АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 6 1970

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

УДК 621.317.3

С. М. КАЗАКОВ, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ
(Новосибирск)

РАЗНОВРЕМЕННОЕ ЗАВИСИМОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ОДНОЙ ИЗ КОМПОНЕНТ КОМПЛЕКСНОЙ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ОТНОШЕНИЯ

Как известно [1—3], с помощью квазиуравновешенных цепей, реализующих раздельное измерение путем последовательного приведения цепи в два квазиравновесных состояния, можно строить простые и в то же время достаточно точные устройства для измерения модуля и фазы комплексных величин. Не менее важной является также задача измерения одной из компонент (синфазной или квадратурной составляющих) комплексной величины (сопротивления, проводимости, напряжения и тока) и их отношения (например, тангенса угла потерь). Ниже рассмотрен вопрос о разновременном зависимом измерении с помощью квазиуравновешенных электроизмерительных цепей именно таких параметров комплексной величины. Освещена также возможность распространения рассматриваемого принципа на случай прямого измерения отношения параметров нескольких комплексных величин.

Раздельное измерение синфазной и квадратурной компонент комплексных величин $z_и = x_и + j\,y_и$ производится обычно с помощью электроизмерительных цепей уравновешивания (ЭИЦУ), приводимых в специальное измерительное состояние изменением параметра одной из образцовых мер, по которому и отсчитывается измеряемая компонента (см., например, [1]). Если при этом переход с режима измерения одной компоненты на режим измерения другой осуществить путем изменения образцовой меры сравнения, то структура уравнений отсчета не изменится. Запишем оба уравнения в виде

$$x_и = \frac{n_1^x\, m_1^x}{n_2^x\, m_2^x}\, x_0; \tag{1}$$

$$y_и = \frac{n_1^y\, m_1^y}{n_2^y\, m_2^y}\, y_0, \tag{2}$$

где x_0, y_0 — значения параметров образцовых мер сравнения соответственно при измерении синфазной $x_и$ и квадратурной $y_и$ компонент исследуемой величины $z_и$; n_1^x, n_2^x, m_1^x, m_2^x — значения параметров остальных образцовых мер измерительной цепи (их можно назвать параметрами отношения) при измерении $x_и$; n_1^y, n_2^y, m_1^y, m_2^y — значения тех же параметров при измерении $y_и$. Приводя ЭИЦУ дважды в одно и то же измерительное состояние при различных образцовых мерах сравнения ($x_о$ и $y_о$), можно получить прямой отсчет обеих компонент ($x_и$ и $y_и$) исследуемой величины $z_и$.

Покажем теперь, что с помощью рассматриваемых ЭИЦУ, дважды приводимых в одно и то же измерительное состояние и характеризуемых уравнениями (1) и (2), можно получить и прямой отсчет отношения компонент ($\operatorname{tg} \varphi_и = y_и/x_и$ или $\operatorname{tg} \delta_и = x_и/y_и$) исследуемой комплексной величины. Для этого запишем выражения для $\operatorname{tg} \varphi_и$ и $\operatorname{tg} \delta_и$ как результат деления компонент, полученных путем двух уравновешиваний (для общности примем, что при первом и втором уравновешиваниях изменяются все параметры отношения):

$$\operatorname{tg} \varphi_и = \frac{n_1^y\, m_1^y\, n_2^x\, m_2^x}{n_1^x\, m_1^x\, n_2^y\, m_2^y} \, \frac{y_о}{x_о}\,; \tag{3}$$

$$\operatorname{tg} \delta_и = \frac{n_1^x\, m_1^x\, n_2^y\, m_2^y}{n_1^y\, m_1^y\, n_2^x\, m_2^x} \, \frac{x_о}{y_о}\,. \tag{4}$$

Сопоставляя уравнения (1)—(4), легко заметить, что специальным выбором параметров первого и второго уравновешивания можно обеспечить раздельный отсчет не только двух компонент ($x_и$ и $y_и$), но и одной из компонент ($x_и$ или $y_и$) и их отношения ($\operatorname{tg} \varphi_и$ или $\operatorname{tg} \delta_и$). Действительно, приведем ЭИЦУ вначале изменением какого-либо параметра отношения в измерительное состояние, обеспечивающее раздельное измерение исследуемой компоненты; например, при измерении $x_и$ и $\operatorname{tg} \varphi_и$ уравновесим цепь вначале изменением n_1:

$$x_и = \frac{n_1^x\, m_1^0}{n_2^0\, m_2^0} \, x_о$$

(в приведенном выше, а также в последующих выражениях верхним индексом «0» отмечены начальные значения переменных и значения постоянных параметров отношения). Теперь изменим образцовую меру сравнения и приведем цепь вторично в то же самое измерительное состояние другим переменным параметром, оставив первый параметр неизменным; в нашем примере следует меру x_0 заменить на y_0, а в качестве

