

АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ, КОНТРОЛЬНЫЕ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.733

Е. Е. ДОБРОВ, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ

(Новосибирск)

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ УРАВНОВЕШЕННЫХ АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫХ МОСТОВ

Одной из перспективных разновидностей электрических цепей, предназначенных для измерения параметров комплексных сопротивлений, являются компенсационно-мостовые цепи с автоматическим уравновешиванием [1] (автокомпенсационные мосты), позволяющие обеспечить высокое быстродействие. Поскольку повышение быстродействия электроизмерительных приборов, как правило, связано с увеличением погрешности измерения, то исследование точности автокомпенсационных мостов представляет существенный практический интерес. Ниже рассмотрены основные составляющие погрешности, присущие сравнительно большой группе уравновешенных компенсационно-мостовых цепей, и произведена ориентировочная оценка точности последних.

К основным составляющим погрешности уравновешенных автокомпенсационных мостов переменного тока следует отнести: 1) погрешность, обусловленную нестабильностью пассивных и активных образцовых элементов (пассивных мер и амплитудно-стабильных источников напряжения и тока); 2) погрешность отсчетных устройств; 3) погрешность от неполного уравновешивания измерительной цепи; 4) погрешность, возникающую вследствие неидеальности управляемых уравновешивающих элементов; 5) погрешность, обусловленную искажением формы кривой компенсирующих сигналов.

Оценка первых трех из указанных выше составляющих погрешности не представляет практических затруднений. В частности, поскольку нестабильность пассивных образцовых элементов весьма мала, то первая из указанных выше составляющих погрешности определяется в основном нестабильностью активных образцовых элементов и при использовании современных методов стабилизации синусоидальных сигналов может быть сведена к 0,1% [2, 3]. Путем применения в качестве отсчетных устройств высокоточных приборов постоянного тока в сочетании с выпрямительными цепями, обладающими высокой линейностью и стабильностью, вторая составляющая погрешности может быть также сведена к 0,1% [4]. Третья составляющая погрешности подробно рассмотрена в [5], где показано, что относительная погрешность от неполного уравновешивания для автокомпенсационных мостов обычно не превышает 0,1% во всем диапазоне измерения.

Две последние из перечисленных выше составляющих погрешности

присущи только автокомпенсационным мостам и до сих пор не исследовались. Поэтому на их рассмотрении остановимся более подробно.

Для уравнивания компенсационно-мостовой цепи необходимо сформировать определенного вида компенсирующие сигналы. По способу формирования этих сигналов автокомпенсационные мосты переменного тока делятся на устройства с прямым уравниванием (самоуравниваемые) и устройства с преобразованием (например, детектированием) сигнала неравновесия [1]. Последние обязательно содержат управляемые уравнивающие элементы, выходные сигналы которых имеют постоянные фазы, равные фазам сигналов задающих опорных источников, и переменные амплитуды, изменяющиеся в процессе уравнивания в соответствии с управляющими воздействиями, вырабатываемыми в детекторе равновесия. Из-за неидеальности управляемых уравнивающих элементов фазы выходных и опорных величин несколько отличаются друг от друга, что эквивалентно наличию паразитных выходных сигналов, квадратурных к основным. Это приводит к возникновению погрешностей, зависящих от измеряемых величин. Для оценки этих погрешностей в принципе можно было бы использовать известный обобщенный метод расчета погрешностей, вызываемых влиянием остаточных (квадратурных к основным) параметров элементов мостовых цепей [6]. Однако практически целесообразнее положить в основу вывода необходимых соотношений положение о связи между углом сходимости и условиями раздельного отсчета в мостовых цепях переменного тока [7]. Последнее позволяет: во-первых, получить результат, не связанный с геометрическим образом компенсационно-мостовой цепи; во-вторых, определить рассматриваемую погрешность не только для цепей, предназначенных для измерения квадратурных составляющих комплексного сопротивления (проводимости), но и для цепей, предназначенных для измерения емкости (индуктивности) и тангенса угла потерь.

