

**УСЛОВИЯ ПОСТОЯНСТВА
 ПОГРЕШНОСТИ ОТ НЕПОЛНОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ
 В АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫХ МОСТОВЫХ ЦЕПЯХ**

УДК 621.317.733

При проектировании уравновешенных мостовых измерительных устройств, как правило, требуется, чтобы погрешность от неполного уравновешивания, обусловленная неидеальностью систем регулирования и регулируемых элементов, сохранялась неизменной во всем диапазоне измеряемых величин. Характер изменения этой погрешности тесно связан с характером изменения чувствительности мостовой цепи.

Хотя исследованию связи между погрешностью и чувствительностью мостовых цепей переменного тока посвящено большое количество работ (см., например, [1—4]), однако условия постоянства погрешности от неполного уравновешивания изучены недостаточно. В частности, большой интерес представляет выяснение зависимости указанных условий от типа применяемой системы уравновешивания, а также от вида функции, связывающей измеряемую величину с отсчетной. Этот вопрос приобретает важное практическое значение при разработке схем автокомпенсационных (самоуравновешиваемых) мостовых цепей, которые в последнее время получают все большее распространение [5, 6]. Действительно, в автокомпенсационных мостах наряду с астатическими системами автоматического уравновешивания весьма эффективно могут быть использованы и статические системы, не нашедшие широкого применения в обычных автоматических мостах. Кроме того, при раздельном измерении двух параметров комплексного сопротивления с помощью автокомпенсационных мостовых цепей часто не удается обеспечить прямо пропорциональную связь между обеими парами измеряемых и отсчетных величин и приходится один из параметров отсчитывать по обратной пропорциональной шкале.

Ниже получены условия постоянства погрешности от неполного уравновешивания и приведены соответствующие рекомендации по построению автокомпенсационных мостов со статическим или астатическим уравновешиванием, измерительные цепи которых обеспечивают прямо или обратно пропорциональную связь

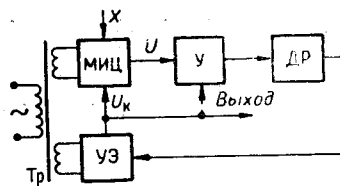


Рис. 1.

между измеряемой и отсчетной величинами. Предполагается, что отсчетные величины совпадают с величинами, регулируемыми в процессе уравнивания.

На рис. 1 представлена блок-схема автокомпенсационного моста переменного тока, уравниваемого по одному параметру путем изменения напряжения источника, включенного в одно из плеч мостовой цепи. Мост состоит из собственно мостовой измерительной цепи МИЦ, усилителя $У$, детектора равновесия $ДР$, электронного управляемого элемента $УЭ$ и трансформатора напряжения $Тр$. Напряжение неравновесия U , появляющееся на выходе мостовой цепи при подключении измеряемого параметра X , усиливается и поступает на детектор равновесия, в котором вырабатывается управляющее воздействие, передаваемое на электронный управляемый элемент. С помощью управляемого элемента формируется подаваемое в мостовую цепь компенсационное напряжение U_k , амплитуда которого определяется величиной управляющего воздействия. При этом в качестве опорного применяется напряжение, снимаемое с одной из вторичных обмоток трансформатора. Другая вторичная обмотка используется для питания мостовой цепи.

Если мост не находится в состоянии равновесия, то под влиянием управляющего воздействия со стороны детектора равновесия величина напряжения U_k изменяется в таком направлении, чтобы обеспечить уменьшение напряжения U . В идеале процесс уравнивания продолжается до тех пор, пока последнее не станет бесконечно близким к нулю. В реальных условиях оно всегда значительно отличается от нуля из-за неидеальности характеристик системы автоматического уравнивания.

Имея в виду связь параметра X с величиной U_k

$$X = \psi(U_k), \quad (1)$$

определим абсолютную ΔX и относительную $\delta X = \Delta X/X$ погрешности от неполного уравнивания рассматриваемого автокомпенсационного моста:

$$\Delta X = \psi'(U_k) \Delta U_k; \quad (2)$$

$$\delta X = \frac{\psi'(U_k)}{\psi(U_k)} \Delta U_k, \quad (3)$$

где ΔU_k — отклонение компенсационного напряжения от значения, соответствующего состоянию полного равновесия моста.

