

Ю. Я. ШАГАЛОВ, В. П. ШУЛЬЦ

(Новосибирск)

### ОБ ОДНОМ ПРИНЦИПЕ ПОСТРОЕНИЯ АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫХ МОСТОВЫХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для измерения комплексных сопротивлений широко применяются автокомпенсационные мостовые цепи, осуществляющие преобразование составляющих измеряемых сопротивлений в эквивалентное им напряжение [1, 2]. Отсутствие в таких мостовых цепях электромеханических уравновешивающих элементов позволяет получать высокое быстродействие устройств при сравнительно малой погрешности преобразования.

На практике часто требуется измерять не только составляющие комплексных сопротивлений, но и их относительные параметры, например тангенс угла потерь конденсаторов, добротность катушек индуктивности. Один из путей решения этой задачи состоит в том, что получаемые на выходе автокомпенсационной мостовой цепи напряжения, пропорциональные составляющим измеряемого сопротивления, подаются на дополнительное делительное устройство, вычисляющее соответствующий относительный параметр [3]. Другое решение данной задачи состоит в формировании задающих напряжений или компенсационных токов мостовой цепи при помощи дополнительных фазосдвигающих цепей и управляемых делителей напряжений [4, 5]. Ниже описывается принцип построения автокомпенсационных мостовых цепей для измерения составляющих комплексных сопротивлений и их относительных параметров [6], позволяющий создавать сравнительно простые измерительные устройства, и приводятся некоторые варианты выполнения мостовых цепей.

Автокомпенсационная мостовая цепь содержит в общем случае четыре плечевых комплексных сопротивлений  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$ ; источник напряжения  $U$ ; электронноуправляемый делитель напряжения УД;

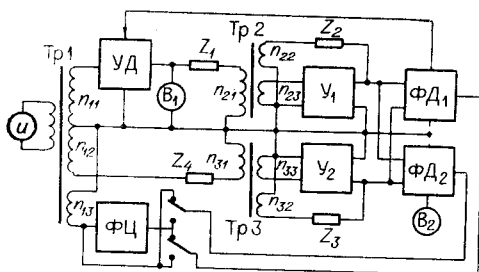


Рис. 1.

трансформатор напряжения  $Tr1$ ; трансформаторы сравнения токов  $Tr2, Tr3$ ; усилители переменного тока  $У1, У2$ ; фазочувствительные детекторы  $ФД1, ФД2$ ; вольтметры  $В1, В2$  и фазосдвигающую цепь  $ФЦ$  (рис. 1).

Задающие напряжения, прикла-

дываемые к сопротивлениям  $Z_1, Z_4$  через обмотки  $n_{21}, n_{31}$  трансформаторов сравнения токов, снимаются с обмоток  $n_{11}$  и  $n_{12}$  трансформатора напряжения. Делитель УД позволяет регулировать величину напряжения на сопротивлении  $Z_1$ . Возникающие в обмотках  $n_{21}$  и  $n_{31}$  токи создают в трансформаторах Тр2 и Тр3 магнитные потоки, и на их вторичных обмотках  $n_{23}$  и  $n_{33}$  возникают напряжения. Усиленные усилителями, эти напряжения подаются на сопротивления  $Z_2$  и  $Z_3$  через обмотки  $n_{22}, n_{32}$  трансформаторов сравнения токов. Усилители оказываются охваченными глубокой отрицательной обратной связью. При этом можно считать, что потоки в трансформаторах отсутствуют и имеют место равенства:

$$I_1 = k \frac{n_{11} \dot{U}_B}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ } 1}}{Z_2}; \quad I_3 = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ } 2}}{Z_3}; \quad I_4 = \frac{n_{12} \dot{U}_B}{Z_4}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент передачи управляемого делителя УД;  $\dot{U}_B$  — напряжение на один виток обмотки трансформатора Тр1;  $\dot{U}_{\text{ВЫХ } 1}, \dot{U}_{\text{ВЫХ } 2}$  — напряжения на выходах усилителей  $Y_1, Y_2$ . Между токами  $I_1, I_2$  и  $I_3, I_4$  имеют место соотношения:

$$I_1 n_{21} = I_2 n_{22}; \quad I_3 n_{32} = I_4 n_{31}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) получаем:

