

В. Е. БУТТ, Б. Н. ПАНКОВ, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ  
(Новосибирск)

**О ПОГРЕШНОСТЯХ  
ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОСТОВ  
СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ  
НАПРЯЖЕНИЯ ИЛИ ТОКА**

В настоящее время для целей измерения параметров комплексных сопротивлений все более широко используются мостовые цепи на основе элементов с тесной индуктивной связью [1]. Возросшая популярность этих цепей объясняется наличием у них ряда положительных качеств, к числу которых относятся высокая помехозащищенность, возможность сравнительно простыми средствами и с высокой степенью точности получать необходимые величины плечевых отношений, большая стабильность этих отношений во времени и др. Задачам анализа метрологических характеристик мостовых цепей с тесной индуктивной связью посвящен ряд исследований. Из них многие, например [2—7], посвящены анализу погрешностей, которые возникают при наличии остаточных параметров простейших плеч с тесной индуктивной связью, включенных в диагонали питания или диагонали указателя моста (мосты с трансформатором напряжения или с компаратором токов). Известны также работы [8—11], в которых исследуются погрешности мостов с двумя парами простейших индуктивно связанных плеч отношения (двойных трансформаторных измерительных мостов). Остались, однако, совершенно не изученными предложенные сравнительно недавно и весьма популярные ныне трансформаторные мосты, в которых для расширения пределов измерения или для получения необходимой дискретности изменения плечевого отношения используются соответствующим образом включенные трансформаторы напряжения или тока [12—13].

Исследуем, какое влияние на погрешности трансформаторных мостов оказывают параметры вспомогательных трансформаторов напряжения или тока, включенных по схеме, предложенной в [12]. Будем предполагать, что измеряемое и образцовое сопротивления одного характера, а коэффициент связи между обмотками трансформаторов равен единице; последнее допущение вполне оправдано, поскольку при существующей технологии изготовления трансформаторов имеется возможность получить коэффициент связи между обмотками, достаточно близкий к единице [1]. Анализ проведем с учетом как активных сопротивлений обмоток трансформаторов, так и сопротивлений, вносимых в эти обмотки потерями в материале ферромагнитных сердечников трансформаторов; часто принимаемое допущение, что потери в материале

сердечника пренебрежимо малы, является необоснованным, поскольку используемые в настоящее время для получения хорошей связи между обмотками материалы с высокой магнитной проницаемостью имеют большие потери, приводящие к сильному снижению эффективной добротности обмоток трансформаторов, которая составляет в этих случаях величины порядка 3—10 и ниже. Уделяя основное внимание погрешностям, обусловленным вспомогательным трансформатором, для обеспечения наглядности расчетов и их упрощения не будем учитывать действия емкостей, шунтирующих обмотки основного трансформатора напряжения или компаратора токов. По-видимому, эти погрешности не будут существенно отличаться от исследованных в [6—10].

На рис. 1 и 2 приведены схемы анализируемых цепей с учетом отмеченных выше остаточных параметров. Указанные измерительные

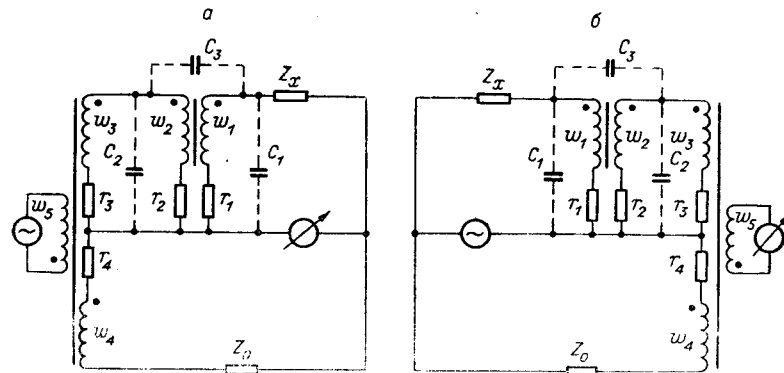


Рис. 1.

