

## Автоматическая прецизионная система для метрологического обеспечения измерений параметров импеданса. Ч. 2. Методика и результаты экспериментальных исследований

М. Н. СУРДУ, А. Л. ЛАМЕКО, Д. М. СУРДУ, С. Н. КУРСИН

Укрметртестстандарт, Киев, Украина, e-mail: michaelsturdu1941@gmail.com

Описаны методика и результаты экспериментальных исследований комплекса прецизионных автоматических компараторов и термостатированных мер-переносчиков. Методика исследований позволяет выявить погрешности измерений комплекса до  $10^{-7}$  и менее. Она основана на раздельном определении составляющих суммарной погрешности: аддитивной, мультипликативной и от интегральной нелинейности, а также на раздельном учете случайной и детерминированной составляющих.

**Ключевые слова:** импеданс, компаратор, эталон, воспроизведение и передача единицы, квадратурный и автотрансформаторный мосты, методика аттестации.

The procedure and results of experimental studies of precision automatic comparators and temperature-controlled impedance standards, allowing to reveals the measurement of complex errors up to  $10^{-7}$  and less, are described. It is based on separate determination of total error components (additive, multiplicative, and from integral nonlinearity) as well as on separate calculation of random and determinate components.

**Key words:** impedance, comparator, standard, reproduction and transfer of unit, quadrature and autotransformer bridges, testing procedure.

Создание новой измерительной аппаратуры всегда сопровождается разработкой методик исследования ее метрологических характеристик. Особенно это важно в тех случаях, когда отсутствуют или имеются в недостаточном количестве необходимые образцовые меры и создаваемая аппаратура является автоматической.

В рамках международного проекта, финансируемого США и ЕС, разработан комплекс автоматической аппаратуры, включающий:

автотрансформаторный (АТ) мост-компаратор, который обеспечивает передачу размера единиц любого превалирующего (первого) параметра (емкости  $C$ , индуктивности  $L$ , сопротивления  $R$ ) во всем диапазоне импедансов мер при значении второго параметра (тангенса угла потерь  $\text{tg}\delta$  или тангенса угла фазового сдвига  $\text{tg}\varphi$ ), изменяющемся в диапазоне от нуля до единицы, а также воспроизводит единицу индуктивности по единицам емкости и частоты (передача вида  $C \rightarrow L$ );

квадратурный мост-компаратор, который выполняет передачу вида  $C \leftrightarrow R$  при малых  $\text{tg}\delta$  или  $\text{tg}\varphi$ ;

набор термостатированных мер емкости, активного сопротивления и индуктивности.

В данной статье рассмотрены методы, средства и результаты метрологических исследований совокупности компараторов.

Подробное описание разработанной аппаратуры приведено в [1].

**Методика определения погрешности АТ-моста-компаратора.** Автотрансформаторный мост представляет собой устройство, которое уравнивается по основному параметру путем регулировки одного и того же плечевого отношения чисел витков обмоток  $m_{1c}/m_2$  автотрансформатора. Для уравнивания по второму, квадратурному по отношению к

основному, параметру используется фазовращатель и одно и то же, независимо от вида второго параметра, регулируемое вспомогательное отношение числа витков автотрансформатора  $\pm m_{1k}/m_2$ . Мост уравнивают по первым четырем декадам, а для получения точного результата измерения определяют отклонение  $(\Delta m_{1c} + \Delta m_{1k})/m_2$  текущего состояния моста от точки истинного равновесия при измерении двух сигналов  $U_1$  и  $U_2$  и вариации  $\Delta m_v$  числа витков обмотки  $m_1$  с последующим измерением сигнала неравновесия  $U_{2v}$ . Уравнение равновесия АТ-моста имеет вид [1]:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{m_{1c} + jm_{1k}}{m_2} + \frac{\Delta m_{1c} + j\Delta m_{1k}}{m_2}. \quad (1)$$