При небольших отклонениях от положения равновесия величина ΔU_k связана с напряжением U следующей зависимостью [7]:

$$U = S_{U_k} \Delta U_k = S_{U_k}^0 \frac{\Delta U_k}{U_k},$$

где S_{U_k} и $S_{U_k}^0$ — соответственно абсолютная и относительная чувствительность мостовой цепи к изменению компенсационного напряжения.

Определив из последнего равенства величину ΔU_k и подставив ее значение в (2) и (3), получим:

$$\Delta X = \frac{\psi'(U_k)}{S_{U_k}} U = \frac{\psi'(U_k) U_k}{S_{U_k}^0} U; \quad (4)$$

$$\delta X = \frac{\psi'(U_k)}{\psi(U_k) S_{U_k}} U = \frac{\psi'(U_k) U_k}{\psi(U_k) S_{U_k}^0} U. \quad (5)$$

Установившееся значение напряжения неравновесия зависит от типа применяемой системы автоматического уравнивания. Если система уравнивания является статической, то напряжение неравновесия пропорционально компенсационному напряжению

$$U = \frac{U_k}{K},$$

где K — полный коэффициент усиления статической системы уравнивания.

Если система уравнивания является астатической, то установившееся значение напряжения U не зависит от величины U_k и определяется порогом чувствительности детектора U_n

$$U = \frac{U_n}{K_y},$$

где K_y — коэффициент усиления усилителя, причем $U_n = \text{const}$.

Подставив обе последние формулы в (4) и (5), найдем соответственно:

для статической системы автоматического уравнивания моста

$$\Delta X = \frac{\psi'(U_k) U_k}{S_{U_k} K} = \frac{\psi'(U_k) U_k^2}{S_{U_k}^0 K}; \quad (6)$$

$$\delta X = \frac{\psi'(U_k) U_k}{\psi(U_k) S_{U_k} K} = \frac{\psi'(U_k) U_k^2}{\psi(U_k) S_{U_k}^0 K}; \quad (7)$$

для астатической системы автоматического уравнивания

$$\Delta X = \frac{\psi'(U_k) U_n}{S_{U_k} K_y} = \frac{\psi'(U_k) U_n U_k}{S_{U_k}^0 K_y}; \quad (8)$$

$$\delta X = \frac{\psi'(U_k) U_n}{\psi(U_k) S_{U_k} K_y} = \frac{\psi'(U_k) U_n U_k}{\psi(U_k) S_{U_k}^0 K_y}. \quad (9)$$

Выражения (6) — (9) являются исходными для получения условий постоянства абсолютной или относительной погрешности от неполного уравнивания моста во всем диапазоне изменения измеряемого параметра X . Поскольку последний однозначно связан с напряжением U_k , то для обеспечения указанных условий необходимо, чтобы правые части выражений (6) — (9) сохранялись неизменными при любых значениях величины U_k . Как следует из этих выражений, погрешности ΔX

и δX зависят непосредственно от величины компенсационного напряжения U_k , а также от вида функции (1), абсолютной S_{U_k} или относительной $S_{U_k}^0$ чувствительности мостовой цепи и коэффициентов усиления K или K_y .

Очевидно, что вид функции (1) определяется типом выбранной измерительной цепи моста и может считаться заданным. Как уже указывалось, в автокомпенсационных мостах переменного тока наиболее часто встречается прямо или обратно пропорциональная связь измеряемой и отсчетной величин.

Чувствительность мостовой цепи в общем случае представляет собой сложную функцию пассивных и активных параметров. При этом вблизи положения равновесия с помощью специальных приемов может быть обеспечена различная зависимость чувствительности от компенсационного напряжения или ее постоянство.

Для получения более общих условий постоянства рассматриваемых погрешностей можно полагать, что полный коэффициент усиления статической системы уравнивания K и коэффициент усиления усилителя при астатическом уравнивании K_y также являются функциями напряжения U_k . Эта функциональная связь может быть реализована путем применения дополнительных элементов в системе автоматического уравнивания, которые управляются напряжением U_k так, чтобы выполнялась требуемая зависимость $K(U_k)$ или $K_y(U_k)$.

Таким образом, для каждого заданного вида функции (1) в соответствии с одним из уравнений (6)—(9) можно указать такую зависимость соответствующего произведения $K S_{U_k}$, $K S_{U_k}^0$, $K_y S_{U_k}$ или $K_y S_{U_k}^0$ от компенсационного напряжения, при которой достигается постоянство величины ΔX или δX .

