

Ф. Б. ГРИНЕВИЧ, Е. Е. ДОБРОВ, К. Б. КАРАНДЕЕВ

(Новосибирск)

## АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫЕ МОСТОВЫЕ ЦЕПИ

Приводятся схемы автокомпенсационных мостов, предназначенные для измерения активной и реактивной составляющих комплексных сопротивлений и проводимостей, емкости и тангенса угла потерь, индуктивности и добротности. Показывается, что линии уравнивания описанных мостовых цепей являются прямыми. Это облегчает процесс уравнивания и улучшает динамические свойства приборов.

В электроизмерительной технике весьма актуальной является разработка быстродействующих автоматических мостов. Такие приборы в первую очередь необходимы при измерении различных быстроизменяющихся неэлектрических величин (перемещения, вибрация, влажность в потоке, давления и т. п.) с помощью датчиков комплексного сопротивления. Кроме того, быстродействующие мосты могут найти применение и при автоматическом контроле электрических величин в электротехнической и радиотехнической промышленности (контроль электроизоляционных материалов, сортировка радиодеталей и т. п.). Ниже рассматривается разновидность автоматических мостов переменного тока, уравнивание которых основано на принципе компенсации и производится путем регулировки напряжений в плечах мостовой цепи без каких-либо изменений образцовой меры. Достоинствами подобных приборов являются высокое быстродействие, сравнительно небольшая погрешность и улучшенная сходимость.

Обычно уравнивание моста производится при помощи реверсивных двигателей [1]. Однако в силу инерционности последних такие мосты не могут быть быстродействующими. В лучшем случае время уравнивания сводится к 1—2 сек. Скорость уравнивания может быть существенно увеличена при переходе на дискретное уравнивание. Но цифровые мосты сложны и их применение рационально только при высокоточных измерениях [2].

Весьма высоким быстродействием (время уравнивания порядка 0,01—0,001 сек) могут обладать аналоговые мостовые цепи, уравнивание которых основано на использовании различного рода управляемых элементов с малой инерционностью, включаемых в одно из плеч моста и выполняющих роль переменной образцовой меры. Описано большое количество таких цепей [3, 4, 5], отличающихся в основном типом управляемого элемента (термосопротивления, болометры, электрические лампы накаливания, индуктивные и магнитострикцион-

ные преобразователи, фотосопротивления, полупроводниковые диоды и триоды, вариконды и т. п.). Характерной особенностью подобных устройств является то, что отсчет измеряемой величины производится по уровню управляющего сигнала (электрический ток или напряжение). В связи с этим нередко возникают большие погрешности измерения, обусловленные нестабильностью функции преобразования управляющий сигнал — параметр.

Принципиально возможно построить автоматический мост таким образом, что отсчет измеряемой величины будет производиться не по управляющему сигналу, а по значению напряжения (тока) на каком-либо участке мостовой цепи. На рис. 1 в качестве примера представлен

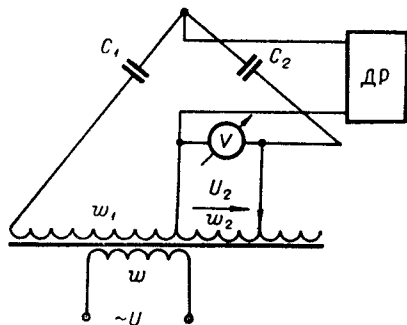


Рис. 1.

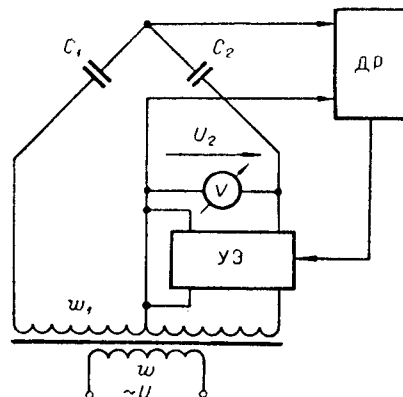


Рис. 2.