цепи с трансформаторным и автотрансформаторным включением основных плечевых элементов достаточно полно отражают свойства этого класса мостов. Обмотки трансформатора напряжения (см. рис. 1, а, 2, а) и компаратора токов (см. рис. 1, б, 2, б) с числами витков  $w_3$  и  $w_4$  имеют активные сопротивления  $r_3$  и  $r_4$ , а обмотки вспомогательных трансформаторов с числами витков  $w_1$  и  $w_2$  имеют активные сопротивления  $r_1$  и  $r_2$ . Вспомогательный трансформатор имеет паразитные межвитковые и межобмоточные емкости, характеризуемые эквивалентными величинами  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ . Как основные, так и вспомогательные трансформаторы имеют потери в материале сердечников.

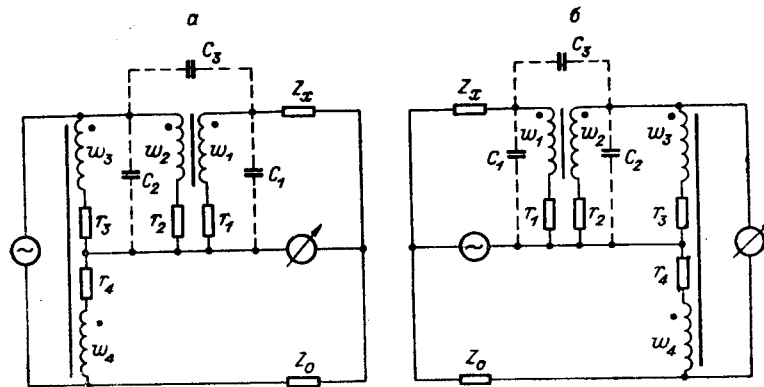


Рис. 2.

Измеряемое сопротивление  $Z_x$  индуктивного или емкостного характера представляется последовательной или параллельной схемой замещения; при этом образцовое комплексное сопротивление  $Z_0$  имеет одинаковый характер с измеряемым.

На первом этапе для наглядности анализа учитываются лишь активные сопротивления обмоток и активные сопротивления, вносимые в эти обмотки потерями в материале сердечников; действия паразитных емкостей, шунтирующих обмотки вспомогательного трансформатора, учитываются на втором этапе анализа.

Расчет приведенных выше цепей с целью определения искомых погрешностей проведем оказавшимся наиболее эффективным в данном случае методом контурных токов с использованием матричной записи коэффициентов систем уравнений [14]. Для цепи рис. 1, б при представлении  $Z_x$  и  $Z_0$  последовательными схемами замещения уравнения контурных токов имеют вид

$X_x(\operatorname{tg} \delta_x \pm j) + X_1(\operatorname{tg} \delta_1 + j) + r_1$		$-X_{12}(\operatorname{tg} \delta_1 + j)$		$\times$	$=$	$i_1$	$\dot{U}$
	$X_0(\operatorname{tg} \delta_0 \pm j) + X_4(\operatorname{tg} \delta_2 + j) + r_4$	$-X_{34}(\operatorname{tg} \delta_2 + j)$	$-X_{45}(\operatorname{tg} \delta_2 + j)$			$i_2$	$\dot{U}$
$-X_{12}(\operatorname{tg} \delta_1 + j)$	$-X_{34}(\operatorname{tg} \delta_2 + j)$	$X_2(\operatorname{tg} \delta_1 + j) + X_3(\operatorname{tg} \delta_2 + j) + r_{23}$	$X_{35}(\operatorname{tg} \delta_2 + j)$			$i_3$	
	$-X_{45}(\operatorname{tg} \delta_2 + j)$	$X_{35}(\operatorname{tg} \delta_2 + j)$	$X_5(\operatorname{tg} \delta_2 + j)$			$i_4$	

(знаки плюс и минус соответственно определяют индуктивный и емкостный характер исследуемого сопротивления). Величины  $\operatorname{tg} \delta_2$  и  $\operatorname{tg} \delta_1$  определяются соответственно потерями в материале сердечников основного и вспомогательного трансформаторов, а  $r_{23} = r_2 + r_3$ .

