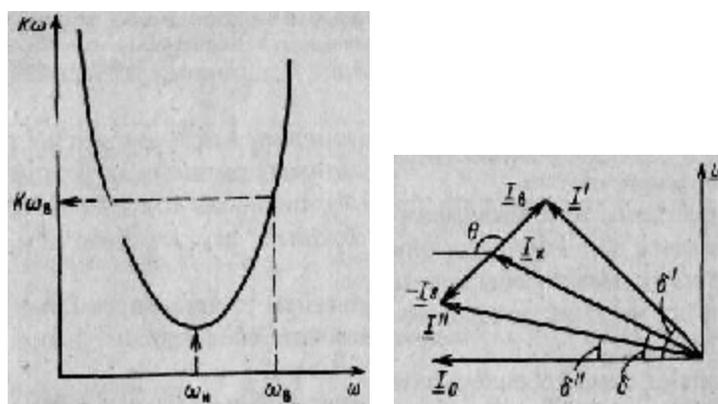


Рис. 2.31. К расчету формул исключения погрешностей от тока влияния

Рис. 2.30. Частотная характеристика фильтра указателя равновесия

Примем допустимое значение погрешности измерения  $(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{доп}} = 1 \cdot 10^{-3}$ , а наибольшее

возможное значение  $k_b = 0,7$  (см. табл. 2.3). При этом необходимое подавление фильтром  $K_{\text{об}} = 700$ .

Высокой помехоустойчивостью обладает векторметр. Она обеспечивается синхронным выпрямлением с последующим выделением постоянной составляющей выпрямленного тока. При синхронном выпрямлении равно нулю среднее значение токов, несинхронных с управляющим напряжением или имеющих частоту, кратную его четным гармоникам. Поэтому, если измерять при частоте 25 Гц, помехи от токов влияния промышленной частоты погрешности не дадут.

Недостатками методов измерения с фильтрацией токов влияния являются необходимость в специальной измерительной установке с мощным источником напряжения при частоте, отличающейся от промышленной, а также трудность установления пересчетных коэффициентов для приведения полученных данных к нормированным при промышленной частоте.

**Расчетный метод** получил наиболее широкое применение. Исключение погрешностей от токов влияния, протекающих через измерительное устройство, производится путем обработки результатов измерений, проведенных при фазах напряжения испытательной установки, различающихся на  $180^\circ$  (метод двух измерений).

На векторной диаграмме (рис. 2.31) для упрощения показано в изменение на  $180^\circ$  тока через объект, а эквивалентное ему изменен» тока влияния. При первом измерении будут определены значения  $\text{tg } \delta'$  и  $C'_x$ , а при втором -  $\text{tg } \delta''$  и  $C''_x$ . Из векторной диаграммы следует:

$$\begin{aligned} \text{tg } \delta' &= \frac{I_x \sin \delta + I_B \sin \theta}{I_x \cos \delta + I_B \cos \theta}; \\ \text{tg } \delta'' &= \frac{I_x \sin \delta + I_B \sin (180^\circ + \theta)}{I_x \cos \delta + I_B \cos (180^\circ + \theta)}; \\ C'_x &= k_C (I_x \cos \delta + I_B \cos \theta); \\ C''_x &= k_C [I_x \cos \delta + I_B \cos (180^\circ + \theta)]; \quad C_x = k_C I_x \cos \delta. \end{aligned}$$

Совместное решение этих уравнений дает

$$\text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta' C'_x + \text{tg } \delta'' C_x}{C'_x + C''_x} \quad (2.16)$$

и

$$C_x = \frac{C'_x + C''_x}{2}. \quad (2.17) \quad \begin{array}{l} \text{В} \\ \text{фор} \\ \text{мулу} \end{array}$$

(2.16) значения  $\text{tg } \delta'$  и  $\text{tg } \delta''$  подставляются с тем знаком, с каким они были получены при измерениях. Для случая измерений мостовой схемой

$$\text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta' R_3^I + \text{tg } \delta'' R_3^{II}}{R_3^I + R_3^{II}} \quad \text{и} \quad C_x = \frac{C_0 R_4}{2} \left( \frac{1}{R_3^I} + \frac{1}{R_3^{II}} \right).$$

Часто в качестве результата измерения  $\text{tg } \delta$  принимается полусумма данных:  $\text{tg } \delta = 0,5 (\text{tg } \delta' + \text{tg } \delta'')$ .