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ } 1} = k \frac{Z_2}{Z_1} \frac{n_{11} n_{21}}{n_{22}} \dot{U}_B = k (A + j B); \quad (3)$$

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ } 2} = \frac{Z_3}{Z_4} \frac{n_{12} n_{31}}{n_{32}} \dot{U}_B = C + j D. \quad (4)$$

Измерение относительных параметров комплексных сопротивлений возможно при использовании следующего принципа. Измеряемое сопротивление включается в автокомпенсационную мостовую цепь таким образом, чтобы в выражении (3) величина  $A$  зависела только от одной из составляющих этого сопротивления, а величина  $B$  — от другой. Как известно, это достигается тем, что измеряемое сопротивление, представляемое последовательной эквивалентной схемой, включается во второе плечо мостовой цепи, а представляемое параллельной схемой — в первое плечо. Если путем изменения коэффициента передачи  $k$  делителя выполнить равенство активных составляющих напряжений  $\dot{U}_{\text{ВЫХ } 1}$  и  $\dot{U}_{\text{ВЫХ } 2}$ , то реактивная составляющая напряжения  $\dot{U}_{\text{ВЫХ } 1}$  станет равной

$$\text{Im} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 1} \} = C \frac{B}{A}, \quad (5)$$

т. е. она пропорциональна относительному параметру измеряемого комплексного сопротивления. При равенстве реактивных составляющих напряжений  $\dot{U}_{\text{ВЫХ } 1}$  и  $\dot{U}_{\text{ВЫХ } 2}$  активная составляющая напряжения  $\dot{U}_{\text{ВЫХ } 1}$  равна

$$\text{Re} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 1} \} = D \frac{A}{B}. \quad (6)$$

В этих случаях по выходному напряжению управляемого делителя  $\dot{U}_B$ , возможно определить одну из составляющих измеряемого сопротивления (проводимости), поскольку при выполнении (5)

$$\dot{U}_B = k n_{11} \dot{U}_B = n_{11} \frac{C}{A} \dot{U}_B, \quad (7)$$

а при выполнении (6)

$$\dot{U}_{B_1} = k n_{11} U_B = n_{11} \frac{D}{B} \dot{U}_B. \quad (8)$$

В соответствии с изложенным принципом система автоматического уравнивания, включающая управляемый делитель и фазочувствительный детектор ФД<sub>1</sub>, приводит мост путем изменения коэффициента передачи в такое состояние, когда синфазные или квадратурные составляющие выходных напряжений усилителей относительно напряжения питания равны, т. е. имеют место следующие равенства:

$$\operatorname{Re} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 1} \} = \operatorname{Re} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 2} \} \quad (9)$$

или

$$\operatorname{Im} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 1} \} = \operatorname{Im} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 2} \}.$$

Из (3), (4) и (9) имеем:

$$\operatorname{Re} \left\{ k \frac{Z_2}{Z_1} \frac{n_{11} n_{21}}{n_{22}} \dot{U}_B \right\} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{Z_3}{Z_4} \frac{n_{12} n_{31}}{n_{32}} \dot{U}_B \right\}; \quad (10)$$

$$\operatorname{Im} \left\{ k \frac{Z_2}{Z_1} \frac{n_{11} n_{21}}{n_{22}} \dot{U}_B \right\} = \operatorname{Im} \left\{ \frac{Z_3}{Z_4} \frac{n_{12} n_{31}}{n_{32}} \dot{U}_B \right\}. \quad (11)$$

Выбирая образцовые сопротивления, удовлетворяющие выражениям (10), (11), можно получить отдельные варианты автокомпенсационных мостовых цепей. Некоторые из них приведены в табл. 1.

Отсчет составляющих измеряемого сопротивления (или составляющих проводимости) производится по выходному напряжению управляемого делителя, а отсчет его относительных параметров — по выходному напряжению  $U_{B_2}$  фазочувствительного детектора ФД<sub>2</sub>. При изменении опорных напряжений фазочувствительных детекторов на угол 90° изменяются приводимые к равенству составляющие выходных напряжений и создается возможность измерять другие параметры комплексного сопротивления. Это позволяет производить измерение более чем двух параметров или требуемых двух, переключая только опорные напряжения фазочувствительных детекторов. При подаче на вход детектора ФД<sub>2</sub> выходного напряжения усилителя  $U_1$  отсчет пропорционален относительному параметру измеряемого сопротивления, а при подаче разности выходных напряжений обоих усилителей отсчет пропорционален разности относительного параметра и некоторой постоянной величины, определяемой значениями образцовых сопротивлений  $Z_3$  и  $Z_4$ .

