

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.317.733.025

В. П. КАРПЕНКО

(Киев)

**О РАСЧЕТЕ НЕКОТОРЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
 В ДВОЙНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОСТАХ**

Анализу погрешностей одинарных мостовых цепей с тесной индуктивной связью между плечами, а также исследованию влияния отдельных паразитных факторов на точность этих мостов посвящено большое количество работ, как отечественных, так и зарубежных [1—8]. В то же время вопрос о погрешности двойных трансформаторных измерительных мостов, в которых применяются индуктивные делители на входе и индуктивные компараторы тока на выходе, является еще мало изученным [9, 10].

В настоящей работе дан сравнительный анализ нескольких наиболее распространенных двойных мостовых цепей, произведена оценка основных погрешностей, возникающих за счет влияния активных сопротивлений обмоток, а также приведена весьма простая методика оценки влияния паразитных емкостей, шунтирующих отдельные элементы плеч, на точность рассматриваемых цепей; излагаемая методика является развитием методики, описанной в [11].

На рисунке приведены три типа наиболее распространенных двойных мостов. Цепи *a* и *б* каждого типа отличаются только автотрансформаторным или трансформаторным подсоединением генератора. Основные уравнения равновесия для обеих цепей (*a* и *б*) каждого типа оказываются аналогичными. В рассматриваемых цепях Z_1 — измеряемое комплексное сопротивление; Z_2 — образцовое плечо сравнения.

Если связь между обмотками идеальная, а активные сопротивления обмоток пропорциональны соответствующим количествам витков, то результирующие выражения для условий равновесия рассматриваемых типов цепей с учетом влияния активных сопротивлений обмоток имеют вид:

$$Z_1 = \frac{Z_1}{p p_1} \left[1 + \frac{R_4 (1 - p_1) + R_6 (1 - p)}{Z_2} \right] \quad (\text{тип I}); \quad (1)$$

$$Z_1 = \frac{Z_2}{p p_2} \left[1 + \frac{(R_4 + R_6) (1 - p_2)}{Z_2} \right] \quad (\text{тип II}); \quad (2)$$

$$Z_1 = \frac{Z_2}{p_3 p_1} \left[1 + \frac{(R_4 + R_6) (1 - p_3)}{Z_2} \right] \quad (\text{тип III}), \quad (3)$$

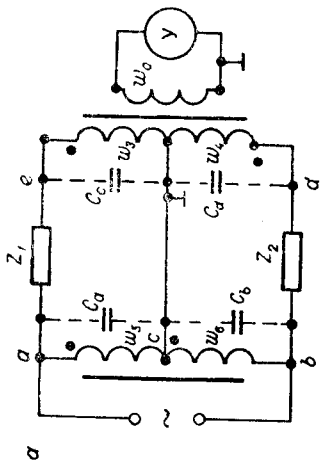
где

$$p = \frac{\omega_4}{\omega_3}; \quad p_1 = \frac{\omega_6}{\omega_5}; \quad p_2 = \frac{p_1}{1 + p_1} = \frac{\omega_6}{\omega};$$

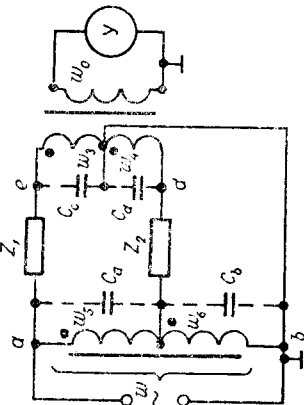
$$p_3 = \frac{p}{1 + p} = \frac{\omega_4}{\omega_2}; \quad \omega = \omega_5 + \omega_6; \quad \omega_2 = \omega_3 + \omega_4.$$

Как видно из уравнений (1)—(3), активные сопротивления обмоток во всех рассматриваемых цепях не будут влиять на точность измерений в случае, если $p = p_1 = p_2 = p_3 = 1$. При таком соотношении витков мосты типа I малопрактичны, а мосты типа II и III преобразуются соответственно в одинарные цепи только с компаратором тока или с индуктивным делителем напряжения. Если все приведенные отношения витков (p, p_1, p_2 и p_3) намного меньше единицы, уравнения равновесия этих мостов с учетом влияния активных сопротивлений обмоток становятся идентичными.