При этом вносится погрешность:

$$\Delta \text{tg } \delta = \frac{\text{tg } \delta' C'_x + \text{tg } \delta'' C''_x}{C'_x + C''_x} - \frac{\text{tg } \delta' + \text{tg } \delta''}{2} = (\text{tg } \delta' - \text{tg } \delta'') \frac{C'_x - C''_x}{C_x}.$$

Если результаты обоих измерений емкости не различаются более чем на 10%, то погрешность расчета по упрощенной формуле будет допустимой. При больших различиях полученных данных следует пользоваться формулой (2.16).

Полученные расчетные формулы принципиально пригодны для исключения любого тока

влияния. Однако на практике невозможно обеспечить измерение без погрешностей и при больших токах влияния расчетное значение  $\operatorname{tg} \delta$ , определенное как разность больших величин, может иметь недопустимое отклонение от действительного.

Расчетное исключение погрешностей целесообразно использовать в случаях, когда оба измеренных значения  $\operatorname{tg} \delta$  положительны. При получении отрицательного значения  $\operatorname{tg} \delta$  можно предварительно снизить погрешность подбором фазы питания измерительного устройства (при этом изменяется угол  $\theta$ ) и лиц, потом производить исключение остаточной погрешности расчетом. При наличии соответствующей испытательной установки целесообразно сразу перейти на измерения методом совмещения фаз (см. далее).

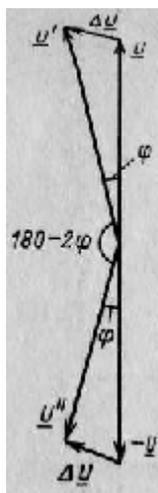


Рис. 2.32. К расчету погрешности от изменения фазы напряжения питания моста

При применении методов исключения погрешностей от токов влияния, основанных на двух измерениях, поворот фазы напряжения при втором измерении на угол, отличающийся от  $180^\circ$ , ведет к существенным ошибкам в определении  $\operatorname{tg} \delta$  изоляции. Ошибка в определении емкости не так значима. Изменение фазы напряжения не строго на  $180^\circ$  может быть следствием нечеткой фиксации выбранной фазы в фазорегуляторе или же из-за большого тока влияния, протекающего через источник напряжения измерительной установки.

При прямой схеме включения СИ через источник напряжения измерительной установки проходит ток влияния, стекающий с вывода высокого напряжения объекта (ток  $I_{B2}$  - см. рис. 2.28). Падение напряжения от этого тока на сопротивлении  $z_k$  источника образует часть напряжения на объекте, не изменяющуюся на  $180^\circ$  при изменении фазы напряжения питания [10]. Падение напряжения на источнике  $\Delta U = z_k I_{B2}$ , а наибольшая определяемая им разность фаз  $2\varphi \approx 2\Delta U/U$  (рис. 2.32).

Следовательно, вместо напряжения  $U$  к объекту будет приложено напряжение  $U'$  а сдвиг фаз при изменении фазы питания будет не  $180^\circ$ , а  $\varphi = 180^\circ - 2\varphi$ .