Пусть компенсационно-мостовая цепь предназначена для раздельного измерения квадратурных составляющих p_1 и p_2 некоторой комплексной величины, отсчитываемых соответственно по компенсирующим величинам A_1 и A_2 . Наличие паразитного сдвига фаз в управляемых уравнивающих элементах эквивалентно появлению составляющих $A_{1к}$ и $A_{2к}$, квадратурных величинам A_1 и A_2 соответственно. Эти составляющие вызовут некоторые сигналы неравновесия ΔB_1 и ΔB_2 :

$$\Delta B_1 = S_{A_1} A_{1к}; \quad \Delta B_2 = S_{A_2} A_{2к}, \quad (1)$$

где S_{A_1} и S_{A_2} — абсолютные чувствительности компенсационно-мостовой цепи по регулируемым величинам A_1 и A_2 . Согласно [7], при раздельном отсчете квадратурных составляющих угол сходимости составляет $\gamma = \pi/2$, поэтому вектор $\Delta \vec{B}_1$ будет коллинеарен линии уравнивания $A_1 = \text{const}$, а вектор $\Delta \vec{B}_2$ — линии $A_2 = \text{const}$. Очевидно, что для приведения измерительной цепи в новое состояние равновесия необходимо изменить компенсирующие величины A_1 и A_2 на вполне определенные значения:

$$\Delta A_1 = \frac{\Delta B_2}{S_{A_1}}; \quad \Delta A_2 = \frac{\Delta B_1}{S_{A_2}}.$$

После подстановки в последние равенства выражений (1) получим для относительных погрешностей $\delta_1 = \frac{\Delta A_1}{A_1}$ и $\delta_2 = \frac{\Delta A_2}{A_2}$:

$$\delta_1 = \frac{S_{A_2} A_2}{S_{A_1} A_1} \Delta_2; \quad \delta_2 = \frac{S_{A_1} A_1}{S_{A_2} A_2} \Delta_1, \quad (2)$$

где $\Delta_1 = A_{1к} / A_1$ и $\Delta_2 = A_{2к} / A_2$ — паразитные углы сдвига фаз соответствующих управляемых элементов ($\Delta_1 \ll 1$; $\Delta_2 \ll 1$).

Известно, что при пропорциональной связи между отсчетным A и измеряемым p параметрами относительно чувствительности измерительной цепи по первому и второму равны друг другу [8], т. е.

$$S_{A_1} A_1 = S_{p_1} p_1; \quad S_{A_2} A_2 = S_{p_2} p_2,$$

где S_{p_1} и S_{p_2} — абсолютные чувствительности цепи по параметрам p_1 и p_2 . Кроме того, в соответствии с [9] абсолютные чувствительности цепи по квадратурным составляющим равны ($S_{p_1} = S_{p_2}$). С учетом сказанного на основе (2) окончательно получаем:

$$\delta_1 = \frac{p_2}{p_1} \Delta_2; \quad \delta_2 = \frac{p_1}{p_2} \Delta_1. \quad (3)$$

В частности, для автокомпенсационного моста, предназначенного для измерения активного R и реактивного X сопротивлений, имеем, согласно (3), полагая $p_1 = X$, $p_2 = R$, $\delta_1 = \delta_X$, $\delta_2 = \delta_R$, $\Delta_1 = \Delta_X$, $\Delta_2 = \Delta_R$:

$$\delta_X = \Delta_R \operatorname{tg} \delta; \quad \delta_R = \Delta_X / \operatorname{tg} \delta,$$

где δ — угол потерь измеряемого комплексного сопротивления. Из последних выражений видно, что, как и следовало ожидать, при измерении квадратурных составляющих исследуемого комплексного сопротивления (проводимости) неидеальность управляемого элемента, уравновешивающего измерительную цепь по активной составляющей, приводит к погрешности измерения реактивной составляющей, а неидеальность элемента, уравновешивающего цепь по реактивной составляющей, — к погрешности измерения активной составляющей.

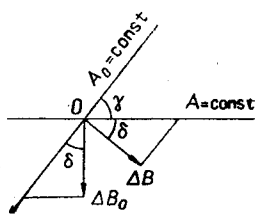
Аналогично можно получить формулы для расчета рассматриваемых погрешностей в том случае, если мост предназначен для измерения основного параметра (емкости, индуктивности) и относительного параметра (тангенса угла потерь), отсчитываемых по компенсирующим величинам A и A_0 . Квадратурные по отношению к последним паразитные составляющие $A_{к}$ и $A_{0.к}$ вызовут соответственно сигналы неравновесия:

$$\Delta B = S_A A_{к}; \quad \Delta B_0 = S_{A_0} A_{0.к}, \quad (4)$$

где S_A и S_{A_0} — абсолютные чувствительности цепи к изменению компенсирующих величин A и A_0 .