В качестве примера на рис. 2 представлена схема моста для измерения индуктивности и тангенса угла потерь

катушек индуктивности, представляемых по параллельной эквивалентной схеме замещения. Процесс уравнивания моста заключается в приведении к равенству реактивных составляющих выходных напряжений усилителей с помощью управляемого делителя и фазочувствительного детектора ФД<sub>1</sub>. Опорное напряжение детектора ФД<sub>1</sub> снимается с выхода усилителя  $U_2$ , выходное напряжение которого сдвинуто относительно напряжения питания моста на 90°. На опорный вход детектора

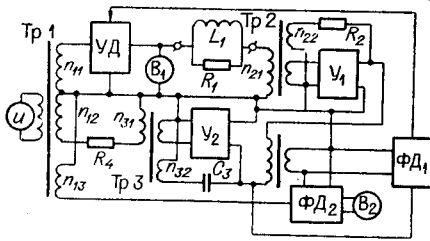


Рис. 2.

Т а б л и ц а 1

№ п.п.	Характер плечевых сопротивлений	Приводимые к равновесию составляющие напряжений	Измеряемые параметры	Уравнения равновесия	Примечание
1	$Z_1 = R_1; Z_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}; Z_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}; Z_4 = R_4.$	Im	$C_2, \operatorname{tg} \delta_2$	$C_2 = C_3 \frac{R_4}{R_1} \frac{n_{21} n_{32}}{n_{12} n_{22} n_{31}} \frac{U_{B_1}}{U_B}; \operatorname{tg} \delta_2 = \omega C_3 R_4 \frac{n_{32}}{n_{12} n_{31}} \frac{U_{B_2}}{U_B} + \operatorname{tg} \delta_3$	—
2	То же, что и в п. 1	Re	$\frac{1}{R_2}, \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_2}$	$\frac{1}{R_2} = \frac{R_4}{R_1 R_3} \frac{n_{21} n_{32}}{n_{12} n_{22} n_{31}} \frac{U_{B_1}}{U_B}; \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_2} = \frac{R_4}{R_3} \frac{n_{32}}{n_{22} n_{31}} \frac{U_{B_2}}{U_B} + \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_3}$	—
3	$Z_1 = R_1; Z_2 = R_2 + j\omega L_2; Z_3 = R_3 \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_4} + j\omega C_4.$	Im	$\frac{1}{L_2}, \frac{1}{Q_2}$	$L_2 = R_1 R_3 C_4 \frac{n_{12} n_{22} n_{31}}{n_{31} n_{32}} \frac{U_B}{U_{B_1}}; \frac{1}{Q_2} = \frac{n_{32}}{n_{12} n_{31}} \frac{U_{B_2}}{U_B} \frac{1}{\omega R_3 C_4} + \operatorname{tg} \delta_4$	По $L_2$ и $Q_2$ обратная шкала
4	То же, что и в п. 3	Re	$\frac{1}{R_2}, Q_2$	$\frac{1}{R_2} = \frac{R_4}{R_1 R_3} \frac{n_{21} n_{32}}{n_{12} n_{22} n_{31}} \frac{U_{B_1}}{U_B}; Q_2 = \frac{R_4}{R_3} \frac{n_{32}}{n_{22} n_{31}} \frac{U_{B_2}}{U_B} + \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_4}$	—
5	$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1; Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}; Z_3 = R_3 \frac{1}{j\omega C_3}; Z_4 = R_4.$	Re	$\frac{1}{C_1}, \operatorname{tg} \delta_1$	$C_1 = C_2 \frac{R_3}{R_4} \frac{n_{12} n_{22} n_{31}}{n_{21} n_{32}} \frac{U_B}{U_{B_1}}; \operatorname{tg} \delta_1 = \frac{R_4}{R_3} \frac{n_{32}}{n_{12} n_{31}} \frac{U_{B_2}}{U_B} + \operatorname{tg} \delta_3$	По $C_1$ обратная шкала
6	То же, что и в п. 5	Im	$R_1$	$R_1 = R_4 \frac{C_3}{C_2} \frac{n_{21} n_{32}}{n_{12} n_{22} n_{31}} \frac{U_{B_1}}{U_B}$	—
7	$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{j\omega L_1}; Z_2 = R_2; Z_3 = \frac{1}{j\omega C_3}; Z_4 = R_4.$	Im	$L_1, \frac{1}{Q_1}$	$L_1 = C_3 R_2 R_4 \frac{n_{21} n_{32}}{n_{12} n_{22} n_{31}} \frac{U_{B_1}}{U_B}; Q = \frac{n_{12} n_{31}}{n_{32}} \frac{1}{\omega C_3 R_4} \frac{U_B}{U_{B_2}}$	По $Q_1$ обратная шкала