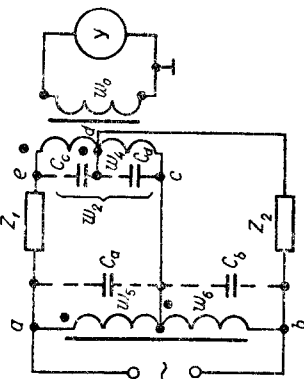
Tun I



Tun II



Tun III



б

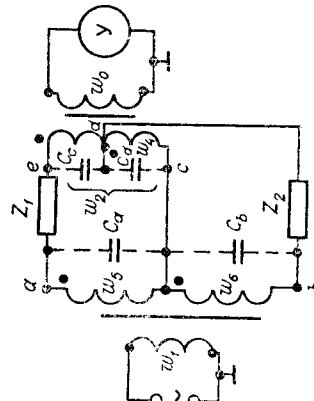
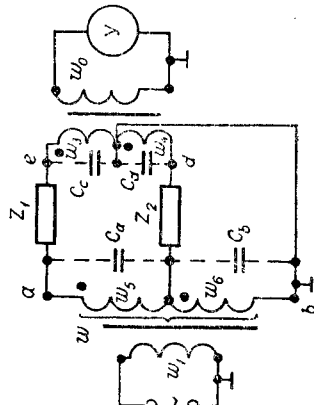
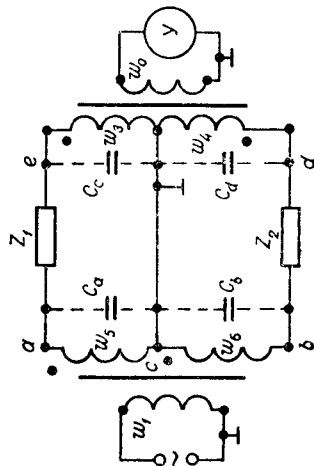


Рис. 1.

При анализе влияния паразитных параметров и связей между отдельными элементами цепи на погрешность измерения ограничимся рассмотрением только «собственных» емкостей обмоток трансформаторов, считая их сосредоточенными и подключенными между узловыми точками (см. рисунок). Как показано в [1, 2], эти емкости шунтируют активные сопротивления обмоток.

Погрешности за счет шунтирования паразитными емкостями активных сопротивлений (см. [11]) могут быть учтены при помощи фиктивной дополнительной постоянной времени этих активных сопротивлений и найдены из выражения $\gamma_R = j\omega\tau'$, где $\tau' = -RC'$; C' — паразитная емкость, шунтирующая обмотку; R — активное сопротивление обмотки. При этом погрешности за счет шунтирования обмоток трансформаторов могут быть очень легко определены с помощью мнемонического правила непосредственно по виду основного уравнения равновесия для каждой из рассматриваемых цепей и представлены в виде алгебраической суммы погрешностей каждого элемента, входящего в данное условие равновесия. Если элемент находится в знаменателе, то его погрешность входит с обратным знаком.

Коэффициенты трансформации соответствующих обмоток в выражениях (1)–(3) при определении погрешностей формально необходимо рассматривать как отношения активных сопротивлений соответствующих обмоток. При этом условия равновесия могут быть представлены выражениями:

$$Z_1 \cong \frac{Z_2}{p p_1} (1 - \gamma_p - \gamma_{p_1}) \left\{ 1 + \frac{R_4 (1 + \gamma_{R_4})}{Z_2} [1 - p_1 (1 + \gamma_{p_1})] + \frac{R_6 (1 + \gamma_{R_6})}{Z_2} [1 - p (1 - \gamma_p)] \right\} \quad (\text{тип I}); \quad (4)$$

$$Z_1 \cong \frac{Z_2}{p p_2} (1 - \gamma_p - \gamma_{p_2}) \left\{ 1 + \frac{R_4 (1 + \gamma_{R_4}) + R_6 (1 + \gamma_{R_6})}{Z_2 (1 + \gamma_{Z_2})} \times \right. \\ \left. \times [1 - p_2 (1 + \gamma_{p_2})] \right\} \quad (\text{тип II}); \quad (5)$$

$$Z_1 \cong \frac{Z_2}{p_3 p_1} (1 - \gamma_{p_3} - \gamma_{p_1}) \left\{ 1 + \frac{R_4 (1 + \gamma_{R_4}) + R_6 (1 + \gamma_{R_6})}{Z_2 (1 + \gamma_{Z_2})} \times \right. \\ \left. \times [1 - p_3 (1 + \gamma_{p_3})] \right\} \quad (\text{тип III}), \quad (6)$$

где

$$\gamma_p = -j\omega R_3 (p C_d - C_c); \quad \gamma_{R_4} = -j\omega R_4 C_d; \\ \gamma_{R_6} = -j\omega R_6 C_b; \quad \gamma_{p_1} = -j\omega R_5 (p_1 C_b - C_a); \quad \gamma_{Z_2} = -j\omega C_{bd} Z_2. \quad (7)$$