В момент равновесия

$$i_4 = \dot{U} \frac{\Delta_{14} + \Delta_{24}}{\Delta} = 0,$$

или

$$\Delta_{14} + \Delta_{24} = \Delta_{(1-2)4} = 0,$$

где

$$\Delta_{(1-2)4} = \begin{vmatrix} -X_x(\operatorname{tg} \delta_x \pm j) - X_1(\operatorname{tg} \delta_1 + j) - r_1 & X_0(\operatorname{tg} \delta_0 \pm j) + X_4(\operatorname{tg} \delta_2 + j) + r_4 & X_{12}(\operatorname{tg} \delta_1 + j) - X_{34}(\operatorname{tg} \delta_2 + j) \\ -X_{12}(\operatorname{tg} \delta_1 + j) & -X_{34}(\operatorname{tg} \delta_2 + j) & X_2(\operatorname{tg} \delta_1 + j) + X_3(\operatorname{tg} \delta_2 + j) + r_{23} \\ & -X_{45}(\operatorname{tg} \delta_2 + j) & X_{35}(\operatorname{tg} \delta_2 + j) \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $X_1, X_2$  — собственные индуктивные сопротивления обмоток вспомогательного трансформатора;  $X_3, X_4, X_5$  — собственные индуктивные сопротивления обмоток основного трансформатора;  $X_{12}, X_{34}, X_{35}, X_{45}$  — взаимные индуктивные сопротивления между обмотками вспомогательного и основного трансформаторов, причем

$$X_{12} = \sqrt{X_1 X_2}; \quad X_{34} = \sqrt{X_3 X_4}; \quad X_{35} = \sqrt{X_3 X_5}; \quad X_{45} = \sqrt{X_4 X_5}. \quad (2)$$

Преобразуя (1), с учетом (2) найдем

$$\Delta_{(1-2)4} = \begin{vmatrix} -X_x \frac{(\operatorname{tg} \delta_x \pm j)}{r_1} & X_0 (\operatorname{tg} \delta_0 \pm j) + r_4 & -\sqrt{\frac{X_1}{X_2}} r_{23} \\ -X_{12} (\operatorname{tg} \delta_1 + j) & & X_2 (\operatorname{tg} \delta_1 + j) + r_{23} \\ & -X_{45} & X_{25} \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

При использовании теоремы о сумме двух матриц [14] из (3) нетрудно получить два скалярных уравнения. Для этого, согласно [14], определитель третьего порядка  $\Delta_{(1-2)4}$  необходимо представить так:

$$\Delta_{(1-2)4} = \alpha + j \sum M_1^\beta A_1^\alpha - \sum M_2^\beta A_2^\alpha - j \beta,$$

где  $M_1^\beta$  и  $M_2^\beta$  — миноры первого и второго порядка определителя  $\beta$ ;  $A_1^\alpha$  и  $A_2^\alpha$  — алгебраические дополнения миноров первого и второго порядка определителя  $\alpha$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  — определители, элементы которых составлены соответственно из действительных и мнимых частей исходного определителя.

Для нашего случая

$$\alpha = \begin{vmatrix} -X_x \frac{\operatorname{tg} \delta_x}{r_1} & X_0 \operatorname{tg} \delta_0 + r_4 & -\sqrt{\frac{X_1}{X_2}} r_{23} \\ -X_{12} \operatorname{tg} \delta_1 & & X_2 \operatorname{tg} \delta_1 + r_{23} \\ & -X_{45} & X_{25} \end{vmatrix}; \quad \beta = \begin{vmatrix} \mp X_x & \pm X_0 & \\ -X_{12} & & X_2 \\ & & \end{vmatrix}.$$

Полученные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} & -p_1 r_{23} X_{12} \operatorname{tg} \delta_1 + p_2 X_{12} X_0 \operatorname{tg} \delta_0 \operatorname{tg} \delta_1 + p_2 r_4 X_{12} \operatorname{tg} \delta_1 \mp \\ & \mp p_2 X_0 X_{12} \pm X_2 X_x - r_1 r_{23} - r_{23} X_x \operatorname{tg} \delta_x - r_1 X_2 \operatorname{tg} \delta_1 - \\ & - X_2 X_x \operatorname{tg} \delta_x \operatorname{tg} \delta_1 = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \pm p_2 X_0 X_{12} \operatorname{tg} \delta_1 \mp r_{23} X_x \mp X_x X_2 \operatorname{tg} \delta_1 + p_2 X_{12} r_4 + \\ & + p_2 X_{12} X_0 \operatorname{tg} \delta_0 - p_1 r_{23} X_{12} - r_1 X_2 - X_2 X_x \operatorname{tg} \delta_x = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