№ п. п.	Измеряемые параметры	Возможные переменные параметры	№ п. п.	Измеряемые параметры	Возможные переменные параметры
1	$x_и$ $\operatorname{tg}\delta_и$	$n_1,\ m_1$ $n_2,\ m_2,\ \frac{1}{y_о}$	5	$x_и$ $\operatorname{tg}\varphi_и$	$n_1,\ m_1$ $m_1,\ n_1,\ y_о$
2	$y_и$ $\operatorname{tg}\varphi_и$	$n_1,\ m_1,$ $n_2,\ m_2,\ \frac{1}{x_о}$	6	$y_и$ $\operatorname{tg}\delta_и$	$n_1,\ m_1$ $m_1,\ n_1,\ x_о$
3	$1/x_и$ $\operatorname{tg}\delta_и$	$n_2,\ m_2,$ $m_2,\ n_2,\ \frac{1}{y_о}$	7	$1/x_и$ $\operatorname{tg}\varphi_и$	$n_2,\ m_2$ $n_1,\ m_1,\ y_о$
4	$1/y_и$ $\operatorname{tg}\varphi_и$	$n_2,\ m_2$ $m_2,\ n_2,\ 1/x_о$	8	$1/y_и$ $\operatorname{tg}\delta_и$	$n_2,\ m_2$ $n_1,\ m_1,\ x_о$

второго переменного параметра, обеспечивающего прямую шкалу отсчета по tg $\varphi_и$, выбрать [см. выражение (3)] параметр m_1 или y_0; учитывая, что $n_1^x = n_1^y$, при m_1=var имеем $\operatorname{tg} \varphi_и = m_1^y y_0 / m_1^0 x_0$.

Все возможные случаи измерения одной из компонент исследуемой комплексной величины и их отношения сведены в таблицу. Анализ этих случаев показывает, что при использовании в качестве второго уравновешивающего параметра образцовой меры сравнения необходимо, чтобы ЭИЦУ обеспечивала не менее двух параметров отношения. Это означает, что в простейшем случае предлагаемый способ может быть реализован на обычной четырехплечевой мостовой цепи.

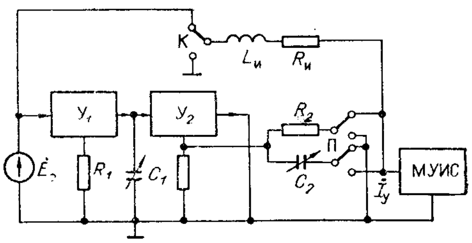

Рис. 1.

Рассмотрим два примера реализации указанного способа, представляющие, по нашему мнению, наибольший практический интерес.

На рис. 1 изображена схема устройства уравновешивания для измерения $L_и$ и $Q_и = \operatorname{tg} \varphi_и$ катушек индуктивности. Здесь МУИС — модульный указатель измерительных состояний [4], а образцовый блок сравнения выполнен на двух усилителях $У_1$ и $У_2$ с глубокой отрицательной обратной связью (ООС) по току, образующих интегратор переменного тока, и образцовых мерах R_1, C_1, R_2 и C_2. При измерении индуктивности (положение переключателя П показано на рисунке), приняв для удобства рассмотрения входное сопротивление МУИС равным нулю, получим следующие выражения для входных токов указателя в разные такты коммутации, выполняемой коммутатором К:

$$\dot{I}'_у = \dot{E}_э \frac{1}{j\,\omega\, C_1 R_1 R_2};$$

$$\dot{I}''_у = \dot{E}_э \frac{Z_и - j\,\omega\, C_1 R_1 R_2}{j\,\omega\, C_1 R_1 R_2 Z_и}.$$

При равенстве модулей этих токов формула для измеряемой индуктивности имеет вид

$$L_и = 0{,}5\, C_1 R_1 R_2. \qquad (5)$$

После приведения ЭИЦУ в тот же измерительный режим при другом положении переключателя П аналогично можно найти

$$R_и = 0{,}5 R_1 \frac{C_1}{C_2}. \qquad (6)$$

В соответствии с формулами (1), (2), (5), (6) и таблицей (см. п. 2) в качестве первого уравновешивающего параметра из двух возможных (C_1 и R_1) выбираем емкость C_1. Тогда вторым уравновешивающим параметром, позволяющим непосредственно отсчитать $Q_и = \omega C_2 R_2$, может быть емкость C_2.

Поскольку в действительности входное сопротивление указателя имеет конечное значение, то коммутатор К включен таким образом, чтобы выходное сопротивление ЭИЦУ относительно полюсов подключения МУИС оставалось постоянным в оба такта коммутации (как показано в [5], величина входного сопротивления указателя при этом на точность указания не влияет).