На рисунке изображены линии уравновешивания цепи, соответствующие рассматриваемому случаю; поскольку при раздельном отсчете емкости (индуктивности) и тангенса угла потерь имеем $\gamma = \pi/2 - \delta$ [7], то приращение компенсирующих величин ΔA и ΔA_0 , необходимые для приведения цепи в новое состояние равновесия, определяются формулами:

$$\Delta A = \frac{\Delta B \operatorname{tg} \delta + \Delta B_0 / \cos \delta}{S_A}; \quad \Delta A_0 = \frac{\Delta B_0 \operatorname{tg} \delta + \Delta B / \cos \delta}{S_{A_0}}. \quad (5)$$



Подставим (4) в (5) и определим относительные погрешности измерения $\lambda_{C,L} = \Delta A/A$ и $\delta_{\text{tg } \delta} = \Delta A_0/A_0$ основного и относительного параметров:

$$\delta_{C,L} = \Delta \text{tg } \delta + \frac{S_{A_0} A_0}{S_A A} \frac{\Delta_0}{\cos \delta}; \quad \delta_{\text{tg } \delta} = \Delta_0 \text{tg } \delta + \frac{S_A A}{S_{A_0} A_0} \frac{\Delta}{\cos \delta},$$

где $\Delta = A_k/A$ и $\Delta_0 = A_{0,k}/A_0$ — паразитные фазовые сдвиги в управляемых элементах уравнивающих цепей по параметрам p и p_0 соответственно. Полагая, как и раньше, $S_A A = S_p p$, $S_{A_0} A_0 = S_{p_0} p_0$, а также учитывая, что при раздельном отсчете емкости (индуктивности) и тангенса угла потерь $S_p p / S_{p_0} p_0 = \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}$ [9], будем иметь:

$$\delta_{C,L} = \text{tg } \delta (\Delta + \Delta_0); \quad \delta_{\text{tg } \delta} = \Delta_0 \text{tg } \delta + \Delta / \text{tg } \delta \cos^2 \delta,$$

откуда с учетом того, что $\Delta \text{tg } \delta = \delta_{\text{tg } \delta} \text{tg } \delta$, окончательно получаем:

$$\delta_{C,L} = \text{tg } \delta (\Delta + \Delta_0); \quad \Delta \text{tg } \delta = \frac{1}{\cos^2 \delta} [\Delta + \Delta_0 \sin^2 \delta]. \quad (6)$$

Как следует из (6), при измерении емкости (индуктивности) и тангенса угла потерь неидеальность обоих управляемых уравнивающих элементов в равной степени сказывается на относительной погрешности измерения основного параметра. Абсолютная погрешность измерения тангенса угла потерь при малых значениях тангенса ($\text{tg } \delta \ll 1$) определяется, главным образом, неидеальностью управляемого элемента, уравнивающего измерительную цепь по основному параметру. Однако с увеличением тангенса угла потерь существенно возрастает влияние на эту погрешность неидеальности второго уравнивающего элемента.

Оценим величину рассматриваемых погрешностей. В худшем случае при $\text{tg } \delta = 1$ и $\Delta = \Delta_0 = 0,001$ (управляемые уравнивающие элементы с таким значением паразитного фазового сдвига легко реализовать на основе фотоуправляемых сопротивлений [10]) вычисление по формулам (6) дает: $\delta_{C,L} = 0,2\%$, $\Delta \text{tg } \delta = 0,003$.

Выражения (3) и (6) представляют собой общие формулы для расчета погрешностей автокомпенсационных мостовых цепей, обусловленных неидеальностью управляемых элементов. Независимо от конкретной схемы используемой компенсационно-мостовой цепи эти формулы справедливы для сравнительно большой группы автокомпенсационных мостов, в которых: 1) используется автономная несвязанная регулировка компенсирующих величин (в противном случае принцип, сформулированный в [7], неприменим); 2) соблюдаются условия раздельного и (прямо или обратно) пропорционального отсчета квадратурных составляющих измеряемого комплексного сопротивления или емкости (индуктивности) и тангенса угла потерь. Наиболее жестким из этих ограничений является первое. Действительно, существуют практически ценные схемы компенсационно-мостовых цепей, в которых применяется связанная регулировка компенсирующих величин [11]. К подобным автокомпенсационным мостам выражения (3) и (6) неприменимы. В этом случае рассматриваемые погрешности могут быть определены на основе анализа конкретной схемы цепи или с использованием методов, изложенных в [6].

Перейдем теперь к рассмотрению погрешности, возникающей из-за искажения формы кривой компенсирующего сигнала. Как уже отмеча-

лось, формирование этого сигнала производится на базе опорного сигнала, задаваемого активным образцовым элементом (источником тока или напряжения). Обычно формы кривой компенсирующего и опорного сигналов несколько отличаются друг от друга из-за неидеальности частотных характеристик и нелинейности элементов, участвующих в формировании компенсирующего сигнала. Это различие может привести к возникновению погрешности, величина которой зависит от применяемого способа автоматического уравнивания, а также от типа используемых отсчетных приборов.