В (4) и (5)  $p_1 = \frac{w_1}{w_2}$ ,  $p_2 = \frac{w_3}{w_4}$ . Из совместного решения систем уравнений (4) и (5) получим выражения для реактивной составляющей  $X_x$  и тангенса угла потерь  $\operatorname{tg} \delta_x$  исследуемого комплексного сопротивления:

$$X_x = \frac{X_0 p_1 p_2 \pm \frac{r_{23} (r_1 + r_x)}{X_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1)}}{1 + \frac{r_{23} \operatorname{tg} \delta_1}{X_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1)}}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_0 \frac{X_0 p_1 p_2}{X_x} - \frac{1}{X_x} (r_1 + p_1^2 r_{23} - p_1 p_2 r_4) - \\ - \frac{r_{23}}{X_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1)} \left( \operatorname{tg} \delta_1 \frac{r_1 + r_x}{X_x} \pm 1 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения для  $X_x$  и  $\operatorname{tg} \delta_x$ , полученные из уравнения равновесия мосто-

вой цепи рис. 1 а аналогичны (6) (7). Для мостовой цепи рис. 2 а, б

При нарушении условия (7а) выражения для  $X'_x$  и  $\text{tg } \delta'_x$ , полученные для цепей с автотрансформатором (см. рис. 2, а, б), отличаются от (6) и (7) и содержат дополнительные члены, включающие в себя параметры автотрансформаторов.

После несложных преобразований из (6) и (7) получим выражения для относительной погрешности по реактивной составляющей  $X'_x$  и абсолютной погрешности по тангенсу угла потерь  $\text{tg } \delta'_x$  исследуемого комплексного сопротивления:

$$\delta X'_x = \frac{\text{tg } \delta_1 \mp \text{tg } \delta_{\text{эк}}}{\frac{X_2 (1 + \text{tg}^2 \delta_1)}{r_{23}} \pm \text{tg } \delta_{\text{эк}}}; \quad (8)$$

$$\Delta \text{tg } \delta'_x = -\delta X'_x \text{tg } \delta_0 + \frac{\Delta r_{\text{пр}}}{X_0 \rho_1 \rho_2} (1 + \delta X'_x) + \frac{r_{23}}{X_2 (1 + \text{tg}^2 \delta_1)} \times \\ \times [(1 + \delta X'_x) \text{tg } \delta_1 \text{tg } \delta_{\text{эк}} \pm 1], \quad (9)$$

где  $\delta X'_x$  и  $\Delta \text{tg } \delta'_x$  — относительная и абсолютная погрешности от влияния активных сопротивлений проводов обмоток и потерь в материале сердечников трансформаторов;

$$\Delta r_{\text{пр}} = r_1 + \rho_1^2 r_{23} - \rho_1 \rho_2 r_4; \quad \text{tg } \delta_{\text{эк}} = \frac{r_1 + r_x}{X_0 \rho_1 \rho_2}.$$

При перемене мест исследуемого и образцового сопротивлений погрешности по реактивной составляющей и тангенсу угла потерь определяются из выражений:

$$\delta X'_x = \frac{\text{tg } \delta_1 \mp \text{tg } \delta_{\text{эк}}}{-\text{tg } \delta_1 - \frac{X_2 (1 + \text{tg}^2 \delta_1)}{r_{23}} \pm \text{tg } \delta_{\text{эк}}};$$

$$\Delta \text{tg } \delta'_x = -\delta X'_x \text{tg } \delta_0 - \frac{\frac{\Delta r_{\text{пр}}}{X_0} + \frac{r_{23}}{X_2 (1 + \text{tg}^2 \delta_1)} (\text{tg } \delta_1 \text{tg } \delta_{\text{эк}} \pm 1)}{1 + \frac{r_{23}}{X_2 (1 + \text{tg}^2 \delta_1)} (\text{tg } \delta_1 \mp \text{tg } \delta_{\text{эк}})}; \\ \text{tg } \delta_{\text{эк}} = \frac{r_1 + r_0}{X_0}.$$

Можно говорить, что величины этих погрешностей примерно одинаковы.