Поскольку для γ_{p_2} необходимо учитывать также частичную емкость, шунтирующую ω_5 , а емкость, шунтирующая всю обмотку $\omega = \omega_5 + \omega_6$, на точность измерений не влияет, то

$$\gamma_{p_2} = (1 - p_2) (\gamma_{R_6} - \gamma_{R_5}) = \gamma_{p_1} (1 - p_2); \quad \gamma_{R_5} = -j\omega C_a R_5. \quad (8)$$

Аналогичным образом можно получить:

$$\gamma_{p_3} = (1 - p_3) (\gamma_{R_4} - \gamma_{R_5}) = \gamma_p (1 - p_3); \quad \gamma_{R_5} = -j\omega C_c R_5. \quad (8a)$$

При последовательной схеме замещения образцового плеча $Z_2 = R_2 \pm jX_2$,

$$\gamma_{Z_2} = -j\omega C_{bd} R_2 \pm \omega C_{bd} X_2$$

Так как обмотки в реальных цепях выполняются таким образом, что их активные сопротивления по сравнению с сопротивлениями плеч Z_1 и Z_2 невелики, то выражения в фигурных скобках, представляющие собой произведения погрешностей из-за активных сопротивлений обмоток на погрешности из-за шунтирования их паразитными емкостями,

будут величинами второго порядка малости. Поэтому погрешности из-за влияния шунтирующих паразитных емкостей могут быть определены по упрощенной формуле равновесия, общей для всех рассматриваемых цепей:

$$Z_1 \cong \frac{Z_2}{\rho_{н.д} \rho_{т.к}} (1 - \gamma_{\rho_{н.д}} - \gamma_{\rho_{т.к}}),$$

где $\rho_{н.д}$ — коэффициент трансформации индуктивного делителя напряжения;

$\rho_{т.к}$ — коэффициент трансформации компаратора токов;

$\gamma_{\rho_{н.д}}$ и $\gamma_{\rho_{т.к}}$ — соответственно погрешности, вносимые шунтированием паразитными емкостями активных сопротивлений обмоток, определяемых коэффициентами трансформации соответствующих цепей, согласно равенствам (7), (8), (8а).

Приведенные в работе условия равновесия для ряда наиболее распространенных двойных трансформаторных измерительных мостов могут быть использованы при расчете погрешностей, обусловленных влиянием активных сопротивлений и собственных емкостей обмоток.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. М. Соболевский, Ю. А. Шакола. Защита мостов переменного тока Киев. Изд-во АН УССР, 1957.
2. А. Л. Грохольский. К вопросу о погрешности моста с индуктивно связанными плечами при шунтировании их сопротивлениями.— Электрические методы автоматического контроля (Труды ИАЭ СО АН СССР), вып. 5. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
3. H. P. Leslie. Choosing Transformer Ratio-Arm Bridges.— The Proc. IEE, 1961, pt. B, v. 108, № 41.
4. A. M. Thompson. The Precise Measurement of Small Capacitance.— IRE Transactions on Instrumentation, 1958, v. 1—7, № 3.
5. H. A. Clark, P. B. Vanderlin. Double-Ratio Bridges with Inductively-Coupled Ratio-Arms.— Proc. IEE, 1949, pt III, v. 96.
6. C. W. Oatley, J. G. Yates. Bridges with Coupled Inductive Ratio-Arms as Precision Instruments for Laboratory Standards of Resistance or Capacitance.— The Proc. of IEE, 1954, pt III, v. 101, № 70.
7. A. C. Lynch. A Bridge Networks for the Precise Measurement of Direct Capacitance.— The Proc. of IEE, 1957, pt B, v. 104, № 16.
8. M. C. McGregor, J. F. Hersch и др. Новый прибор для измерения емкостей.— Экспресс-информация, серия «Контрольно-измерительная техника», 1960, № 3.
9. K. Fletcher. Мостовые трансформаторные схемы для измерения параметров электрических цепей.— Экспресс-информация, серия «Контрольно-измерительная техника», 1962, № 22.
10. K. Buttler. Мосты переменного тока с индуктивно связанными плечами.— Electronic Technology, 1960, v. 37, № 8.
11. Е. А. Будницкая, В. П. Карпенко. Некоторые вопросы точности четырехплечих мостовых схем.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды IV конференции, 1962 г.), т. 1. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.

Поступило в редакцию
12 ноября 1964 г.,
окончательный вариант —
15 ноября 1965 г.

УДК 62—503.53

Е. М. КАРПОВ, Л. Ф. КУЛИКОВСКИЙ
(Куйбышев)

О ТОЧНОСТИ ОТСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННОГО УГЛА ПРИЕМНЫМ УСТРОЙСТВОМ СИНХРОННО-СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Во многих случаях измерительной практики требуется измерить и передать на расстояние пространственный угол. Очень важно, например, измерять углы наклона нефтяных и газовых скважин в процессе бурения и результаты измерений передавать на поверхность, чтобы корректировать направление скважин.