В качестве второго примера реализации предлагаемого способа на рис. 2 приведена схема устройства уравновешивания для измерения квадратурной компоненты $E_{иу}$ и тангенса угла потерь $\mathrm{tg}\,\delta_и$ э. д. с. $\dot E_и = E_{их} + j E_{иу}$ исследуемого источника напряжения с внутренним сопротивлением $Z_и$. Здесь образцовый блок сравнения выполнен на усилителе $У_1$, охваченном глубокой ООС по напряжению относительно входа и выхода, образцовых мерах C_1, g_1, R_2, R_3 и звездообразном делителе

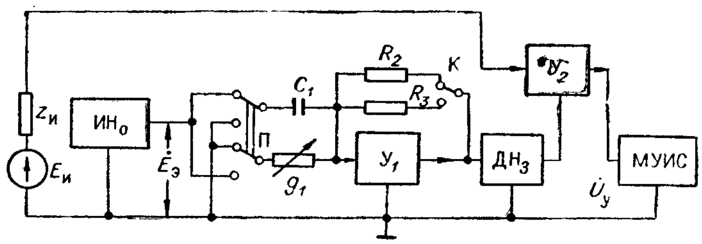

Рис. 2.

напряжения $ДН_3$ с коэффициентом передачи $К_д$ и выходным сопротивлением $R_д$. При измерении компоненты $E_и$ к образцовому источнику напряжения $ИН_0$ с э. д. с. $\dot E_э$ с помощью переключателя П присоединяется вывод конденсатора C_1. Напряжения $U_у$ и $U_у''$ на входе модульного указателя МУИС в разные такты коммутации, осуществляемой коммутатором К, равны:

$$\dot U_у'' = (\dot E_и + j \dot E_э \omega C_1 R_2 K_д)(1 + \delta_2)\frac{Z_у}{R_д};$$

$$\dot U_у'' = (\dot E_и - j \dot E_э \omega C_1 R_3 K_д)(1 + \delta_2)\frac{Z_у}{R_д},$$

где $Z_у$ — входное сопротивление МУИС; δ_2 — статическая погрешность усилителя $У_2$, охваченного через $Z_у$, $R_д$ и $Z_и$ глубокой ООС по току. При достижении измерительного состояния, характеризуемого равенством $|\dot U_у'| = |\dot U_у''|$, измеряемая компонента отсчитывается по формуле

$$E_{иу} = E_э \omega C_1 K_д \frac{R_2 + R_3}{2}.$$

Переключив П и приведя цепь вторично в то же самое измерительное состояние, получим формулу отсчета для синфазной компоненты $E_{их}$:

$$E_{их} = E_э g_1 K_д \frac{R_2 + R_3}{2}.$$

Очевидно, что для обеспечения раздельного отсчета $E_{иу}$ и $\mathrm{tg}\,\delta_и$ в соответствии с таблицей (см. п. 6) в качестве первого уравновешивающего параметра целесообразно выбрать $K_д$, а в качестве второго, служащего для прямого отсчета $\mathrm{tg}\,\delta_и = g_1/\omega C_1$, может выступать только g_1. Дополнительным положительным свойством схемы является независимость точности указания измерительного режима от значений $Z_и$ и δ_2; достигается это благодаря включению коммутатора К таким образом, что глубина обратной связи усилителя $У_2$ остается неизменной в оба такта коммутации.

Условия применения предложенного способа наиболее благоприятны при сравнимых значениях компонент исследуемой комплексной величины, т. е. при значениях $\mathrm{tg}\,\delta_и \approx 0{,}1 \div 10$.

В том случае, когда исследуемая величина является сложной функцией непосредственно измеряемых параметров, может оказаться целесообразным прямое измерение не только отношения компонент комплексной величины, но и их произведения, что также просто достигается с помощью квазиуравновешенных цепей для раздельного измерения компонент комплексной величины.

Действительно, поскольку умножение обратно делению, для измерения произведения составляющих достаточно при втором уравновешивании исследуемый объект и образцовую меру сравнения поменять местами. При этом уравнение второго квазиравновесия будет обратным по отношению к тому уравнению, которое имело место при измерении отношения составляющих комплексной величины. Например, при измерении синфазной компоненты $x_и$ и произведения $x_и\, y_и$ уравнение второго квазиравновесия в отличие от (2) имеет вид

$$y_и = \frac{n_2^y\, m_2^y}{n_1^y\, m_1^y}\, y_о,$$

и произведение составляющих можно найти из выражения

$$x_и\, y_и = \frac{n_1^x\, m_1^x\, n_2^y\, m_2^y}{n_1^y\, m_1^y\, n_2^x\, m_2^x}\, x_о\, y_о. \qquad (7)$$

Если теперь в качестве первого переменного параметра выбрать n_1, а в качестве второго — n_2, то из (7) получим

$$x_и\, y_и = \frac{n_2^y}{n_2^0}\, x_о\, y_о.$$

Так как компоненты $x_и$ и $y_и$, входящие в произведение или отношение, измеряются в разные моменты времени, то совершенно очевидно, что рассматриваемым в статье способом можно непосредственно измерять и отношение или произведение одноименных или разноименных компонент двух комплексных величин или одной и той же величины, но при различных условиях измерения (режим по току или напряжению, температура, частота, облучение).