Выражения для погрешностей при параллельной схеме замещения исследуемого и образцового сопротивлений одинакового характера нами были также получены путем использования известных формул пересчета с последовательной схемы замещения на параллельную. Эти выражения более громоздки и здесь не приводятся, поскольку выводы, вытекающие из их рассмотрения, не отличаются от выводов, приведенных ниже и полученных из анализа (6) — (9) с учетом (7а).

1. При наличии активных сопротивлений проводов обмоток на точность измерения влияют лишь потери в материале сердечника допол-

нительного трансформатора. Потери в материале сердечника основного трансформатора напряжений или компаратора токов могут влиять на погрешность измерения только в цепях с автотрансформаторным включением при нарушении условия согласования активных сопротивлений у основных плечевых элементов.

2. Погрешность измерения тангенса угла потерь исследуемого объекта в значительной степени зависит от соотношения между сопротивлениями обмоток обоих трансформаторов (см. величину  $\Delta r_{\text{пр}}$ ). При этом для рассматриваемых мостов, как и для двойных трансформаторных мостов без вспомогательного трансформатора [9], характерно то, что активные сопротивления обмоток влияют на  $\Delta \text{tg } \delta_x$  и в том случае, если они пропорциональны числам витков обмоток; лишь в частном случае, когда  $p_1=1$ , сопротивления основного трансформатора не влияют на точность измерения.

3. При стремлении к нулю сопротивления петли  $r_{23}$ , образованной обмоткой дополнительного и обмоткой основного трансформаторов напряжения или дополнительного трансформатора и компаратора токов, потери в материале сердечника дополнительного трансформатора не оказывают влияния на точность измерения. В этом случае погрешность полностью исчезает по реактивной составляющей и уменьшается по тангенсу угла потерь.

При  $r_{23} \neq 0$  тангенс угла потерь  $\text{tg } \delta_1$  не влияет на точность измерения  $X_x$  и  $\text{tg } \delta_x$  в случае, если сопротивление  $X_2$  стремится к бесконечности. Это означает, что дополнительный трансформатор не должен шунтировать обмотки компаратора токов или трансформатора напряжения.

4. Потери в материале сердечника дополнительного трансформатора могут при определенных значениях тангенса угла потерь исследуемого конденсатора не влиять, как это видно из (7) и (9), на погрешность измерения по  $\text{tg } \delta_x$ .

Для этого необходимо, чтобы

$$\text{tg } \delta_1 = \frac{X_x}{r_1 + r_x} = \text{tg } \varphi, \quad (10)$$

где  $\varphi$  является фазовым углом исследуемого конденсатора с учетом  $r_1$ .

Из выражения (8) следует, что при измерении индуктивности катушек потери в материале сердечника не влияют на точность измерения при

$$\text{tg } \delta_1 = \frac{r_1 + r_x}{X_0 p_1 p_2} = \frac{r_1 + r_x}{X_x (1 + \delta X'_x)} = \text{tg } \delta_{\text{эк}}. \quad (11)$$

Более наглядно эти явления объясняются с помощью векторной диаграммы, изображенной на рис. 3. Здесь  $U$  — напряжение на исследуемом объекте;  $I_L$  и  $I_C$  — токи в исследуемой ветви моста соответственно при измерении параметров катушек индуктивности и конденсаторов (стрелками обозначены направления, по которым изменяются фазовые углы токов в исследуемой ветви при увеличении потерь в материале сердечника дополнительного трансформатора).

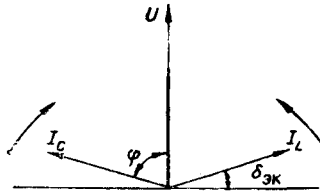


Рис. 3.

