

**Б. Н. ПАНКОВ**

(Новосибирск)

### **О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЯХ К ПАРАМЕТРАМ ЕМКОСТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МОСТОВ С ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ УКАЗАТЕЛЯМИ**

Устанавливается влияние выбора параметров емкостных трансформаторных измерительных мостов на правильность формирования управляющих воздействий фазочувствительным указателем квазиравновесия. Выводятся требования к параметрам измерительных цепей, при выполнении которых обеспечивается возможность правильного формирования управляющих воздействий.

При раздельном измерении параметров комплексных сопротивлений емкостного характера получают широкое распространение мостовые цепи с тесной индуктивной связью между плечами (емкостные трансформаторные измерительные мосты) с фазочувствительными указателями квазиравновесия, использующими в качестве опорного напряжение питания моста [1, 2]. Указанные мосты обеспечивают повышенную точность измерения емкости при исключительной простоте измерительного процесса. При уравнивании таких мостов необходимо, чтобы между знаком управляющего воздействия, сформированного фазочувствительным указателем, и знаком неравновесия мостовой цепи всегда существовало однозначное соответствие. Нарушение по каким-либо причинам этого соответствия приводит либо к значительному увеличению времени уравнивания моста, если его уравнивают вручную, либо вообще к невозможности уравновесить мост, если он уравнивается автоматически. Поэтому при проектировании емкостных трансформаторных измерительных мостов очень важно знать причины, обуславливающие нарушение указанного соответствия. Выявление этих причин способствует своевременному принятию мер к их устранению.

Можно назвать две основные группы причин, вызывающих неправильное формирование указателем управляющего воздействия.

1. Причины, обусловленные неправильной работой применяемого фазочувствительного указателя (например, плохая настройка, искажения, связанные с перегрузками и нелинейностью характеристик указателя, и т. д.).

2. Причины, связанные с работой применяемой мостовой измерительной цепи.

В настоящей статье устанавливается одна из причин, относящихся ко второй группе, а именно: влияние выбора параметров мостовой измерительной цепи на правильность формирования указателем управляющих воздействий. С этой целью проводится анализ нескольких схем емкостных трансформаторных измерительных мостов. На основании анализа выводятся требования к параметрам цепей, при выполнении которых обеспечивается возможность правильного формирования управляющих воздействий фазочувствительными указателями квазиравновесия.

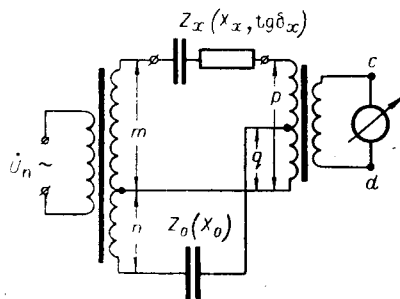


Рис. 1.

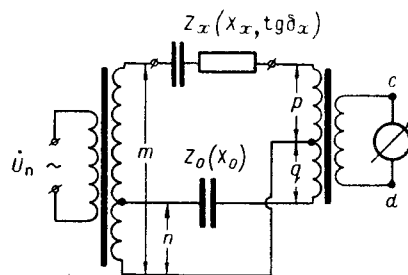


Рис. 2.

Анализ проводится для двух основных разновидностей емкостных трансформаторных измерительных мостов, имеющих две пары плеч с тесной индуктивной связью и отличающихся друг от друга способом их включения. Схемы этих мостов приведены на рис. 1 и 2. В обеих схемах  $Z_x$  и  $Z_0$  — соответственно контролируемые и образцовые емкостные сопротивления, а  $m$ ,  $n$ ,  $p$  и  $q$  — величины, пропорциональные соответствующему количеству витков обмоток трансформаторов сравнения напряжений (Tr1) и трансформаторов сравнения токов (Tr2). Очевидно, что схема рис. 1 при  $p=q$  обращается в схему четырехплечего моста, у которого плечи с тесной индуктивной связью включены в диагональ источника питания, а в указательную диагональ включено индуктивное сопротивление. В то же время схема моста (см. рис. 2) при  $m=n$  превращается в схему четырехплечего моста, у которого плечи с тесной индуктивной связью включены в диагональ указателя. Отсюда следует, что если проанализировать схемы рис. 1 и 2, то результаты анализа при сделанных выше допущениях можно распространять на соответствующие четырехплечие емкостные трансформаторные измерительные мосты.