мост с тесной индуктивной связью, состоящий из трансформатора напряжения, конденсатора неизвестной емкости  $C_1$ , образцового конденсатора  $C_2$ , детектора равновесия ДР и вольтметра  $V$ , являющегося выходным прибором устройства. Если цепь приведена в состояние равновесия путем изменения числа витков одной из обмоток трансформатора, то величина измеряемой емкости может быть отсчитана по напряжению  $U_2$ , измеряемому вольтметром, поскольку

$$U_2 = U \frac{w_1}{w} \frac{C_1}{C_2}, \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение источника питания;  
 $w$  и  $w_1$  — числа витков соответствующих обмоток трансформатора.

Из (1) видно, что при определении  $C_1$  число витков обмотки  $w_2$  не используется; следовательно, нестабильность плеча  $w_2$  не будет вызывать появления погрешностей и в качестве регулируемого плеча можно использовать управляемый элемент с нестабильными характеристиками. Реализация этой возможности приводит нас к схеме, представленной на рис. 2. Уравновешивание моста производится с помощью управляемого элемента УЭ. Выходное напряжение мостовой цепи поступает на детектор равновесия ДР. Вырабатываемое здесь регулирующее воздействие передается на управляемый элемент, выходное напряжение которого изменяется в таком направлении, чтобы уменьшить сигнал неравновесия моста. Процесс уравновешивания заканчивается, когда напряжение в измерительной диагонали становится близким к нулю.

Если управляемый элемент обладает малой инерционностью, быстрое действие устройства оказывается весьма большим. В то же время

выходное напряжение цепи  $U_2$  по-прежнему связано с измеряемой емкостью  $C_1$  выражением (1) и в принципе не зависит от характеристик детектора равновесия и управляемого элемента. При достижении достаточно полной компенсации общая погрешность измерения определяется точностью выходного вольтметра и стабильностью напряжения питания цепи  $U$ . Существующие методы измерения и стабилизации переменных напряжений позволяют довести эту погрешность до нескольких десятых долей процента.

Отметим, что устройство может быть использовано и при измерении индуктивностей. В этом случае для получения линейной шкалы измеряемый и образцовый элементы следует поменять местами.

Итак, существует возможность создания быстродействующих автоматических мостов, точность которых не зависит от стабильности характеристик управляемых элементов и определяется в основном погрешностью выходного прибора. Поскольку уравнивание таких мостов основано на принципе компенсации и происходит путем регулировки токов и напряжений в ветвях мостовой цепи без каких-либо изменений образцовой меры, такие приборы могут быть названы автокомпенсационными мостами\* переменного тока. Принципиальное сходство электрических процессов позволяет использовать при разработке автокомпенсационных мостов цепи уравнивания, предложенные в последнее время для автокомпенсаторов переменного тока, применяемых в геофизической аппаратуре [6, 7].

Простейшей модификацией автокомпенсационных мостовых цепей являются устройства, в которых роль детектора равновесия и управляемого элемента выполняет усилитель. Измерение выходного напряжения усилителя с помощью двух квадратурных детекторов позволяет произвести отсчет активного и реактивного сопротивлений контролируемого объекта. Такие цепи предложены и описаны в [8, 9, 10]. Применительно к измерению емкости анализ погрешностей и устойчивости подобных устройств дан в [11]. Основным недостатком автокомпенсационных мостов, основан-

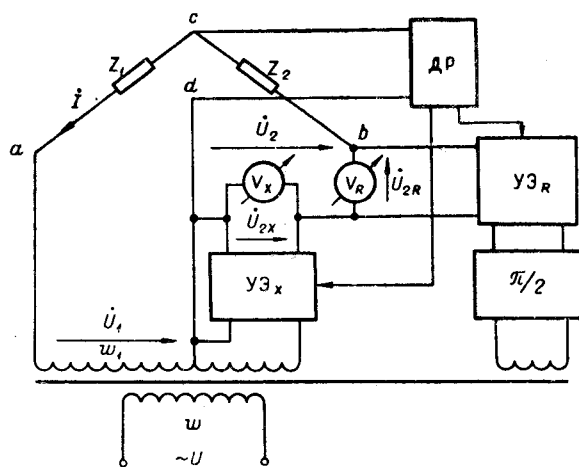


Рис. 3.