Очевидно, что если формы кривой опорного и компенсирующего сигнала не совпадают, то для уменьшения указанной погрешности необходимо использовать избирательные системы автоматического уравнивания, реагирующие лишь на первую гармонику сигнала неравновесия; иначе измерительную цепь нельзя достаточно полно уравновесить. С этой точки зрения, желательным является применение экстремальных систем [12] и систем прямого уравнивания [1], допускающих использование усилителей с узкой полосой пропускания. Если к тому же в качестве отсчетных приборов применить избирательные устройства, настроенные на основную гармонику сигнала, то в принципе рассматриваемая погрешность будет равна нулю. Это обстоятельство выгодно отличает компенсационно-мостовые измерительные цепи от компенсационных; в последних погрешность, обусловленная несоответствием форм кривых образцового и компенсирующего сигналов, принципиально неустраняема [13]. Однако применение избирательных отсчетных приборов нередко вызывает сравнительно большую дополнительную погрешность, возникающую вследствие нестабильности рабочей частоты измерительной цепи и параметров избирательных элементов. Поэтому представляет интерес оценить рассматриваемую погрешность для наиболее распространенного случая, когда отсчетные приборы являются широкополосными и реагируют на среднее значение сигнала.

Предположим, что компенсационно-мостовая измерительная цепь приведена в состояние равновесия на частоте основной гармоники источника питания с помощью избирательной системы автоматического уравнивания. Уравнением равновесия измерительной цепи будет следующее выражение [1]:

$$p_x = p_o M \frac{A_{к1}}{A_{о1}}, \quad (7)$$

где p_x и p_o — измеряемый и образцовый параметры; $A_{к1}$ и $A_{о1}$ — действующие значения первых гармоник компенсирующего и опорного сигналов; M — постоянный множитель, содержащий обычно числа витков трансформаторных делителей.

Действующие значения первых гармоник $A_{к1}$ и $A_{о1}$ определяются следующими выражениями:

$$A_{к1} = k_{fk} A_{к.ср} \sqrt{1 - \frac{A_{к2}^2}{A_k^2} - \frac{A_{к3}^2}{A_k^2} - \dots};$$

$$A_{о1} = k_{fo} A_{о.ср} \sqrt{1 - \frac{A_{о2}^2}{A_o^2} - \frac{A_{о3}^2}{A_o^2} - \dots},$$

где k_{fk} и k_{fo} — коэффициенты формы компенсирующего и опорного сигналов; $A_{к.ср}$ и $A_{о.ср}$ — средние значения этих сигналов; A_k и A_o —

их действующие значения; $A_{к2}, A_{к3}, \dots$ и $A_{о2}, A_{о3}, \dots$ — действующие значения высших гармонических составляющих соответствующих сигналов. Полагая, что $A_o \cong A_{о1}$ и $A_k \cong A_{к1}$, можно привести последние выражения к виду:

$$A_{к1} = k_{fk} A_{к.ср} \sqrt{1 - 10^{-4} k_{н.к}^2}; \quad A_{о1} = k_{fo} A_{о.ср} \sqrt{1 - 10^{-4} k_{н.о}^2} \quad (8)$$

где $k_{н.к}$ и $k_{н.о}$ — коэффициенты нелинейных искажений соответствующих сигналов в процентах.

Подстановка (8) в (7) с учетом членов лишь первого порядка малости (в предположении, что $k_{н.к} \ll 1$; $k_{н.о} \ll 1$) дает

$$p_x = p_o M \frac{k_{fk}}{k_{fo}} \frac{A_{к.ср}}{A_{о.ср}} [1 - 5 \cdot 10^{-3} (k_{н.к}^2 - k_{н.о}^2)]. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определить искомую погрешность, если известны величины $k_{fk}, k_{fo}, k_{н.к}$ и $k_{н.о}$. Очевидно, что в идеальном случае, когда формы кривой компенсирующего и опорного сигналов совпадают, эта погрешность равна нулю, поскольку $k_{fk} = k_{fo}$ и $k_{н.к} = k_{н.о}$. В простейшем реальном случае, когда значения k_{fk} и k_{fo} мало отличаются друг от друга, относительная погрешность измерения может быть определена по формуле*

$$\Delta p_x | p_x = -5 \cdot 10^{-3} (k_{н.к}^2 - k_{н.о}^2) \% \quad (10)$$

Для оценки величины рассматриваемой погрешности примем $k_{н.о} = 1\%$ и $k_{н.к} = 5\%$, что практически легко достижимо. Тогда в соответствии с (10) получим $\Delta p_x | p_x = 0,12\%$.