Вторая дробь в (1) — величина, далее называемая неравновесием моста, определяется по уравнению

$$\frac{\Delta m_{1c} + j\Delta m_{1k}}{m_2} = \delta Z = -\frac{1}{2} \left( \frac{m_1 + m_2}{m_2} \right) \left( C + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} D \right) \frac{\delta_v}{1 + (C + D)\delta_v},$$

$$\text{где } C = \frac{U_2 + U_1}{U_{2v} - U_2}; \quad D = \frac{U_2 - U_1}{U_{2v} - U_2}; \quad \delta_v = \frac{\delta m_v}{1 + \delta m_v}; \quad \delta m_v = \frac{\Delta m_{1v}}{m_1 + m_2}.$$

С учетом возможных источников погрешности измерения уравнение (1) можно переписать в форме

$$Z_1/Z_2 = [m_{1c}(1 + \delta_c) + jm_{1k}(1 + \delta_k)]/m_2 + (\delta Z + \Delta_H)(1 + \delta_a) + \delta_s,$$

где  $\delta_c, \delta_k$  — комплексные относительные погрешности плечевых отношений  $m_{1c}/m_2$  и  $m_{1k}/m_2$ ;  $\Delta_H$  — приведенная аддитивная погрешность (начальные показания) компаратора;  $\delta_a$  — погрешность измерения неравновесия  $\delta Z$  моста;  $\delta_s$  — среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей погрешности измерения.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что между перечисленными источниками погрешности корреляция практически отсутствует. Поэтому в методике метрологических исследований компаратора эти источники погрешностей можно рассматривать раздельно.

Погрешности сравнения параметров эталонных мер импедансов  $Z_1$  и  $Z_2$  обычно разделяются на систематические и случайные. Случайная составляющая погрешности  $\delta_s$  определяется отношением сигнал—шум на входе векторного вольтметра. В дальнейшем, в соответствии с общепринятой методикой, любую измеряемую величину находят как среднее значение совокупности результатов измерений, а случайную составляющую  $\delta_s$  — как СКО среднего значения этой совокупности. Такой порядок измерений повторяется во всех пунктах методики и потому далее не описывается. Для достижения максимальной точности в процессе любого измерения первоначально измеряют, а затем в цифровой форме учитывают начальные параметры  $\Delta_n$  компаратора.

Рассмотрим уравнения равновесия АТ-моста в процессе измерения параметров различных эталонов.

А. Измерение малых значений (менее 0,02 %) отношения импедансов:

$$Z_1/Z_2 = (\Delta_n + \delta Z) (1 + \delta_a) + \delta_s. \quad (2)$$

Б. Сравнение однородных эталонов — емкости или сопротивления — при малых значениях второго параметра:

$$Z_1/Z_2 = (1 + \delta_c) m_{1c}/m_2 + (\Delta_n + \delta Z) (1 + \delta_a) + \delta_s. \quad (3)$$

В. Сравнение эталонов емкости и сопротивления при малых значениях второго параметра:

$$Z_1/Z_2 = j(1 + \delta_k) m_{1k}/m_2 + (\Delta_n + \delta Z) (1 + \delta_a) + \delta_s. \quad (4)$$

В соответствии с уравнениями равновесия (2)—(4) и разработанной методикой определяют три составляющие погрешности сравнения:  $\delta_a$ ,  $\delta_c$ ,  $\delta_k$ .

**Погрешность  $\delta_a$  измерения неравновесия моста.** Она зависит от погрешности используемого векторного вольтметра — нелинейности его функции преобразования, чувствительности к высшим гармоникам сигнала неравновесия, уровня входных шумов, а также от погрешности вариации  $\Delta m_{1v}$  числа витков обмотки  $m_1$ .

Как показали предварительные исследования, степень подавления высших гармоник сигнала неравновесия вольтметра достигает  $10^5$ , а уровень гармоник генератора моста не превышает  $2 \cdot 10^4$ . Поэтому погрешность  $\delta_a$  практически не зависит от спектра входного сигнала и вида измеряемых параметров или значения измеряемого отношения импедансов. Однако необходимо убедиться, что в аппаратуре не появились какие-либо факторы, нарушающие это утверждение. Для этой цели погрешность  $\delta_a$  определяют на каждом диапазоне измеряемых импедансов с использованием соответственно эталонов емкости и сопротивления.

Поскольку погрешность  $\delta_a$  не должна превышать 0,01—0,02 %, для ее определения используют метод комплектной поверки [2].