но к измерению емкости анализ погрешностей и устойчивости подобных устройств дан в [11]. Основным недостатком автокомпенсационных мостов, основан-

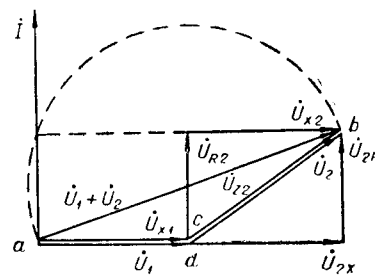


Рис. 4.

ных на указанном принципе, является большая погрешность, возникающая при измерении активного сопротивления элементов, обладающих высокой добротностью (малым тангенсом угла потерь), и обусловленная дрейфом нуля квадратурного детектора.

\* Согласно ГОСТ 1845—59 измерительные приборы с глубокой отрицательной обратной связью называются компенсационными.

Можно предложить более совершенную автокомпенсационную мостовую схему (рис. 3), предназначенную для измерения активной  $R_2$  и реактивной  $X_2$  составляющих комплексного сопротивления  $Z_2$ . Сопротивление  $Z_1$  является образцовым. Напряжение  $U_1$  стабилизировано по амплитуде. Компенсационное напряжение  $U_2$  равно сумме двух составляющих  $U_{2R}$  и  $U_{2X}$ , сдвинутых по фазе на угол  $\pi/2$ . В процессе уравнивания амплитуды напряжений  $U_{2R}$  и  $U_{2X}$  изменяются с помощью управляемых элементов  $УЭ_R$  и  $УЭ_X$  до тех пор, пока напряжение на измерительной диагонали моста не станет равным нулю. При этом сигналы управления снимаются с детектора равновесия. На рис. 4 представлена векторная диаграмма, соответствующая полной компенсации при условии, что измеряемое сопротивление  $Z_2$  носит емкостный характер, а образцовая мера  $Z_1$  представляет собой емкость без потерь. Как видно из векторной диаграммы, составляющим  $U_{2R}$  и  $U_{2X}$  приданы такие значения, что вектор  $U_1$  совпадает с вектором падения напряжения на образцовом конденсаторе  $U_{X1}$ , а вектор компенсационного напряжения  $U_2$  равен вектору падения напряжения на измеряемом сопротивлении  $U_{Z2}$ . При этом напряжение между точками  $c$  и  $d$  равно нулю. Из векторной диаграммы после простейших преобразований можно получить:

$$U_{2R} = U \frac{\omega_1}{\omega} \frac{R_2}{X_1}; \quad (2)$$

$$U_{2X} = U \frac{\omega_1}{\omega} \frac{X_2}{X_1}.$$

Выражения (2) показывают, что отсчет измеряемых компонент может быть произведен по шкалам вольтметров  $V_R$  и  $V_X$ . Как и раньше, результат измерения не зависит от характеристик управляемых элементов.

В [12] описана аналогичная схема для измерения активной  $g_1$  и реактивной  $b_1$  компонент неизвестной проводимости  $Y_1$  (рис. 5). Можно показать, что в состоянии равновесия напряжение на зажимах выходных вольтметров  $V_g$  и  $V_b$  будут равны:

$$U_{2g} = U \frac{\omega_1}{\omega} \frac{g_1}{g_2}; \quad (3)$$

$$U_{2b} = U \frac{\omega_1}{\omega} \frac{b_1}{b_2},$$

где  $g_2$  и  $b_2$  — образцовые активная и реактивная проводимости.

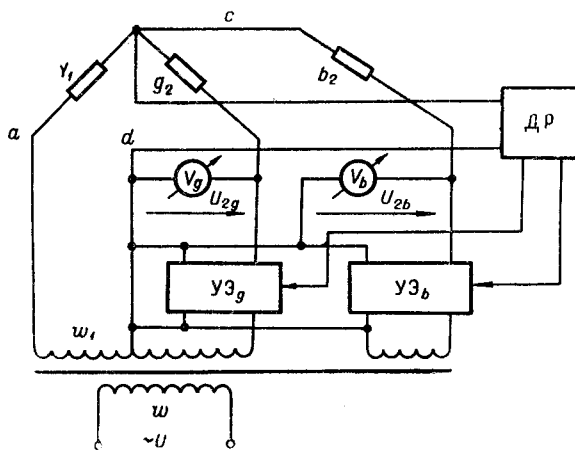


Рис. 5.