Для упрощения анализа будем считать, что источники питания и указатели подключаются в мостовых цепях непосредственно к плечам отношения, минуя дополнительную обмотку. Такое допущение не приведет к качественным изменениям в работе мостов, но значительно упростит их анализ. Если при этом считать, что трансформаторы Tr1 и Tr2 обеспечивают идеальную индуктивную связь между обмотками (т. е. коэффициент связи  $k=1$ ) и добротность трансформаторов не зависит от числа их витков [3] (т. е. пренебрегаем потерями в активных сопротивлениях обмоток по сравнению с потерями, вносимыми магнитопроводами трансформаторов), то на схеме замещения анализируемых мостовых цепей оба трансформатора можно представить в виде согласованных звезд сопротивлений [4].

Схемы замещения анализируемых мостовых цепей приведены на рис. 3 и 4, где при учете принятых выше допущений  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  — сопротивления согласованной звезды, представляющей трансформатор срав-

нения напряжений;  $Z_4, Z_5, Z_6$  — сопротивления другой согласованной звезды, представляющей трансформатор сравнения токов. Выражения для напряжений  $\dot{U}_{cd}$  представленных схем будут иметь вид: для схемы рис. 3

$$\dot{U}_{cd} = \dot{U}_n \frac{Z_0(Z_4 + Z_5) - Z_x Z_5 \frac{Z_2}{Z_1}}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) [Z_x(Z_0 + Z_5 + Z_6) + Z_0(Z_4 + Z_5)]}; \quad (1)$$

для схемы рис. 4

$$\dot{U}_{cd} = \dot{U}_n \frac{Z_0 Z_4 - Z_x Z_5 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}}{Z_x(Z_0 + Z_5 + Z_6) + Z_0(Z_4 + Z_6)}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) нетрудно видеть, что если условие  $\dot{U}_{cd} = 0$  (что соответствует состоянию равновесия моста), определяется лишь величинами  $Z_x, Z_0$  и отношениями сопротивлений согласованных звезд (т. е. отношениями чисел витков трансформаторов), то сама величина  $\dot{U}_{cd}$  (при

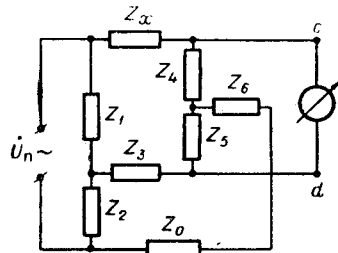


Рис. 3.

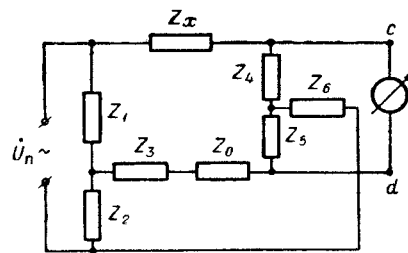


Рис. 4.

неравновесию моста) или ее компоненты (при каком-либо квазиравновесии) определяются уже не только упомянутыми выше величинами, но и величинами сопротивлений согласованных звезд. При этом сопротивления согласованной звезды, представляющей на схеме замещения трансформатор сравнения напряжений, входят в выражения (1) и (2) в виде отношений, которые равны отношению чисел витков обмоток трансформатора. Таким образом, непосредственно величины сопротивлений звезды трансформатора сравнения напряжений не влияют на компоненты  $\dot{U}_{cd}$ , а влияют только их отношения, в то время как влияние сопротивлений звезды трансформатора сравнения токов зависит не только от их соотношения, но и непосредственно от их величин. Как будет показано, вид зависимостей компонент  $\dot{U}_{cd}$  от параметров плеч моста и определит, насколько правильным окажется формирование управляющих воздействий фазочувствительным указателем в процессе уравнивания мостовой цепи.