В высокоомной области в плечо  $m_1$  компаратора включают меру импеданса  $Z_1$ , соответствующую исследуемому диапазону и виду параметра, а в плечо  $m_2$  компаратора в качестве  $Z_2$  — меру бесконечного импеданса. Измеряют ад-

дитивную погрешность  $\delta_n$  компаратора, входящую в уравнение (4), и затем в цифровой форме ее исключают.

После этого в плечо  $m_2$  компаратора включают меру импеданса, такую что  $Z_1/Z_2 \leq 0,02—0,03$  % и измеряют ее. Полученный результат измерения будет зависеть только от погрешностей используемых мер и компаратора.

Погрешность  $\delta_a$  вычисляют по формуле

$$\delta_a = (Z_{2и} - Z_{2д})/Z_{2д},$$

где  $Z_{2и}$ ,  $Z_{2д}$  — измеренное и действительное значения меры импеданса  $Z_x$ , включенной в плечо  $m_2$ .

Погрешность  $\Delta\delta_a$  определения величины  $\delta_a$  находят из выражения

$$\Delta\delta_a = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + 2\delta_s^2},$$

где  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  — погрешности аттестации мер импеданса  $Z_1$  и  $Z_2$ .

В низкоомной области в плечо  $m_2$  компаратора включают меру  $Z_2$  импеданса, соответствующего исследуемому диапазону и виду параметра. Измеряют и учитывают аддитивную погрешность  $\Delta_n$  компаратора при включении эквивалента нулевого импеданса в плечо  $m_1$  компаратора. Затем в это плечо включают меру импеданса  $Z_1$ , такую что  $Z_1/Z_2 \leq 0,02—0,03$  %, и измеряют ее параметры.

Погрешность измерения неравновесия моста  $\delta_a$  и погрешность определения этой величины находят по формулам, приведенным выше.

**Погрешность  $\delta_c$  коэффициента деления  $m_{1c}/m_2$  основного делителя АТ-моста.** Так как трансформаторный (автотрансформаторный) делитель часто используют для точных измерений, разработке методов его калибровки посвящено множество источников [3—9]. В данном случае необходимо определить погрешность индуктивного делителя при его работе в составе автоматического моста-компаратора.

В описываемом компараторе отношение импедансов эталонов с максимальной точностью можно получить при условии  $Z_1/Z_2 \approx m_{1c}/m_2 = 0,1; 0,2; \dots; 1,0$ . В этих точках результат измерения характеризуется погрешностью  $\delta_c$  коэффициента деления  $m_{1c}/m_2$  основного делителя. Эту погрешность можно разделить на две составляющие: мультипликативную  $\delta_{см}$  и нелинейности  $\delta_{сн}$ .

Мультипликативная составляющая  $\delta_{см}$  погрешности  $\delta_c$  основного делителя определяется неравенством максимального, равного 1,0, отношения  $m_{1c}/m_2$  числа витков основного делителя соответствующему отношению напряжений. Теоретически эта погрешность не должна зависеть от вида импеданса сравниваемых эталонов. Методика предусматривает определение этой составляющей погрешности во всем диапазоне измерений в десятичных точках с использованием мер как емкости, так и активного сопротивления.

Чтобы определить  $\delta_{см}$ , используют метод перестановок при равноминальном сравнении [10, 11]. Для этого к компаратору в плечо  $m_1$  подключают меру  $Z_1$ , а в плечо  $m_2$  — меру  $Z_2$ , однородную с  $Z_1$  ( $Z_1 \approx Z_2$ ). Затем проводят передачу  $Z_1 \rightarrow Z_2$  и определяют значение  $Z_2^1$ . После этого меняют местами меры  $Z_1$  и  $Z_2$ , снова выполняют передачу  $Z_1 \rightarrow Z_2$  и определяют значение  $Z_2^2$ .

Мультипликативную погрешность компаратора вычисляют как

$$\delta_{\text{см}} = (\Delta_1 + \Delta_2)/(2Z_0), \quad (5)$$

где  $\Delta_1 = Z_0 - Z_2^1$ ;  $\Delta_2 = Z_0 - Z_2^2$ ;  $Z_0$  — номинальное значение используемых мер.