Часто практически важным является определение величин емкости и тангенса угла потерь или индуктивности и добротности. В описанных цепях отсчет добротности и тангенса угла потерь может быть получен лишь при помощи дополнительных функциональных узлов, например

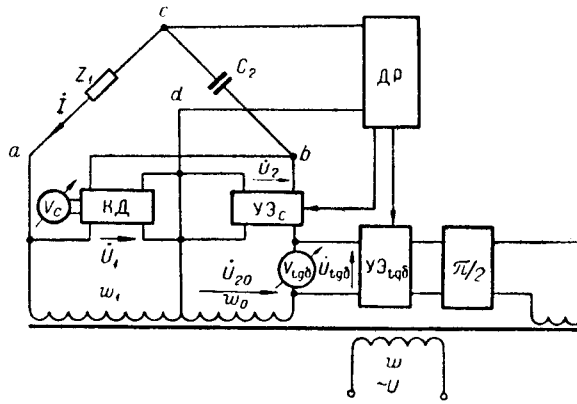


Рис. 6.

делительных устройств, на выходе которых получают отношения напряжений:  $U_{2X}/U_{2R}$  и  $U_{2b}/U_{2g}$  или  $U_{2R}/U_{2X}$  и  $U_{2g}/U_{2b}$ , что, естественно, усложняет прибор.

Можно представить себе цепь гораздо более перспективную в этом отношении (рис. 6). Устройство предназначено для измерения емкости  $C_1$  и тангенса угла потерь  $\text{tg}\delta_1$  сопротивления  $Z_1$ . Емкость  $C_2$  является образцовой. Компенсационное напряжение образуется путем сложения двух квадратурных составляющих, одна из которых постоянна по амплитуде ( $\dot{U}_{20}$ ), а другая ( $U_{2\text{tg}\delta}$ ) регулируется с помощью управляемого элемента  $UЭ_{\text{tg}\delta}$ .

Изменение величины  $U_{2\text{tg}\delta}$  приводит к повороту суммарного вектора  $\dot{U}_{20} + \dot{U}_{2\text{tg}\delta}$  и позволяет установить необходимую фазу компенсационного напряжения  $\dot{U}_2$ . Модуль последнего регулируется с помощью второго управляемого элемента  $UЭ_c$ . На рис. 7 изображена векторная диаграмма рассматриваемого моста, соответствующая состоянию равновесия. Как видно из векторной диаграммы, величинам  $U_{2\text{tg}\delta}$  и  $U_2$  приданы такие значения, что вектор  $\dot{U}_1$  равен вектору падения напряжения на измеряемом сопротивлении  $\dot{U}_{Z1}$ , а вектор компенсационного напряжения  $\dot{U}_2$  совпадает с вектором падения напряжения на образцовом конденсаторе  $\dot{U}_{X2}$ . В результате напряжение между точками  $c$  и  $d$  моста оказывается равным нулю. Из векторной диаграммы следует:

$$U_{2\text{tg}\delta} = U \frac{\omega_0}{\omega} \text{tg}\delta_1; \quad (4)$$

$$U_2 = U \frac{\omega_1}{\omega} \frac{X_2}{Z_1}.$$

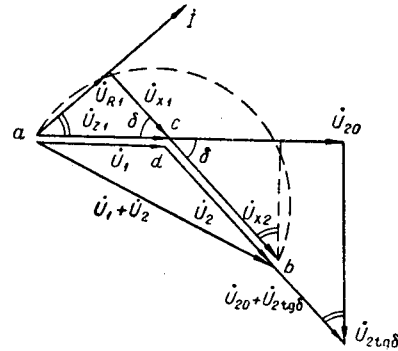


Рис. 7.