5. Рассматривая выражение (6) для реактивной составляющей исследуемого объекта, замечаем, что при некоторых значениях активных сопротивлений проводов и параметров дополнительного трансформатора мост при

измерении емкости конденсаторов может быть приведен в равновесие даже в том случае, если реактивная составляющая исследуемого конденсатора равна нулю; при этом относительная погрешность измерения емкости будет равна бесконечности, на что указывает знак минус в знаменателе выражения (8). И наоборот, при измерении индуктивности катушек мост в некоторых случаях может быть приведен в равновесие, как это видно из (6), при нулевой образцовой индуктивности. Такие же выводы можно сделать и относительно тангенса угла потерь исследуемого комплексного сопротивления.

Расчет погрешностей от влияния шунтирующих емкостей проводится аналогично проведенному выше. Пренебрегая составляющими второго порядка малости, погрешность от влияния активных сопротивлений и паразитных емкостей по реактивной составляющей  $\delta X_x$  и тангенсу угла потерь  $\Delta \operatorname{tg} \delta_x$  можно представить как

$$\delta X_x \simeq \delta X'_x + \delta X''_x; \quad \Delta \operatorname{tg} \delta_x \simeq \Delta \operatorname{tg} \delta'_x + \Delta \operatorname{tg} \delta''_x,$$

где  $\delta X''_x$  и  $\Delta \operatorname{tg} \delta''_x$  — дополнительные составляющие погрешности по  $X_x$  и  $\operatorname{tg} \delta_x$ , которые возникают, если при наличии активных сопротивлений проводов обмоток и потерь в материале сердечников еще имеются и паразитные емкости. Эти составляющие определяются из выражений:

$$\delta X''_x \simeq \mp \frac{r_x}{X_0 p_1 p_2} (\operatorname{tg} \delta_3 + \operatorname{tg} \delta_4 + \operatorname{tg} \delta_5) + \frac{1}{p_1 X_8} (r_1 + p_1^2 r_2) \operatorname{tg} \delta_1 \pm \pm \frac{1}{X_8} \frac{r_1 + p_1^2 r_2}{X_0 p_1 p_2} \left[ p_2 (r_0 + r_4) - r_3 \left( 1 + \frac{X_8}{X_7} \right) \right]; \quad (12)$$

$$\Delta \operatorname{tg} \delta''_x \simeq \pm (\operatorname{tg} \delta_3 + \operatorname{tg} \delta_4 + \operatorname{tg} \delta_5) \mp \frac{1}{X_8} \frac{p_2 X_0}{X_x} (r_1 + p_1^2 r_2) \quad (13)$$

( $X_6, X_7, X_8$  обозначены реактивные сопротивления конденсаторов  $C_1, C_2$  и  $C_3$ ). В свою очередь,

$$\operatorname{tg} \delta_3 = r_1 \left( \frac{1}{X_6} + \frac{1}{X_8} \right); \quad \operatorname{tg} \delta_4 = r_2 p_1^2 \left( \frac{1}{X_6} + \frac{1}{X_8} \right);$$

$$\operatorname{tg} \delta_5 = r_3 \left[ \frac{1}{X_7} + \frac{1}{X_6} p_1^2 + \frac{1}{X_8} (p_1 - 1)^2 \right].$$

При наличии пропорциональности между сопротивлениями обмоток и числами их витков из (12) и (13) имеем:

$$\delta X''_x \simeq \mp \frac{r_x}{X_0 p_1 p_2} (\operatorname{tg} \delta_3 + \operatorname{tg} \delta_4 + \operatorname{tg} \delta_5) \mp \mp \frac{r_1}{X_8} \left( 1 + \frac{1}{p_1} \right) \left[ \operatorname{tg} \delta_0 \left( \frac{r_4}{r_0} \frac{X_8}{X_7} - 1 \right) \mp \operatorname{tg} \delta_1 \right];$$

$$\Delta \operatorname{tg} \delta''_x \simeq \pm (\operatorname{tg} \delta_3 + \operatorname{tg} \delta_4 + \operatorname{tg} \delta_5) \mp \frac{r_1}{X_8} \left( 1 + \frac{1}{p_1} \right) \frac{X_0 p_1 p_2}{X_x}.$$

Таким образом, при наличии паразитных межобмоточных и межвитковых емкостей у вспомогательного трансформатора возникают дополнительные погрешности измерения величин  $X_x$  и  $\operatorname{tg} \delta_x$ , которые определяются в основном суммой тангенсов углов потерь, обусловленных активными сопротивлениями и паразитными емкостями, пересчитанными с учетом коэффициента трансформации дополнительного трансформатора. При этом погрешность по  $X_x$  от влияния шунтирующих

емкостей уменьшается, если измеряются сопротивления с малыми тангенсами углов потерь.