Погрешность, найденная по (5) является комплексной величиной. Она представляет мультипликативную погрешность компаратора как по основному, так и по вспомогательному параметрам. Это замечание относится ко всем исследованиям метрологических характеристик компаратора.

Погрешность определения мультипликативной погрешности  $\delta_{\text{см}}$  основного делителя выражается формулой

$$\Delta\delta_{\text{см}} = \sqrt{\delta Z_1^2 + \delta Z_2^2 + (\delta_a \delta Z)^2 + 2\delta_s^2}. \quad (6)$$

где  $\delta Z_1, \delta Z_2$  — нестабильности эталонных мер  $Z_1$  и  $Z_2$  в течение двух измерений.

Погрешность  $\delta_{\text{сн}}$  от нелинейности основного делителя АТ-моста. Экспериментальные исследования показали, что погрешность  $\delta_{\text{см}}$  меняется мало: во всем диапазоне значений импеданса мер ее колебания не превышают  $\pm 10^{-7}$ . Лишь при приближении импеданса мер к 1 Ом она возрастает до  $\pm 10^{-6}$ . Это явление обусловлено остаточной взаимной индуктивной связью между токовой и потенциальной петлями и неидеальностью конструкции компаратора. Поскольку погрешность от нелинейности представляется как нестабильность мультипликативной погрешности в диапазоне измерения, можно ограничиться ее нахождением только на двух диапазонах — высокоомном и низкоомном.

Для определения нелинейности коэффициента деления основного делителя на высокоомных пределах используется термостатированный магазин проводимости, содержащий опорную меру емкости  $C_{10}$  и десять равнономинальных  $C_0, \dots, C_9$  мер, равных  $0,1C_{10}$ . Согласно [10, 11] нелинейность функции преобразования определяется на основе сравнения арифметической суммы  $C_{\text{на}}$  результатов измерения некоторой совокупности отдельно взятых  $n$  мер и результата измерения суммарной меры  $C_{\text{н}\Sigma}$ , параметры которой представляют собой результат физического суммирования этой же совокупности. Погрешность  $\delta_{\text{сн}}$  от нелинейности делителя и погрешность  $\Delta\delta_{\text{сн}}$  ее оценки определяются по формулам

$$\delta_{\text{сн}} = \frac{C_{\text{на}} - C_{\text{н}\Sigma}}{C_{\text{на}}} = 1 - \frac{C_{\text{н}\Sigma}}{C_{\text{на}}};$$

$$\delta_{\text{сн}} = 10\delta_s \sqrt{\frac{n+1}{n^2} + \sqrt{\sum_{i=0}^n \delta_i^2 + \delta_u^2}}, \quad (7)$$

где  $\delta_i$  — нестабильность мер термостатированного магазина в течение измерений;  $\delta_u$  — погрешность, обусловленная зависимостью емкости меры  $C_0$  от приложенного напряжения в диапазоне измерения.

Для определения нелинейности коэффициента деления основного делителя на низкоомных пределах используется термостатированный делитель сопротивления, состоя-

щий из опорной меры сопротивления  $R_{10}$  и десяти последовательно соединенных эталонных мер, равных  $0,1R_{10}$ . Методика определения погрешности от нелинейности в этом случае та же, что и в предыдущем случае, поэтому уравнения (7) можно использовать для расчетов погрешностей при соответствующей замене  $C$  на  $R$ .

**Погрешности коэффициента деления  $m_{1k}/m_2$  вспомогательного делителя АТ-моста.** Чтобы определить погрешность коэффициента деления  $\delta_k$  вспомогательного делителя АТ-моста (отношения  $m_{1k}/m_2$ ) проводится квадратурная передача вида  $R \rightarrow C$ . Рассматриваемая погрешность состоит из аддитивной  $\delta_{\text{ка}}$  и мультипликативной  $\delta_{\text{км}}$  составляющих.