Примем для упрощения, что у объекта  $\operatorname{tg} \theta = 0$ . При измерениях в условиях влияния (коэффициент влияния  $k_{B1}$  и при сдвиге фазы напряжения питания на  $\varphi$  с учетом (2.12) получим

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{k_{B1} \sin(\theta + \varphi)}{1 + k_{B1} \cos(\theta + \varphi)}$$

При втором измерении

$$\operatorname{tg} \delta'' = \frac{k_{B1} \sin(\theta + \varphi + \psi)}{1 + k_{B1} \cos(\theta + \varphi + \psi)} = \frac{-k_{B1} \sin(\theta - \varphi)}{1 - k_{B1} \cos(\theta - \varphi)}$$

Поскольку принято, что действительное значение  $\operatorname{tg} \delta = 0$ , то измеренные значения и есть погрешности от изменения фазы напряжения. Эта погрешность при расчете среднего значения результатов измерения с учетом того, что  $k_{B1} < 1$ :

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2} (\operatorname{tg} \delta' + \operatorname{tg} \delta'') \approx \frac{k_{B1}}{2} [\sin(\theta + \varphi) - \sin(\theta - \varphi)] \approx k_{B1} \cos \theta \sin \varphi$$

Наибольшее значение погрешности  $(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{нб}} \approx k_{B1} \sin \varphi$ .

Для малых углов

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta U}{U} = \frac{I_{B2} z_k}{U},$$

следовательно,

$$(\Delta \operatorname{tg} \delta)_{\text{нб}} \approx k_{B1} \frac{I_{B2} z_k}{U}$$

При допустимой погрешности  $\Delta \operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-3}$  и  $k_{B1} = 0,1$  наибольшая допускаемая ошибка в

изменении фазы  $2\varphi \approx 2,5^\circ$ .

Можно принять, что для измерительной установки с источником питания НОМ-10 и фазорегулятором  $z_K \approx 100$  кОм (приведено к стороне 10 кВ), тогда

$$K_{в1} I_{в2} < 0,1(\Delta t g \delta)_{доп}.$$

При измерении  $tg \delta$  изоляции вводов и трансформаторов тока обычно стараются не отключать шины. Рассмотренная погрешность определяет предел допустимости такой схемы измерений. Практически отключение шин необходимо при  $k_{в1} I_{в2} \geq 2 \cdot 10^{-4}$  (принято, что  $\Delta t g \delta \leq 2 \cdot 10^{-3}$ ). По данным табл. 2.3, при прямой схеме измерения наибольшее прогнозируемое значение  $k_{в1} \approx 7 \cdot 10^{-2}$ , следовательно, наибольший допускаемый при этом ток влияния  $I_{в2} \approx 3$  мА.

**Метод совмещения фаз** токов объекта и влияния обеспечивает исключение погрешности от токов влияния, протекающих через измерительное устройство, путем выбора соответствующего угла  $\Theta$  [9]. Из (2.14) и (2.15) следует, что погрешность измерения отсутствует при  $\Theta_1 = \delta$  и  $\Theta_2 = 180^\circ + \delta$ , а погрешность измерения емкости - при  $\Theta = \pm 90^\circ$ . Метод заключается в том, что перед измерениями, изменяя фазу напряжения измерительной установки, обеспечивают необходимую фазу тока через объект. Измерительная установка должна для этого иметь фазовращатель в цепи питания источника напряжения.

Высокая точность измерения необходима в первую очередь при определении  $tg \delta$ . Поэтому добиваются совмещения фазы тока через изоляцию объекта с фазой тока влияния. Признаком того, что фаза напряжения на объекте выбрана правильно, является совпадение результатов двух измерений (одно - при выбранной фазе, другое - при изменении ее на  $180^\circ$ ).

Рассмотрим процесс измерения при применении мостовой схемы. Выбор фазы напряжения питания моста производится методом последовательных приближений следующим образом:

на шкале моста устанавливается значение  $tg \delta = 0$  или (для ускорения процесса выбора фазы) ожидаемое значение  $tg \delta$  изоляции объекта;

на мост подается напряжение и производится его уравнивание путем регулировки резистора  $R_3$  и изменения фазы напряжения фазорегулятором;

напряжение моста изменяется по фазе на  $180^\circ$  и при неизменном положении фазорегулятора мост уравнивается обычным способом;