ФД<sub>2</sub> подается напряжение с обмотки  $n_{13}$  трансформатора Тр1. Выходные напряжения усилителей равны:

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ } 1} = k \frac{n_{11} n_{21}}{n_{22}} \frac{R_2 (R_1 + j \omega L_1)}{R_1 j \omega L_1} \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{\text{ВЫХ } 2} = \frac{n_{12} n_{31}}{n_{32}} \frac{1}{R_4 j \omega C_3} \dot{U}_B.$$

Система автоматического уравнивания приводит мост в состояние, при котором

$$\text{Im} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 1} \} = \text{Im} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 2} \},$$

или

$$k \frac{n_{11} n_{21}}{n_{22}} \frac{R_2}{j \omega L_1} \dot{U}_B = \frac{n_{12} n_{31}}{n_{32}} \frac{1}{R_4 j \omega C_3} \dot{U}_B. \quad (12)$$

Учитывая, что  $k n_{11} U_B = \dot{U}_B$ , получим выражения для напряжения на выходе управляемого делителя

$$\dot{U}_{B_1} = \frac{n_{12} n_{31} n_{22}}{n_{21} n_{32}} \frac{1}{R_2 R_4 C_3} \dot{U}_B L_1.$$

Выражение для напряжения на выходе фазочувствительного детектора ФД<sub>2</sub> получим при условии, что коэффициент передачи детектора равен единице:

$$U_{B_2} = \text{Re} \{ \dot{U}_{\text{ВЫХ } 1} \} = k \frac{n_{11} n_{21}}{n_{22}} \frac{R_2}{R_1} U_B.$$

Учитывая равенство (12), имеем

$$U_{B_2} = \frac{n_{12} n_{31}}{n_{32}} \frac{1}{R_4 \omega C_3} U_B \text{tg } \delta_1.$$

При измерении малых сопротивлений для исключения погрешности, возникающей за счет переходных сопротивлений контактов, обычно используется четырехзажимная схема подключения. Такое подключение возможно и в автокомпенсационных мостовых цепях, построенных по рассматриваемому принципу. В качестве примера на рис. 3 представлена схема мостовой цепи для измерения емкости и тангенса угла потерь конденсаторов.

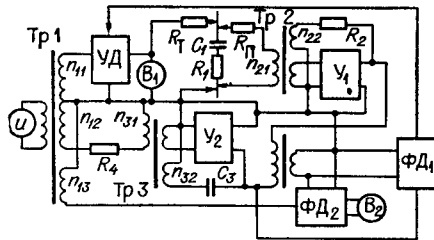


Рис. 3.

В этой цепи регулировкой коэффициента передачи  $k$  достигается равенство реактивных составляющих выходных напряжений усилителей  $Y_1, Y_2$ . Параметры конденсаторов определяются выражениями:

$$C_1 = \frac{n_{21} n_{32}}{n_{12} n_{22} n_{31}} \frac{R_2 R_4}{R_T R_{\Pi}} \frac{C_3}{U_B} U_{B_1}; \quad \text{tg } \delta_1 = \frac{n_{32}}{n_{12} n_{31}} \omega C_3 R_4 \frac{U_{B_2}}{U_B}.$$

Эти выражения получены при условии, что  $|Z_1| \ll R_{\Pi}$ ,  $|Z_1| \ll R_T$ . Некоторые варианты выполнения автокомпенсационных мостовых цепей для измерения малых сопротивлений при тех же ограничениях на  $|Z_1|$  приведены в табл. 2.