В случае аддитивной составляющей измеряют начальное сопротивление компаратора. С этой целью к компаратору подключают меру сопротивления 10 кОм в плечо  $m_2$  и меру нулевого сопротивления в плечо  $m_1$ , и измеряют начальное сопротивление компаратора  $\Delta Z_{\text{н}}$  с приведенной случайной погрешностью  $\delta_s$ . Приведенную аддитивную погрешность  $\delta_{\text{ка}}$  и погрешность  $\Delta\delta_{\text{ка}}$  ее оценки находят по формулам:

$$\delta_{\text{ка}} = \Delta Z_{\text{н}} / Z_2; \quad \Delta\delta_{\text{ка}} = \delta_s.$$

Для определения составляющей погрешности  $\delta_{\text{км}}$  первоначально проводят передачу компаратором размера сопротивления от первичного эталона сопротивления к эталону 10 кОм и передачу компаратором размера емкости от первичного эталона емкости к эталонам 100 и 200 нФ. Затем АТ-мостом проводят передачу  $R \rightarrow C$  от эталона сопротивления 10 кОм, включаемого в плечо  $m_2$  компаратора, к эталонам емкости 100 и 200 нФ, включаемым по очереди в плечо  $m_1$ .

Погрешность отношения  $m_{1k}/m_2$  вычисляют по формуле

$$\delta_{\text{км}} = (C_{\text{и}} - C_{\text{д}}) / C_{\text{д}},$$

где  $C_{\text{и}}, C_{\text{д}}$  — измеренное и действительное значения емкости эталонов.

Поскольку допусковое значение погрешности  $\delta_{\text{км}} > \delta_c$  эту погрешность не разделяют на отдельные составляющие, а определяют последовательно в двух точках диапазона измерения: 100 и 200 нФ. Это примерно соответствует середине и концу диапазона измерения емкости по второму параметру при выбранном значении меры сопротивления в плече  $m_2$ .

Погрешность  $\Delta\delta_{\text{км}}$  находят как

$$\Delta\delta_{\text{км}} = \sqrt{\delta_C^2 + \delta_R^2 + (\delta_a \delta Z)^2 + 2\delta_s^2},$$

где  $\delta_C, \delta_R$  — погрешности аттестации эталонных мер  $C$  и  $R$ .

Действительные значения емкости и сопротивления используемых мер можно измерить любым другим способом. В качестве погрешности отношения  $m_{1k}/m_2$  используют наибольшую из двух, полученных для точек 100 и 200 нФ.

**Погрешности сравнения импедансов квадратурным мостом.** Для сравнения импедансов мер, находящихся в квадратуре, используют два высокостабильных источника квадратурных напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . Сравнимые меры подключают к названным источникам и измеряют сигналы не-

равновесия образованного таким образом моста. Использование четырехзажимного подключения сравниваемых мер исключает влияние соединительных проводов. Специальный алгоритм, описанный в [1], позволяет устранить воздействие основных источников погрешности на результат измерения.

Уравнение измерения квадратурного моста в идеальном случае имеет вид

$$Z_1/Z_2 = \pm j + \delta Z_q,$$

где  $\delta Z_q$  — относительное отклонение отношения импедансов  $Z_1/Z_2$  сравниваемых эталонов от номинального отношения  $\pm j$  (неравновесие квадратурного моста).

В квадратурном компараторе величину  $\delta Z_q$  определяют на основе обработки сигналов неравновесия (подробнее см. в [1]) по приближенному уравнению

$$\delta Z_q \approx j \frac{\delta_v}{2} \left[ \frac{\dot{U}_4 - \dot{U}_3 + (1+j)\dot{U}_1}{\dot{U}_2 - \dot{U}_1} \right],$$

где  $\delta_v$  — детерминированная вариация напряжения одного из плеч моста;  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3, \dot{U}_4$  — напряжения сигнала неравновесия моста.

С учетом влияния возможных источников погрешности уравнение измерения квадратурного моста преобразуется к виду

$$Z_1/Z_2 = \pm j (1 + \delta_{qm}) + \delta Z_q (1 + \delta_{qa}) + \delta_{qs},$$

где  $\delta_{qm}, \delta_{qa}$  — мультипликативные погрешности измерения соответственно отношения импедансов  $Z_1/Z_2$  и неравновесия  $\delta Z_q$  моста;  $\delta_{qs}$  — случайная составляющая погрешности измерения квадратурным мостом.