на шкале моста устанавливается полусумма первоначального и измеренного значений  $tg \delta$  и производится коррекция фазы напряжения путем уравнивания моста резистором  $R_3$  и фазорегулятором

фаза напряжения моста изменяется на  $180^\circ$  и производится его уравнивание обычным способом. Если полученное значение  $tg \delta$  существенно отличается от предыдущего, то на шкале устанавливается их полусумма и опять производится коррекция фазы напряжения моста. Циклы коррекции повторяются до практического совпадения значений  $tg \delta$ , измеренных при отличающихся на  $180^\circ$  фазах напряжения моста ( $tg \delta' \approx t g \delta''$ ). Обычно достаточно двух, трех приближений.

В качестве результата измерения принимается полусумма значений  $tg \delta$  и  $C_x$ , полученных при последних двух уравниваниях моста. В практике наиболее приемлемо совместное применение метода совмещения фаз и расчетного метода исключения остаточной погрешности. При этом коррекция фазы напряжения моста фазорегулятором заканчивается при получении положительных значений  $tg \delta$  при двух последовательных измерениях (одного при выбранной фазе, второго - при фазе напряжения питания, измененной на  $180^\circ$ ). Остаточная погрешность исключается расчетом.

Метод совмещения фаз может применяться при токах влияния не превышающих ток

объекта ( $k_b < 1$ ). Сравнение с данными табл. 2.3 показывает, что ограничений для его использования в практике энергосистем не имеется.

Результаты двух измерений, отличающихся по фазе напряжения питания на  $180^\circ$ , позволяют вычислить коэффициент влияния.

Примем, что при первом измерении активная и реактивная составляющие измеренного тока были равны суммам соответствующих составляющих токов объекта и влияния. Тогда при втором измерении, после изменения фазы напряжения на  $180^\circ$ , они будут определяться их разностью.

По определению

$$k_E = \frac{I_E}{I_X} = \left[ \frac{I_{в,а}^2 + I_{в,р}^2}{I_{х,а}^2 + I_{х,р}^2} \right]^{1/2},$$

Принято, что

$$\begin{aligned} I_{в,а} &= 0,5 (I'_а - I''_а); & I_{в,р} &= 0,5 (I'_р - I''_р); \\ I_{х,а} &= 0,5 (I'_а - I''_а); & I_{х,р} &= 0,5 (I'_р - I''_р); \end{aligned}$$

где индексы в и х соответственно относятся к токам влияния и объекта, а индексы а и р - к активным и реактивным составляющим токов; одним штрихом отмечены результаты первого измерения, двумя штрихами - результаты второго.

Совместное решение приведенных соотношений с учетом того, что  $I_{х,а} = \omega C_x U \operatorname{tg} \delta$ , а  $I_{х,р} = \omega C_x U$ , дало

$$k_E = \left[ \frac{(\operatorname{tg} \delta' C_x' - \operatorname{tg} \delta'' C_x'')^2 + (C_x' - C_x'')^2}{(\operatorname{tg} \delta' C_x' + \operatorname{tg} \delta'' C_x'')^2 + (C_x' + C_x'')^2} \right]^{1/2}.$$

Для мостовой схемы

$$k_E = \left[ \frac{(\operatorname{tg} \delta' R_3'' - \operatorname{tg} \delta'' R_3')^2 + (R_3' - R_3'')^2}{(\operatorname{tg} \delta' R_3' + \operatorname{tg} \delta'' R_3'')^2 + (R_3' + R_3'')^2} \right]^{1/2}.$$

Для случая, когда  $\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta$  (при этом  $\Theta \approx \delta$ ),

$$k_E \approx \frac{C_x' - C_x''}{C_x' + C_x''} = \frac{R_3' - R_3''}{R_3' + R_3''}.$$

Ток влияния может быть измерен и непосредственно. При этом надо учитывать, что погрешность измерения определяется током первой гармоники и измерительный прибор (миллиамперметр) должен быть селективным. Для измерения может быть использован предварительно градуированный указатель равновесия моста