Определенный интерес может представить и прямое измерение отношений параметров нескольких комплексных величин. Эта задача может быть легко решена с помощью цепей, приводимых в ряд зависимых квазиравновесий, если перед каждым последующим уравновешиванием тот переменный параметр, которым производилось предыдущее уравновешивание, оставлять неизменным, а все остальные меры отношения устанавливать на начальные значения их параметров.

Предположим, например, что необходимо измерить функцию

$$F_и = \frac{x_a}{x_b}\, x_c\, x_d\, x_e,$$

где x_a, x_b, x_c, x_d, x_e — синфазные компоненты комплексных величин $Z - Z_e$. Предположим также, что исходное уравнение квазиравновесия измерительной цепи имеет вид

$$x_и^i = \frac{n_1^i\, m_1^i\, l_1^i}{n_2^i\, m_2^i\, l_2^i}\, x_о^i; \quad i = a,\ b,\ c,\ d,\ e.$$

Приводя последовательно измерительную цепь в квазиравновесия при поочередно подключаемых объектах с комплексными величинами

Z_a, Z_b, Z_c, Z_d, Z_e и соответственно образцовых мерах сравнения x_o^a, x_o^b, x_o^c, x_o^d, x_o^e, получим:

после первого уравновешивания цепи (подключен объект Z_a; изменяемый параметр n_1)

$$F_1 = x_и^a = \frac{n_1^a\, m_1^0\, l_1^0}{n_2^0\, m_2^0\, l_2^0}\, x_o^a;$$

после второго уравновешивания (подключен объект Z_b; изменяемый параметр n_2)

$$F_2 = \frac{x_и^a}{x_и^b} = \frac{n_2^b}{n_2^0}\,\frac{x_o^a}{x_o^b};$$

после третьего уравновешивания (подключен объект Z_c; изменяемый параметр m_1)

$$F_3 = \frac{x_и^a}{x_и^b}\, x_c^c = \frac{m_1^c\, n_1^0\, l_1^0}{m_2^0\, n_2^0\, l_2^0}\,\frac{x_o^a}{x_o^b}\, x_o^c;$$

после четвертого уравновешивания (подключен объект Z_d; изменяемый параметр m_2; объект исследования и образцовая мера сравнения переставлены местами)

$$F_4 = \frac{x_и^a}{x_и^b}\, x_и^c\, x_и^d = \frac{m_2^d}{m_2^0}\,\frac{x_o^a}{x_o^b}\, x_o^c\, x_o^d;$$

после пятого уравновешивания (подключен объект Z_e; изменяемый параметр l_1; включение объекта Z_e и образцовой меры сравнения x_o^e такое же, как при первых трех уравновешиваниях)

$$F_и = \frac{x_и^a}{x_и^b}\, x_и^c\, x_и^d\, x_и^e = \frac{l_1^e\, n_1^0\, m_1^0}{l_2^0\, n_2^0\, m_2^0}\,\frac{x_o^a}{x_o^b}\, x_o^c\, x_o^d\, x_o^e.$$

Следовательно, параметры n_1^a, n_2^b, m_1^c, m_2^d и l_1^e могут быть проградуированы непосредственно в значениях искомых величин $F_1 - F_4$ и $F_и$.

Таким образом, приводя измерительную цепь последовательно в два или больше зависимых квазиравновесий, можно обеспечить прямое измерение компонент и различных их отношений как для одной, так и для нескольких комплексных величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
2. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамбергер, Л. Я. Мизюк. Полууравновешенный мост для измерения комплексных сопротивлений на звуковых частотах.— ПНТПО, № 11-57-84/11. М., ВИНИТИ, 1957.
3. Н. А. Завиленская, Л. Я. Мизюк, Г. А. Штамбергер. Квазиуравновешенный мост для измерения комплексных сопротивлений на повышенных частотах.— Труды конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
4. С. М. Казаков, К. М. Соболевский, В. Н. Сумительнов. Указатели измерительных состояний.— Автометрия, 1968, № 6.
5. С. М. Казаков, К. Б. Карандеев, К. М. Соболевский. К теории квазиуравновешенных электроизмерительных цепей.— Автометрия, 1967, № 3.

Поступила в редакцию
28 апреля 1970 г.