Проанализируем выражения (1) и (2), считая, что трансформатор сравнения токов не шунтируется паразитными емкостями и обладает конечной добротностью  $Q$ , не зависящей от числа витков. При этом для удобства анализа параметры звезды сопротивлений трансформаторов сравнения токов выразим через соотношения чисел витков, указанных на рис. 1 и 2. Так, для схемы рис. 3

$$Z_4 = \frac{p}{q} \left( \frac{p}{q} - 1 \right) Z_L^0; \quad Z_5 = \frac{p}{q} Z_L^0; \quad Z_6 = - \left( \frac{p}{q} - 1 \right) Z_L^0, \quad (3)$$

а для схемы рис. 4

$$Z_4 = \frac{p}{q} \left( \frac{p}{q} + 1 \right) Z_L^0; \quad Z_5 = \left( \frac{p}{q} + 1 \right) Z_L^0; \quad Z_6 = - \frac{p}{q} Z_L^0, \quad (4)$$

где  $Z_L^0 = X_L \left( \frac{1}{Q} + j \right)$  — комплексное сопротивление обмотки трансформатора сравнения токов, у которой число витков пропорционально величине  $q$ ;

$X_L$  — индуктивное сопротивление обмотки трансформатора сравнения токов.

Выражение (1) с учетом (3) принимает вид

$$\dot{U}_{cd} = \dot{U}_n \frac{\frac{p}{q}}{1 + \frac{n}{m}} D, \quad (5)$$

а выражение (2) с учетом (4) —

$$\dot{U}_{cd} = \dot{U}_n \left( \frac{p}{q} + 1 \right) D, \quad (6)$$

где

$$D = \frac{\frac{Z_0}{Z_x} \frac{p}{q} - \frac{n}{m}}{1 + \frac{Z_0}{Z_L^0} + \frac{Z_0}{Z_x} \left( \frac{p}{q} \right)^2}. \quad (7)$$

Таким образом, дальнейший анализ поведения  $\dot{U}_{cd}$  и его составляющих в исследуемых мостах сводится к анализу множителя  $D$ .

Подставляя в (7) значения  $Z_x = X_x (\operatorname{tg} \delta_x - j)$ ,

$$Z_0 = -jX_0 \text{ и } Z_L^0 = X_L \left( \frac{1}{Q} + j \right) = \alpha X_0 \left( \frac{1}{Q} + j \right),$$

получим

$$D = \frac{-\frac{n}{m} \operatorname{tg} \delta_x + j \left( \frac{n}{m} - \frac{\lambda_0}{X_x} \frac{p}{q} \right)}{(1 - \varepsilon_1) \operatorname{tg} \delta_x + j \left[ 1 - \varepsilon_2 + \frac{X_0}{X_x} \left( \frac{p}{q} \right)^2 \right]},$$

где

$$\varepsilon_1 = \frac{1 + \frac{1}{Q \operatorname{tg} \delta_x}}{\alpha \left( 1 + \frac{1}{Q^2} \right)}; \quad \varepsilon_2 = \frac{1 - \frac{\operatorname{tg} \delta_x}{Q}}{\alpha \left( 1 + \frac{1}{Q^2} \right)}.$$

Составляющая  $\dot{U}_{cd}$ , синфазная (противофазная) напряжению питания моста  $\dot{U}_n$ , пропорциональна выражению

$$\operatorname{Re}(D) = \frac{-\frac{n}{m}(1-\varepsilon_1)\operatorname{tg}^2\delta_x + \left(\frac{n}{m} - \frac{X_0}{X_x}\frac{p}{q}\right)\left[1 - \varepsilon_2 + \frac{X_0}{X_x}\left(\frac{p}{q}\right)^2\right]}{(1-\varepsilon_1)^2\operatorname{tg}^2\delta_x + \left[1 - \varepsilon_2 + \frac{X_0}{X_x}\left(\frac{p}{q}\right)^2\right]^2}.$$

При уравнивании мостовой цепи (а она может быть уравновешена в рассматриваемом случае только по емкости)  $\operatorname{Re}(D)$  изменяется как по величине, так и по знаку. Это и позволяет в качестве указателя квазиравновесия применять квадратурный фазочувствительный указатель. Знак сигнала на выходе фазочувствительного указателя, который реагирует на величину  $U_n \operatorname{Re}\left(\frac{\dot{U}_{cd}}{\dot{U}_n}\right)$ , будет определяться лишь знаком числителя выражения  $\operatorname{Re}(D)$ , т. е. знаком выражения

$$N = -\frac{n}{m}(1-\varepsilon_1)\operatorname{tg}^2\delta_x + \left(\frac{n}{m} - \frac{X_0}{X_x}\frac{p}{q}\right)\left[1 - \varepsilon_2 + \frac{X_0}{X_x}\left(\frac{p}{q}\right)^2\right]. \quad (8)$$