Пусть требуется, например, обеспечить постоянство относительной погрешности от неполного уравнивания для автокомпенсационного моста, система уравнивания которого является статической, а измерительная цепь такова, что измеряемая и отсчетная величины связаны между собой прямо пропорциональной зависимостью

$$X = \alpha U_k,$$

где $\alpha = \text{const}$ — коэффициент пропорциональности.

Подставив последнее равенство в уравнение (7), получим

$$\delta X = \frac{1}{K S_{U_k}}.$$

Из этого выражения следует, что условием постоянства относительной погрешности от неполного уравнивания будет постоянство произведения

$$K S_{U_k} = \frac{1}{\delta X} = \text{const}.$$

Указанное условие можно, в частности, реализовать, если $K = \text{const}$ и $S_{U_k} = \text{const}$. Другими словами, относительная погрешность от неполного уравнивания рассматриваемого автокомпенсационного моста будет постоянна во всем диапазоне изменения измеряемого параметра, если все элементы системы автоматического уравнивания обладают линейными статическими характеристиками, а абсолютная чувствительность мостовой измерительной цепи к изменению регулируемой

величины постоянна. Практическое выполнение этих требований обычно не встречает затруднений.

В качестве другого примера определим условия постоянства абсолютной погрешности от неполного уравнивания для автокомпенсационного моста, который имеет астатическую систему регулирования и

$$\Delta X = - \frac{\beta U_{\text{п}}}{S_{U_{\text{к}}}^0 K_{\text{у}} U_{\text{к}}}.$$

Отсюда следует, что условием постоянства абсолютной погрешности от неполного уравнивания будет обратно пропорциональная зависимость произведения $K_{\text{у}} S_{U_{\text{к}}}^0$ от компенсационного напряжения $U_{\text{к}}$:

$$K_{\text{у}} S_{U_{\text{к}}}^0 = - \frac{\beta U_{\text{п}}}{\Delta X U_{\text{к}}}.$$

Как будет показано ниже, в автокомпенсационных мостах переменного тока не удастся организовать обратно пропорциональную зависимость относительной чувствительности $S_{U_{\text{к}}}^0$ от величины $U_{\text{к}}$. Поэтому указанное условие невозможно выполнить при постоянном коэффициенте усиления усилителя $K_{\text{у}}$. Однако оно может быть соблюдено, если $K_{\text{у}} = \gamma / U_{\text{к}}$, где $\gamma = \text{const}$, а $S_{U_{\text{к}}}^0 = \text{const}$. Это означает, что для постоянства абсолютной погрешности от неполного уравнивания рассматриваемого моста необходимо, чтобы относительная чувствительность мостовой цепи по регулируемой величине была постоянной, а коэффициент усиления усилителя напряжения неравновесия изменялся обратно пропорционально изменению регулируемой величины. Последнее может быть реализовано путем включения в тракт усиления дополнительного элемента с логарифмической вольт-амперной характеристикой, управляемого напряжением $U_{\text{к}}$. Эта функциональная связь обозначена на рис. 1 пунктирной линией.

Аналогично могут быть получены условия постоянства относительной и абсолютной погрешностей от неполного уравнивания, соответствующие любым другим сочетаниям применяемой системы автоматического регулирования (статической или астатической) и зависимости между измеряемой и отсчетной величинами (прямо или обратно пропорциональной). Эти условия сведены в таблицу и выражены в виде зависимости произведений $K_{\text{у}} S_{U_{\text{к}}}$, $K_{\text{у}} S_{U_{\text{к}}}^0$, $K S_{U_{\text{к}}}$, $K S_{U_{\text{к}}}^0$ от компенсационного напряжения $U_{\text{к}}$. Как видно из таблицы, для определения искомых условий должны быть заданы: вид погрешности, постоянство которой необходимо обеспечить, тип системы автоматического уравнивания и вид функции (1). Имея эти данные, в пересечении соответствующих строк и столбцов находим требуемый для постоянства погрешности вид произведений коэффициента усиления на чувствительность мостовой цепи.