Как следует из (7), (8) и табл. 1, 2, в приведенных мостовых цепях возможен частотонезависимый отсчет индуктивности при использовании

Таблица 2

№ п.п.	Вид и характер плечевых сопротивлений	Приводимые к равенству соответствующие напряжения	Измеряемые параметры	Уравнения равновесия	Примечание
1		Im	$L_2, \text{tg } \delta_2$	$L_2 = \frac{n_{21} n_{32}}{n_{12} n_{31} n_{22}} \frac{R_3 R_T R_{\Pi} C_3}{R_1} \frac{U_{B_1}}{U_B}; \text{tg } \delta_2 = \frac{n_{32}}{n_{12} n_{31}} R_4 \omega C_3 \frac{U_{B_2}}{U_B}$	—
2		$\text{Re} \{ \dot{U}_{\text{вых}} \} = U_B n_{12}$	$R_2, Q_2$	$R_2 = \frac{n_{21}}{n_{12} n_{22}} \frac{R_T R_{\Pi}}{R_1} \frac{U_{B_1}}{U_B}; Q_2 = \frac{U_{B_2}}{n_{12} U_B}$	—
3		Im	$C_1, \text{tg } \delta_1$	$C_1 = \frac{n_{21} n_{32}}{n_{12} n_{31} n_{22}} \frac{R_2 R_4 C_3}{R_T R_{\Pi}} \frac{U_{B_1}}{U_B}; \text{tg } \delta_1 = \frac{n_{32}}{n_{12} n_{31}} R_4 \omega C_3 \frac{U_{B_2}}{U_B}$	—
4		Im	$C_2, \text{tg } \delta_2$	$C_2 = \frac{n_{12} n_{31} n_{22}}{n_{21} n_{32}} \frac{C_4 R_4 R_1}{R_T R_{\Pi}} \frac{U_B}{U_{B_1}}; \text{tg } \delta_2 = \frac{n_{32}}{n_{12} n_{31}} \frac{1}{\omega C_4 R_3} \frac{U_{B_2}}{U_B}$	По $C_2$ обратная шкала
5		Im	$L_1, \text{tg } \delta_1$	$L_1 = \frac{n_{12} n_{31} n_{22}}{n_{21} n_{32}} \frac{C_4 R_3 R_T R_{\Pi}}{R_2} \frac{U_B}{U_{B_1}}; \text{tg } \delta_1 = \frac{n_{32}}{n_{12} n_{31}} \frac{1}{\omega C_4 R_3} \frac{U_{B_2}}{U_B}$	По $L_1$ обратная шкала

емкостных образцовых сопротивлений, что не обеспечивается в автокомпенсационных цепях [1—4].

В ряде случаев нижняя половина мостовой цепи, включающая в себя элементы  $Z_3$ ,  $Z_4$ ,  $Tr3$  и  $U_2$ , может быть исключена (см. рис. 1). При этом для получения напряжения, равного выходному напряжению усилителя  $U_2$ , может быть использована дополнительная фазосдвигающая цепь либо делитель напряжения.

В заключение следует отметить, что автокомпенсационные мосты, построенные по рассмотренному принципу, не содержат взаимосвязанных контуров уравнивания, что важно для улучшения статических и динамических свойств измерительных устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Calvert, J. Mildwater. Self-Balancing Transformer Ratio Arm Bridges.— Electronic Engineering, 1963, v. 35, № 430 («Экспресс-информация», КИТ, 1964, № 12).
2. Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, К. Б. Карандеев. Автокомпенсационные мостовые цепи — Автометрия, 1965, № 5.
3. Н. Я. Самойлов. Цифровой прибор для измерения составляющих комплексного сопротивления. Авторское свидетельство № 209579.— ИПОТЗ, 1968, № 5.
4. Ф. Б. Гриневич. Автокомпенсационный мост для измерения  $C$  и  $tg \delta$  или  $L$  и  $Q$ . Авторское свидетельство № 188576.— ИПОТЗ, 1966, № 22.
5. М. А. Ахмаметьев, Е. Е. Добров, Ю. Я. Шагалов. Автокомпенсационный измерительный преобразователь  $C$ ,  $tg \delta$ ,  $R$  — напряжение.— Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1968.
6. В. П. Шульц, Ю. Я. Шагалов. Автоматический мост переменного тока. Авторское свидетельство № 220351.— ИПОТЗ, 1968, № 20.

Поступила в редакцию  
3 июля 1969 г.