Погрешность измерения неравновесия моста  $\delta Z_q$  ( $|\delta Z_q| \leq 0,05$  % при произвольной фазе) зависит от погрешности вариации  $\delta_v$  и погрешности векторного вольтметра (в квадратурном и АТ-мостах используется один и тот же векторный вольтметр). Для определения этой погрешности применяют метод комплектной поверки.

Квадратурный мост построен таким образом, что он позволяет измерять отношение импедансов в окрестности точек 1 или  $\pm j$ . При этом как конфигурация моста, так и алгоритм измерения не меняются, изменяются лишь амплитуды и фазы векторов сигналов неравновесия, что позволяет находить погрешность  $\delta_{qm}$  методом перестановок.

Погрешность  $\delta_{qs}$  зависит от уровня шума на входе векторного вольтметра. Эта погрешность больше соответствующей погрешности в АТ-мосте, что обусловлено повышенным уровнем шумов измерительной цепи. Ее находят, как обычно, на основе совокупности измерений квадратурным мостом.

*Погрешности измерения неравновесия квадратурного моста.* Методика предусматривает определение погрешности  $\delta_{qa}$  при равноимпедансном сравнении двух эталонов сопротивления —  $\delta_{qa(R-R)}$ , а также емкости и сопротивления —  $\delta_{qa(C-R)}$ .

Для определения величины  $\delta_{qa(R-R)}$  в плечи  $U_1$  и  $U_2$  моста включают два равноимпедансных эталона сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$  и, измеряя их отношение, получают величину  $Z_1^1$ .

Затем последовательно с эталоном сопротивления  $Z_1$  включают дополнительную меру сопротивления  $Z_v$  и находят величину  $Z_1^2$ . Погрешности  $\delta_{qa(R-R)}$  и  $\Delta \delta_{qa(R-R)}$  вычисляют по формулам:

$$\delta_{qa(R-R)} = 1 - (Z_1^2 - Z_1^1)/Z_v;$$

$$\Delta \delta_{qa(R-R)} = \sqrt{\delta Z_1^2 + \delta Z_2^2 + \delta Z_v + 2\delta_{qs}^2}, \quad (8)$$

где  $\delta Z_v$  — погрешность аттестации дополнительной меры сопротивления  $Z_v$ .

Для определения погрешности  $\delta_{qa(C-R)}$  в плечо  $U_2$  квадратурного моста вместо меры сопротивления включают меру емкости, такую, что  $|Z_R| \approx |Z_C|$ . После этого повторяют описанную выше процедуру измерений. Погрешности  $\delta_{qa(C-R)}$  и  $\Delta \delta_{qa(C-R)}$  определяют, как и ранее, по формулам (8).

*Мультипликативная погрешность  $\delta_{cm}$  смещения нуля квадратурного компаратора.* Для ее оценки используют метод перестановок на переменном токе в процессе сравнения мер сопротивления ( $\delta_{cmR/R}$ ) и мер сопротивления и емкости ( $\delta_{cmR/C}$ ). При этом выполняют следующие действия.

1. К компаратору подключают две меры сопротивления с суммарным отклонением от номинального значения, не превышающим 0,05 %. Проводят передачу  $Z_1 \rightarrow Z_2$ , а затем перестановку мер из одного плеча компаратора в другое и вновь передачу  $Z_1 \rightarrow Z_2$ . Мультипликативную погрешность  $\delta_{cmR/R}$  компаратора и погрешность ее оценки находят по уравнениям (5), (6).

2. В качестве  $Z_1$  применяют меру емкости, равноимпедансную мере сопротивления, используемой в качестве  $Z_2$ . Проводят передачу  $C \rightarrow R$  и находят импеданс меры  $Z_2$ . Переставляют меры из одного плеча компаратора в другое и вновь проводят передачу  $C \rightarrow R$ . Мультипликативную погрешность  $\delta_{cmC/R}$  компаратора и погрешность ее оценки также вычисляют по (5), (6). Рассмотренные мультипликативные погрешности компаратора определяют в децимальных точках импеданса 1; 10 и 100 кОм.

**Общая погрешность передачи компаратором.** Общую погрешность сравнения импедансов в конкретной точке получают по известному способу сложения найденных выше составляющих.