Располагая ориентировочными значениями рассмотренных выше пяти составляющих основной погрешности, нетрудно оценить общую погрешность автокомпенсационного моста. Полагая, что каждая из этих составляющих является случайной величиной с равномерным распределением плотности вероятности, можно определить суммарную погрешность β , характеризующую ориентировочный класс точности автоматических компенсационно-мостовых приборов, по известной формуле:

$$\beta = \sqrt{3} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=5} \delta_i^2}$$

где δ_i — значения частных погрешностей. Основываясь на приведенных выше оценках, положим $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_5 = 0,1\%$ и $\delta_4 = 0,2\%$; тогда расчет по последней формуле даст $\beta = 0,48\%$. Следовательно, на основе автокомпенсационных мостов переменного тока в настоящее время могут быть созданы измерительные приборы класса 0,5. Возможность построения устройств такой точности была подтверждена экспериментально. С этой целью был разработан макет широкодиапазонного автокомпенсационного моста для измерения параметров емкостных объектов; испытания макета показали, что погрешность измерения основного параметра (емкости) не превышала 0,5% при быстродействии 0,2—0,3 сек [10].

* Нетрудно видеть, что в этом простейшем случае выражение для рассматриваемой погрешности совпадает по форме с выражением аналогичной погрешности для компенсаторов переменного тока [13].

В заключение отметим, что результат, полученный при оценке точности автокомпенсационных мостов, следует рассматривать как верхнюю границу погрешности. Действительно, в зависимости от конкретных условий измерения отдельные частные погрешности могут быть существенно меньше своих наибольших значений, использовавшихся при указанной оценке. К тому же законы распределения плотности вероятности отдельных составляющих погрешности нередко близки к нормальному (а не к закону равномерной плотности), что также связано с уменьшением суммарной погрешности измерения. Наконец, повышение точности автокомпенсационных мостов может быть достигнуто путем совершенствования их элементов (в первую очередь — управляемых уравнивающих элементов, с неидеальностью которых связана существенная доля общей погрешности), а также путем применения новых схемных решений. Таким образом, класс 0,5 не является для подобных приборов предельным; в принципе возможно создание автокомпенсационных мостов и более высокой точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Б. Гриневич, А. Л. Грохольский, Е. Е. Добров, К. Б. Карандеев, В. И. Никулин, К. М. Соболевский. Автоматические компенсационно-мостовые устройства для измерения комплексных сопротивлений.— ЭИКА, ПИ 6601-1, 1968, вып. 12.
2. С. Т. Васьков. Прецизионный стабилизатор переменного напряжения фиксированных частот звукового диапазона.— В сб. «Автоматический контроль и методы электрических измерений». (Труды III конференции). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
3. М. С. Ройтман, Э. И. Цимбалист, Ю. М. Фомичев. Стабильный источник калиброванного напряжения.— Автометрия, 1968, № 3.
4. Л. И. Волгин. Линейный преобразователь емкости в постоянное напряжение.— Измерительная техника, 1965, № 1.
5. Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, К. М. Соболевский. Условия постоянства погрешности от неполного уравнивания автокомпенсационных мостовых цепей.— Автометрия, 1967, № 3.
6. И. Н. Коротков. Точные измерения электрических емкости и индуктивности. М., Изд-во Комитета стандартов мер и измерительных приборов, 1966.
7. К. Б. Карандеев, Р. С. Кравцов. О связи между углом сходимости моста переменного тока и условиями раздельного отсчета. Доклады Львовского политехникума, т. II, вып. 2. Львов, 1958.
8. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич. Чувствительность и согласование параметров электроизмерительных устройств.— В сб. «Вопросы автоматики и измерительной техники», вып. 4. Киев, Изд-во АН УССР, 1955.
9. Ф. Б. Гриневич, К. Б. Карандеев. Об определении погрешности измерения комплексных сопротивлений.— В сб. «Исследования по методике оценки погрешности измерений», вып. 57 (117). Под ред. К. П. Широкова. М.—Л., Стандартгиз, 1962.
10. М. А. Ахметьев, Е. Е. Добров, Ю. Я. Шагалов. Автокомпенсационный измерительный преобразователь «С, $\text{tg } \delta$, R — напряжение».— Материалы IX Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, «Наука», 1969.
11. Е. Е. Добров. Автокомпенсационный мост переменного тока для измерения комплексных сопротивлений. Авторское свидетельство № 199991.— ИПОТЗ, 1967, № 16.
12. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
13. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

Поступила в редакцию
14 февраля 1969 г.