Из таблицы следует, что при астатической системе уравнивания моста и прямо пропорциональной зависимости $X = \psi(U_{\text{к}})$ для

Условия постоянства погрешностей от неполного уравновешивания автокомпенсационных мостов переменного тока

(требуемый вид произведений $K_y S_{U_k}$, $K_y S_{U_k}^0$, $K S_{U_k}$ и $K S_{U_k}^0$)

Тип системы автоматического уравновешивания	Постоянство погрешности		абсолютной ($\Delta X = \text{const}$)		относительной ($\delta X = \text{const}$)	
	Вид функции $X = \psi(U_k)$ Произведение чувствительности и коэффициента усиления	$X = \alpha U_k$, где $\alpha = \text{const}$	$X = \beta U_k$, где $\beta = \text{const}$	$X = \alpha U_k$, где $\alpha = \text{const}$	$X = \beta U_k$, где $\beta = \text{const}$	
Астатическая	$K_y S_{U_k}$	$\frac{\alpha U_n}{\Delta X}$	$-\frac{\beta U_n}{\Delta X} \frac{1}{U_k^2}$	$\frac{U_n}{\delta X} \frac{1}{U_k}$	$-\frac{U_n}{\delta X} \frac{1}{U_k}$	
	$K_y S_{U_k}^0$	$\frac{\alpha U_n}{\Delta X} U_k$	$-\frac{\beta U_n}{\Delta X} \frac{1}{U_k}$	$\frac{U_n}{\delta X}$	$-\frac{U_n}{\delta X}$	
Статическая	$K S_{U_k}$	$\frac{\alpha}{\Delta X} U_k$	$-\frac{\beta}{\Delta X} \frac{1}{U_k}$	$\frac{1}{\delta X}$	$-\frac{1}{\delta X}$	
	$K S_{U_k}^0$	$\frac{\alpha}{\Delta X} U_k^2$	$-\frac{\beta}{\Delta X}$	$\frac{1}{\delta X} U_k$	$-\frac{1}{\delta X} U_k$	

постоянства абсолютной погрешности от неполного уравнивания необходимо, чтобы

$$K_y S_{U_k} = \frac{\alpha U_n}{\Delta X},$$

или

$$K_y S_{U_k}^0 = \frac{\alpha U_n}{\Delta X} U_k. \quad (10)$$

Условие постоянства относительной погрешности от неполного уравнивания имеет вид

$$K_y S_{U_k} = \frac{U_n}{\delta X U_k},$$

или

$$K_y S_{U_k}^0 = \frac{U_n}{\delta X}. \quad (11)$$

Из (10) и (11) видно, что при постоянном коэффициенте K_y условием постоянства абсолютной или относительной погрешности в рассматриваемом случае является постоянство соответственно абсолютной или относительной чувствительности. Эти требования являются обычными при проектировании мостов переменного тока с реверсивными двигателями.

Иное положение имеет место при использовании статического уравнивания, а также в том случае, когда измерительная цепь обеспечивает обратно пропорциональную связь между измеряемой и отсчетной величинами. В этих случаях условия постоянства погрешности от неполного уравнивания автокомпенсационных мостов резко отличаются от рассмотренных выше. Как следует из таблицы, при постоянных коэффициентах K и K_y условием постоянства абсолютной или относительной погрешности может явиться неизменность соответственно относительной или абсолютной чувствительности моста. Более того, иногда требуется не постоянство чувствительности, а ее пропорциональная или квадратичная зависимость от величины компенсационного напряжения.

Рассмотрим теперь возможности практической реализации приведенных в таблице условий. Отметим, что хотя применение дополнительных управляемых элементов в системе автоматического уравнивания не связано с принципиальными затруднениями, однако наличие таких элементов все же усложняет устройство в целом и является поэтому нежелательным. Следовательно, представляет интерес выяснить, возможно ли удовлетворение полученных условий постоянства погрешности путем подбора соответствующей зависимости абсолютной или относительной чувствительности моста при постоянстве коэффициента усиления K или K_y .

Выведем выражение для чувствительности автокомпенсационного моста, получившего в настоящее время наиболее широкое распространение. Схема моста приведена на рис. 2. Он состоит из двух проводимостей Y_1 и Y_2 , одна из которых является испытуемой, а другая — образцовой, двух источников переменного напряжения U_1 и U_2 , один из которых является компенсационным, а другой — опорным, и детектора равновесия ДР.

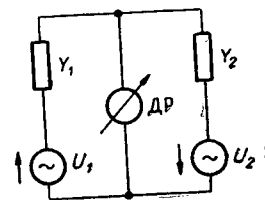


Рис. 2.