В табл. 1—3 приведены результаты экспериментальных исследований погрешности компаратора при измерении параметров импеданса на разных диапазонах.

Передачу размеров между разнородными величинами обычно проводят путем сравнения импедансов с равными модулями. На частоте 1,59 кГц равные модули могут иметь меры децимального значения. Именно поэтому такие классические передачи выполняются на указанной частоте.

При передаче размеров между разнородными величинами на частоте 1 кГц получить равенство модулей в децимальных точках принципиально невозможно. Это привело к появлению в разных странах разных цепочек передачи размера между разнородными величинами. С учетом особенностей передачи размера рассматриваемым компаратором в настоящей статье приняты следующие отличия от классических систем такой передачи:

Таблица 1

Погрешность измерения активного сопротивления

Диапазон	$R_2$ , Ом	$R_1$ , Ом	$\delta_{cmi} \cdot 10^6$	$\delta_{chni} \cdot 10^6$	$\delta_{ki} \cdot 10^6$	$\delta_{ai}$	$\delta_{si} \cdot 10^6$	$\delta_{Ri} \cdot 10^6$
1	1	0,1 — 1	3	20	50	$10^{-3}$	0,5	3 — 20
2	10	1 — 10	2	3	30	$5 \cdot 10^{-4}$	0,2	2 — 4
3	100	10 — 100	1	1	20	$2 \cdot 10^{-4}$	0,01	1 — 1,5
4	1000	100 — 1000	0,5	1	20	$10^{-4}$	0,01	0,5 — 1,2
5	$10^3 — 10^4$	1000	0,5	1	20	$10^{-4}$	0,01	0,5 — 1,2
6	$10^4 — 10^5$	10000	0,5	1	20	$2 \cdot 10^{-4}$	0,03	0,5 — 1,2
7	$10^5 — 10^6$	$10^5$	1	2	30	$3 \cdot 10^{-4}$	0,2	0,5 — 1,2
8	$10^6 — 10^7$	$10^6$	5	5	50	$5 \cdot 10^{-4}$	0,2	5 — 8

Таблица 2

Погрешность измерения емкости

Диапазон	$C_2$ , мкФ	$C_1$ , мкФ	$\delta_{cmi} \cdot 10^6$	$\delta_{chni} \cdot 10^6$	$\delta_{ki} \cdot 10^6$	$\delta_{ai}$	$\delta_{si} \cdot 10^6$	$\delta_{Ci} \cdot 10^6$
1	100	100 — 1000	10	150	100	$10^{-3}$	1	15 — 150
2	10	10 — 100	5	15	50	$5 \cdot 10^{-4}$	0,5	5 — 17
3	1	1,0 — 10	1	5	20	$2 \cdot 10^{-4}$	0,1	1 — 5
4	0,1	0,1 — 1	1	2	20	$10^{-4}$	0,05	1 — 2,5
5	$(10 — 100) \cdot 10^{-3}$	$100 \cdot 10^{-3}$	0,5	1	20	$10^{-4}$	0,01	1 — 1,5
6	$(1 — 10) \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	0,5	1	20	$2 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,5 — 1,2
7	$(0,1 — 1) \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,5	1	30	$3 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,5 — 1,2
8	$(10 — 100) \cdot 10^{-6}$	$100 \cdot 10^{-6}$	0,5	1	50	$5 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,5 — 1,2
9	$(1 — 10) \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	5	5	100	$10^{-3}$	0,1	5 — 8

Таблица 3

Погрешность измерения индуктивности

Диапазон	$L_2$ , Гн	$L_1$ , Гн	$\delta_{cmi} \cdot 10^6$	$\delta_{chni} \cdot 10^6$	$\delta_{ki} \cdot 10^6$	$\delta_{ai}$	$\delta_{si} \cdot 10^6$	$\delta_{Li} \cdot 10^6$
1	$100 \cdot 10^{-6}$	$(100 — 10) \cdot 10^{-6}$	30	150	100	$10^{-3}$	5	30 — 155
2	$1 \cdot 10^{-3}$	$(1,1 — 1) \cdot 10^{-3}$	10	20	50	$5 \cdot 10^{-4}$	1	10 — 23
3	$10 \cdot 10^{-3}$	$(1 — 10) \cdot 10^{-6}$	10	15	20	$2 \cdot 10^{-4}$	0,1	10 — 17
4	$100 \cdot 10^{-3}$	$(10 — 100) \cdot 10^{-6}$	10	15	20	$10^{-4}$	0,1	10 — 17
5	0,1 — 1	0,1	10	15	20	$10^{-4}$	0,1	10 — 17
6	1 — 10	1	10	20	20	$2 \cdot 10^{-4}$	0,5	10 — 23
7	10 — 100	10	20	50	30	$3 \cdot 10^{-4}$	5	20 — 52
8	100 — $10^3$	100	20	200	50	$5 \cdot 10^{-4}$	20	20 — 200