Проведенный анализ и сравнение полученных результатов с известными исследованиями для мостовых цепей без вспомогательного трансформатора позволяют считать, что, несмотря на наличие дополнительного источника погрешностей (им является вспомогательный трансформатор), в большинстве случаев схемы со вспомогательным трансформатором позволяют при соответствующем выборе параметров вспомогательного и основного трансформаторов получить высокую точность измерения. Что же касается целесообразности применения вспомогательных трансформаторов, то в каждом конкретном случае она определяется как требуемой точностью измерения, так и технологическими возможностями и стоимостью используемых при этом материалов (по сравнению со случаем, когда вспомогательный трансформатор не используется, а требуемая величина отношения достигается с допустимой погрешностью только за счет основного трансформатора).

Полученные в результате анализа выражения можно использовать для расчета по заданной допустимой погрешности измерения конструктивных параметров трансформаторных измерительных цепей с дополнительным трансформатором напряжения или тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский. Мосты переменного тока с индуктивно связанными плечевыми элементами.— *Автометрия*, 1965, № 1.
2. C. W. Oatley, J. G. Yates. Bridges with Coupled Inductive Ratio Arms as Precision Instruments for the Comparison of Laboratory Standards of Resistance or Capacitance.— *Proc. IEE*, 1954, v. 101, P. III.
3. А. Л. Грохольский. К вопросу о погрешности моста с индуктивно связанными плечами при шунтировании их сопротивлениями.— В сб. «Электрические методы автоматического контроля» (Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 5). Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
4. Г. В. Гессен. Теория и расчет мостов с индуктивно связанными плечами для измерения параметров конденсаторов при низких напряжениях. Л., Изд-во Военной академии связи, 1962.
5. Е. А. Будницкая, В. П. Карпенко. Погрешности моста с индуктивными компараторами тока.— В сб. «Повышение точности и автоматизация измерительных систем». Киев, «Наукова думка», 1965.
6. Ф. Б. Гриневич, Е. Ю. Неболюбов. Погрешности схемы сравнения напряжений с тесной индуктивной связью между плечами.— В сб. «Элементы и схемы устройств автоматического контроля». Фрунзе, «ИЛИМ», 1966.
7. А. В. Чеботарев. О погрешностях измерительных схем цифровых мостов, предназначенных для измерения параметров конденсаторов.— В сб. «Элементы и схемы устройств автоматического контроля». Фрунзе, «ИЛИМ», 1966.
8. H. A. Clark, P. V. Vanderlyn. Double-ratio A.— *C. Bridges with Inductively-coupled Ratio Arms.— Proc. IEE*, 1949, v. 96, P. III.
9. А. В. Чеботарев. Методы построения и схемы цифровых экстремальных мостов переменного тока. Автореферат канд. дисс. Новосибирск, 1965.
10. В. П. Карпенко. О расчете некоторых погрешностей в двойных трансформаторных измерительных мостах.— *Автометрия*, 1966, № 3.
11. Е. Ю. Неболюбов. Исследование и расчет дискретно уравниваемых мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. Автореферат канд. дисс. Фрунзе, 1967.
12. Ф. Б. Гриневич, Б. Н. Панков и К. М. Соболевский. Мост переменного тока с тесной индуктивной связью. Авторское свидетельство № 167247.— *Бюллетень изобретений*, 1965, № 1.
13. Ф. Б. Гриневич, А. В. Чеботарев. Новые измерительные схемы цифровых автоматических мостов переменного тока.— В сб. «Элементы и схемы устройств автоматического контроля». Фрунзе, «ИЛИМ», 1966.
14. В. П. Сигорский. Анализ электронных схем. Киев, Гостехиздат УССР, 1963.

Поступила в редакцию  
8 января 1968 г.