Из двух слагаемых, входящих в выражение для  $N$  и определяющих величину и знак числителя  $\operatorname{Re}(D)$ , главным будет второе слагаемое, которое обозначим

$$M = \left(\frac{n}{m} - \frac{X_0}{X_x}\frac{p}{q}\right)\left[1 - \varepsilon_2 + \frac{X_0}{X_x}\left(\frac{p}{q}\right)^2\right].$$

Именно в этом слагаемом в качестве множителя выступает величина  $\frac{n}{m} - \frac{X_0}{X_x}\frac{p}{q}$ , которая при равенстве нулю, собственно, и определяет состояние равновесия мостовой цепи по емкости, а в процессе уравнивания может изменяться в широких пределах, изменяя свой знак в зависимости от знака небаланса, т. е. соотношения между  $\frac{X_0}{X_x}\frac{p}{q}$  и  $\frac{n}{m}$ . Слагаемое  $-\frac{n}{m}(1-\varepsilon_1)\operatorname{tg}^2\delta_x$ , непосредственно влияющее на точность измерения, либо вообще отсутствует (при измерении емкости без потерь), либо, как показано в [5], сводится к пренебрежимо малой величине путем рационального выбора значения  $\alpha$  и поэтому при небалансе моста на знак  $\operatorname{Re}(D)$  практически влиять не будет.

Пренебрегая, согласно сказанному выше, слагаемым  $-\frac{n}{m}(1-\varepsilon_1)\operatorname{tg}^2\delta_x$  в выражении (8) для случая, когда  $N \neq 0$ , т. е. когда мост находится в состоянии небаланса, проследим за изменением знака величины  $N$ , а следовательно,  $\operatorname{Re}(D)$  в зависимости от соотношений между параметрами мостовой цепи.

Для того чтобы по знаку  $\operatorname{Re}(D)$ , на который реагирует фазочувствительный указатель, можно было правильно формировать управляющее воздействие, т. е. правильно задавать направление изменения уравнивающих параметров, необходимо иметь  $N > 0$  при  $X_x > X_0 \frac{pm}{qn}$

и  $N < 0$  при  $X_x < X_0 \frac{pm}{qn}$ . Эти соотношения будут иметь место, когда при любых значениях  $X_x$  и  $X_0$

$$1 - \varepsilon_2 + \frac{X_0}{X_x} \left( \frac{p}{q} \right)^2 > 0. \quad (9)$$

Последнее соотношение будет всегда справедливо, если только  $\varepsilon_2 \leq 1$ , что всегда выполняется при

$$z \geq \frac{1 - \frac{\operatorname{tg} \delta_x}{Q}}{1 + \frac{1}{Q^2}}.$$

Наряду с (9) может иметь место и другое соотношение:

$$1 - \varepsilon_2 + \frac{X_0}{X_x} \left( \frac{p}{q} \right)^2 < 0. \quad (10)$$

Для  $z < \frac{1 - \frac{\operatorname{tg} \delta_x}{Q}}{1 + \frac{1}{Q^2}}$ , т. е. для  $\varepsilon_2 > 1$ , соотношение (9) имеет место при

$$X_x < \frac{\left( \frac{p}{q} \right)^2}{\varepsilon_2 - 1} X_0$$

и соотношение (10) — при

$$X_x > \frac{\left( \frac{p}{q} \right)^2}{\varepsilon_2 - 1} X_0.$$

Представим в виде таблицы зависимость знака величины  $N$  от величины  $X_x$  при  $\varepsilon_2 > 1$ .