Таким образом, отсчет тангенса угла потерь может быть произведен по шкале вольтметра  $V_{\text{tg}\delta}$ , измеряющего напряжение  $U_{2\text{tg}\delta}$ . Для получения отсчета по емкости компенсационное напряжение  $\dot{U}_2$  подается на квадратурный детектор КД и затем измеряется прибором постоянного тока. Если опорным сигналом детектора служит напряжение  $\dot{U}_1$ , то из векторной диаграммы с учетом (4) следует

$$\alpha = kU_2 \cos \delta_1 = kU \frac{w_1}{w} \frac{C_1}{C_2},$$

где  $\alpha$  — показания вольтметра;

$k$  — коэффициент пропорциональности.

При измерении параметров конденсаторов с малыми потерями потребность в квадратурном детекторе отпадает. Действительно, если  $\operatorname{tg} \delta_1 \leq 0,05$ , то полное сопротивление конденсатора  $Z_1$  становится равным его реактивному сопротивлению  $X_1$  с точностью до тысячных долей процента. При этом отсчет емкости может быть получен при помощи непосредственного измерения величины  $U_2$ .

Схема пригодна также для измерения индуктивности и добротности. Характеристики оказываются линейными, если измеряемый и образцовый элементы поменять местами.

Весьма важным при проектировании автоматических мостов переменного тока является знание характера линий уравнивания и их расположения на топографической векторной диаграмме. Это позво-

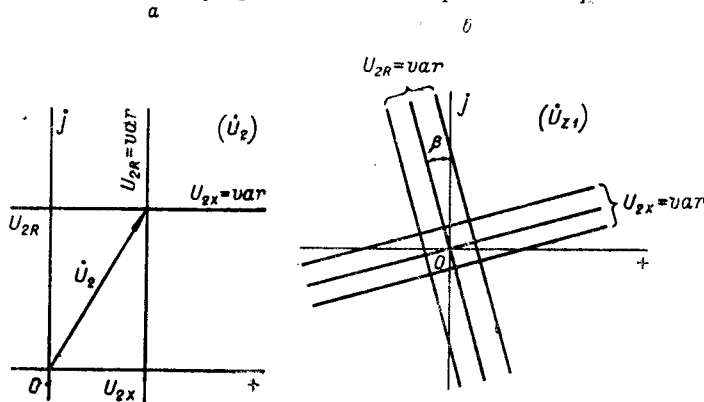


Рис. 8.

ляет выбрать подходящую цепь автоматического регулирования, наиболее просто обеспечивающую минимальную связь между контурами уравнивания или полную развязку последних.

Известно, что линии уравнивания обычных мостов переменного тока являются окружностями [1]. Для рассмотренных выше автокомпенсационных мостовых цепей они представляют собой прямые. Это облегчает процесс уравнивания и улучшает динамические свойства приборов.

Проиллюстрируем сказанное на примере автокомпенсационного моста для измерения активного и реактивного сопротивлений (см. рис. 3). При изменении составляющих  $U_{2X}$  и  $U_{2R}$  компенсационного напряжения  $U_2$  точка  $d$  топографической векторной диаграммы (см. рис. 4) остается неподвижной. Найдем траектории движения точки  $c$ , определив годограф вектора  $\dot{U}_{Z1}$ , представляющего собой падение напряжения на образцовом сопротивлении  $Z_1$ . Считая входное сопротивление детектора равновесия бесконечным, можно записать

$$\dot{U}_{Z1} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{U}_2 + \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{U}_1. \quad (5)$$

Выражение (5) является целой линейной функцией, определяющей конформное отображение плоскости  $(\dot{U}_2)$  на плоскости  $(\dot{U}_{Z1})$ . Пусть век-