Выражение для выходного напряжения моста U можно записать в виде

$$U = \frac{U_1 Y_1 - U_2 Y_2}{Y_1 + Y_2}.$$

Дифференцируя это выражение по компенсационной величине U_k и считая опорное напряжение U_0 постоянным, приходим к следующему выражению для модуля абсолютной чувствительности мостовой цепи:

$$|S_{U_k}| = \frac{1}{\left|1 + \frac{U_k}{U_0}\right|}. \quad (12)$$

Формула (12) дает связь модуля чувствительности с регулируемой величиной независимо от того, какой из источников U_1 или U_2 регулируется в процессе уравнивания. Как видно из (12), в общем случае чувствительность является дробно-линейной функцией напряжения U_k . В частном случае, когда $U_k/U_0 \ll 1$, выражение (12) упрощается:

$$|S'_{U_k}| = 1. \quad (13)$$

Другим частным случаем выражения (12), соответствующим условию $U_k/U_0 \gg 1$, является

$$|S''_{U_k}| = \left|-\frac{U_0}{U_k}\right|. \quad (14)$$

Различные функциональные связи абсолютной чувствительности с регулируемым напряжением, которые можно обеспечить за счет определенного выбора параметров мостовой автокомпенсационной цепи, исчерпываются выражениями (12) — (14). Как следует из этих выражений, невозможно обеспечить зависимости $S_{U_k} = \kappa/U_k^2$ и $S_{U_k} = \kappa U_k$, что соответствует для относительной чувствительности зависимостям $S^0_{U_k} = \kappa/U_k$ и $S^0_{U_k} = \kappa U_k^2$, где $\kappa = \text{const}$.

Таким образом, можно дать следующие рекомендации по построению схем автокомпенсационных мостов переменного тока при постоянстве коэффициентов усиления K или K_y .

1. При необходимости обеспечить постоянство относительной погрешности от неполного уравнивания следует стремиться к постоянству абсолютной чувствительности моста по регулируемому напряжению, если применяется статическая система уравнивания, и к постоянству относительной чувствительности по регулируемому напряжению, если применяется астатическая система уравнивания.

2. При необходимости обеспечить постоянство абсолютной погрешности от неполного уравнивания следует стремиться к постоянству относительной чувствительности моста по регулируемому напряжению, если применение статической системы уравнивания сочетается с обратной пропорциональной связью между измеряемой и отсчетной величинами, и к постоянству абсолютной чувствительности моста по регулируемому напряжению, если применение астатической системы уравнивания сочетается с прямо пропорциональной связью между изме-

ряемой и отсчетной величинами. Следует в этом случае избегать применения статической системы уравнивания, если измерительная цепь моста обеспечивает прямо пропорциональную зависимость между измеряемой и отсчетной величинами, а также применения астатической системы уравнивания, если эта зависимость обратно пропорциональна.

Указанные рекомендации могут быть выполнены за счет одного лишь выбора параметров мостовой цепи. Если по каким-либо причинам это невозможно, то для обеспечения постоянства соответствующих погрешностей становится неизбежным применение дополнительных управляемых элементов в системе автоматического уравнивания.

Очевидно, что аналогичные выводы можно получить и для автокомпенсационных мостов, в которых активные элементы, включаемые в плечи измерительной цепи, являются не источниками напряжения, а источниками тока. Все эти выводы могут быть распространены также и на автокомпенсационные устройства, уравниваемые по двум параметрам, если при этом обеспечивается развязка контуров регулирования «в малом».

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич. Чувствительность и согласование параметров электроизмерительных устройств.— Вопросы автоматики и измерительной техники, т. 5, вып. 4. Киев, Изд-во АН УССР, 1955.
2. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич, К. М. Соболевский. О свойствах одной схемы моста со взаимной индуктивностью между двумя соседними плечами.— Доклады ЛПИ, т. I, вып. 2. Львов, Изд-во ЛГУ, 1955.
3. Ф. Б. Гриневич, К. Б. Карандеев. Об определении погрешности измерения комплексных сопротивлений.— Исследования по методике оценки погрешностей измерений. Труды Институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 57 (117). Под ред. К. П. Широкова. М.—Л., Стандартгиз, 1962.
4. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
5. Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, К. Б. Карандеев. Автокомпенсационные мостовые цепи.— Автометрия, 1965, № 5.
6. R. Calvert, J. Mildwater. Self-Balancing Transformer Ratio Arm Bridges.— Electronic Engineering, 1963, v. 35, № 430.
7. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

Поступила в редакцию
2 ноября 1966 г.