	$X_x < \frac{\left( \frac{p}{q} \right)^2}{\varepsilon_2 - 1} X_0$	$X_x > \frac{\left( \frac{p}{q} \right)^2}{\varepsilon_2 - 1} X_0$
$X_x > X_0 \frac{pm}{qn}$	+	-
$X_x < X_0 \frac{pm}{qn}$	-	+

Таким образом, при  $\varepsilon_2 > 1$  знак величины  $N$ , как это следует из таблицы, определяется не только «знаком неравновесия» моста по емкости, т. е. знаком соотношения  $\frac{n}{m} - \frac{X_0}{X_x} \frac{p}{q}$ , но и величиной этого неравновесия. При этом нетрудно видеть, что если знак неравновесия определяется величинами  $X_x$ ,  $X_0$  и  $\frac{pm}{qn}$ , т. е. отношениями чисел

витков для обоих трансформаторов, то условия возможного неправильного формирования управляющего воздействия фазочувствительным указателем определяются величинами  $X_x$ ,  $X_0$  и параметрами трансформатора сравнения токов. Причем возможность неправильного формирования фазочувствительным указателем управляющего воздействия может появиться в совершенно неожиданные моменты как вдали от состояния квазиравновесия, так и вблизи его (неустойчивость «в большом» и «в малом»).

При  $\varepsilon_2 \leq 1$  эта возможность совершенно отпадает. Из требования обеспечения  $\varepsilon_2 \leq 1$  или приблизительно  $\alpha \geq 1$  и вытекают те дополнительные требования к параметрам рассмотренных мостовых цепей, выполнение которых позволяет обеспечить соответствие между знаком управляющего воздействия и «знаком неравновесия» мостовой цепи по емкости при любых соотношениях между величинами образцовой и контролируемой емкостей. Эти требования можно сформулировать следующим образом: при выбранной величине образцовой емкости плеча сравнения или диапазоне ее изменения параметры трансформатора сравнения токов должны быть выбраны таким образом, чтобы на частоте измерения величина индуктивного сопротивления плеча  $q$  была равна величине емкостного сопротивления плеча сравнения или больше ее.

Нетрудно показать, что обеспечение требуемой величины  $\alpha$  может быть осуществлено не только за счет соответствующего выбора соотношений между параметрами трансформатора сравнения токов и плечом сравнения, но и за счет преднамеренного шунтирования обмоток этого трансформатора дополнительными емкостями. Указанное шунтирование, изменяющее параметры звезды сопротивлений трансформатора сравнения токов, приводит к увеличению  $\alpha$ . По этой причине увеличивают значение  $\alpha$  (по сравнению с расчетным) и собственные паразитные емкости обмоток трансформатора сравнения токов.

На практике для того, чтобы убедиться, что в проектируемой мостовой цепи  $\alpha \geq 1$ , необходимо отключить контролируемое сопротивление  $Z_x$  от трансформатора сравнения токов и определить известными методами собственную резонансную частоту плеча  $q$ , когда его шунтирует сопротивление плеча сравнения. Если найденная при этом резонансная частота меньше рабочей частоты моста, то это означает, что  $\alpha > 1$ . В противном случае необходимо принимать меры к уменьшению определяемой резонансной частоты.

Заметим, что в рассмотренных емкостных трансформаторных мостах требование выбора величины  $\alpha \geq 1$  для обеспечения правильности формирования управляющих воздействий фазочувствительным указателем совпадает с другим требованием, выполнение которого позволяет повысить точность отдельного измерения емкости при наличии  $\operatorname{tg} \delta$  контролируемого сопротивления и конечной добротности трансформатора сравнения токов [5].

Настоящая работа выполнена под руководством к. т. н. К. М. Соболевского. Автор пользуется случаем выразить ему благодарность за ряд ценных замечаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. М. Соболевский, Б. Н. Панков, А. А. Ораевская. Прибор для измерения емкости конденсаторов в цеховых условиях с повышенной точностью.— Конференция по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Тезисы докладов и сообщений. Новосибирск, 1964.

2. Ф. Б. Гриневич, Т. Н. Мантуш. Об одной схеме уравновешенного автоматического процентного моста.—Конференция по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Тезисы докладов и сообщений. Новосибирск, 1964.
3. Г. В. Гессен. Теория и расчет мостов с индуктивно связанными плечами для измерения параметров конденсаторов при низких напряжениях. Л., Военная Академия связи, 1962.
4. Б. Н. Панков, К. М. Соболевский. Мост переменного тока с согласованными сопротивлениями в плечах и диагонали источника питания.—Электрические методы автоматического контроля. Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 9. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
5. Б. Н. Панков, К. М. Соболевский. О повышении точности квазиуравновешенных мостовых цепей.—Автометрия, 1965, № 4.

*Поступила в редакцию  
28 июня 1965 г.*

---