тор  $\dot{U}_1$  совпадает по направлению с осью действительных. Тогда при изменении величин  $U_{2R} (U_{2X} = \text{const})$  и  $U_{2X} (U_{2R} = \text{const})$  конец вектора  $\dot{U}_2$  будет скользить по прямым, параллельным осям координат (рис. 8, а). Известное свойство конформного преобразования с помощью целой линейной функции заключается в том, что прямые, заданные на плоскости  $(\dot{U}_2)$ , отображаются в плоскости  $(\dot{U}_{z1})$  также прямыми линиями. При этом происходит поворот отображения относительно оригинала на некоторый угол  $\beta$ , определяемый аргументом производной комплексной функции (5):

$$\beta = \text{Arg} \frac{d\dot{U}_{z1}}{d\dot{U}_2} = \text{Arg} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (6)$$

Физически  $\beta$  представляет собой сдвиг фаз между падением напряжения на образцовом сопротивлении и суммарным напряжением, приложенным к вершинам  $a$  и  $b$  мостовой цепи. Так, например, если измеряемое сопротивление имеет емкостный характер ( $Z_2 = R_2 - jX_2$ ), а в качестве образцового сопротивления использован конденсатор без потерь ( $Z_1 = -jX_1$ ), то в соответствии с (6) имеем

$$\beta = -\text{arctg} \frac{R_2}{X_1 + X_2}.$$

Тот же результат можно получить, исходя из векторной диаграммы, представленной на рис. 4.

Таким образом, линии уравнивания рассматриваемого моста представляют собой прямоугольную сетку, повернутую относительно координатных осей комплексной плоскости на угол  $\beta$ , являющийся функцией измеряемого сопротивления (см. рис. 8, б). В этих условиях независимость контуров уравнивания может быть обеспечена при любых степенях неравновесия (развязка в «большом»), если система автоматической компенсации моста построена по принципу экстремального регулирования [13]. Когда тангенс угла потерь измеряемого сопротивления невелик, хорошие результаты можно получить при уравнивании с помощью квадратурных детекторов. При этом величина  $\beta$  близка к нулю и связь контуров уравнивания незначительна.

Проведенные исследования показывают, что на основе автокомпенсационных мостовых цепей могут быть созданы весьма совершенные приборы для измерения параметров комплексных сопротивлений, обладающие улучшенной сходимостью, высоким быстродействием и сравнительно небольшой погрешностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерения. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
2. Ф. Б. Гриневич. О построении цифровых автоматических мостов переменного тока.— Измерительная техника, 1963, № 6.
3. К. Б. Карандеев, А. Я. Шрамков, В. А. Красиленко. Самоуравнивающийся мост на нелинейных сопротивлениях для измерения температуры.— Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению. Киев, Изд-во АН УССР, 1959.
4. Л. М. Закас. Автоматический термисторный мост.— Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению. Киев, Изд-во АН УССР, 1959.
5. Е. М. Кутяшева. О применении болометрических преобразователей в электроизмерительной технике.— Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению, Киев, Изд-во АН УССР, 1959.

6. А. М. Мелик-Шахназаров, А. Г. Мельников, Ш. М. Шахмарданов. Электронные автокомпенсаторы и авторегуляторы переменного тока для геофизических устройств.—Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды III конференции, 1961 г.). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
7. Т. М. Алиев, А. М. Мелик-Шахназаров, И. Л. Шайн. Автоматические компенсационные устройства переменного тока. Баку, Азерб. гос. изд-во, 1965.
8. Wayne Kerr, R. Calvert. Английский патент № 912.041, кл. 37, гр. 36, 1962.
9. Wayne Kerr, R. Calvert. Английский патент № 762.395, кл. 37, гр. 36, 1955.
10. Wayne Kerr, R. Calvert. Английский патент № 852.011, кл. 37, гр. 36, 1959.
11. Ф. Б. Гриневиц, Е. Е. Добров, В. И. Никулин. Об одной автокомпенсационной схеме для измерения емкости.— Конференция по автоматическому контролю и методам электрических измерений (тезисы докладов и сообщений). Новосибирск, 1964.
12. R. Polaert. Sur un nouveau pont de mesure d'admittance à asservissement électronique.— Comptes Rendus., 1961, Vd 253, № 3.
13. Ф. Б. Гриневиц. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.

*Поступила в редакцию  
14 мая 1965 г.,  
после переработки —  
28 июня 1965 г.*