Примечание:  $\delta_{Ri}$ ,  $\delta_{Ci}$ ,  $\delta_{Li}$  — погрешности измерения отношения параметров  $R$ ,  $C$ ,  $L$  от 1:1 до 1: 0,1 на  $i$ -м диапазоне;

$$\delta_{Zi} = \sqrt{\delta_{cmi}^2 + (0,1\delta_{chni} Z_2/Z_1)^2 + (\delta_{ki} \operatorname{tg}\delta\varphi)^2 + (\delta Z\delta_{ai})^2 + 2\delta_{si}^2}.$$

во всех передачах размеров между разнородными величинами на частоте 1,59 кГц используются эталоны с децимальным значением параметров;

во всех передачах размеров между разнородными величинами на частоте 1 кГц используются промежуточные эталоны, для которых отношение импеданса к импедансу в

децимальной точке равно 0,4:1, что обеспечивает максимальную точность этой передачи.

Точки передачи на частоте 1 кГц

$R — C$ : 400 Ом — 0,4 мкФ; 4 кОм — 0,04 мкФ; 40 кОм — 4 нФ;  
 $C — L$ : 2,5 нФ — 1 Гн; 25 нФ — 100 мГн; 250 нФ — 10 мГн.

Точки передачи на частоте 1,59 кГц

$R - C$ : 1 кОм — 0,1 мкФ; 10 кОм — 0,01 мкФ; 100 кОм — 1 нФ;

$C - L$ : 1 нФ — 1 Гн; 10 нФ — 100 мГн; 100 нФ — 10 мГн.

Погрешность  $R - C$ -передачи менее  $1 \cdot 10^{-6}$ ; погрешность  $C - L$ -передачи менее  $10 \cdot 10^{-6}$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. Сурду М. Н. и др. Автоматическая прецизионная система для метрологического обеспечения измерений параметров импеданса. Ч. 1. Принципы действия // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 51—57.

2. Богданов Г. П. и др. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники. М.: Радио и связь, 1990.

3. ГОСТ 8.216—88. ГСИ. Трансформаторы напряжения: Методика поверки.

4. Grohmann K., Zapf T. L. An International Comparison of Inductive Voltage Divider Calibration Methods Between 10 kHz and 100 kHz // Metrologia. 1979. V. 15. N 2. P. 69—70.

5. Waltrip B. C., Koffman A. D., Avramov-Zamurovic S. The design and self-calibration of inductive voltage dividers for an automated impedance scaling bridge // Proc. Instrum. and Measur. Technol. Conf. Anchorage (AK), 2002. V. 2. P. 1191—1195.

6. Toshiaki Aoki, Katsumi Yokoi. Calibration of a Ratio Transformer // Proc. NCSL Workshop & Symp. Dallas (USA), 1995. P. 701—704.

7. Nakamura Yasuhiro. Calibration and uncertainty estimation of a two-staged inductive voltage divider // AIST Bull. Metrology. 2005. V. 4. N 1. P. 45—52.

8. Tarach D., Trenkler G. Calibration of inductive voltage dividers at extremely low frequencies // Metrologia. 1995. V. 32. P. 367—370.

9. Grohmann K. Error Determination of Inductive Voltage Dividers with Nondecade Ratio Settings // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 1980. V. 29. N 4. P. 496—500.

10. Kibble B. P., Rayner G. H. Coaxial AC Bridges. Bristol: Adam Hilger Ltd., 1984.

11. Трансформаторные измерительные мосты // Под ред. К. Б. Карандеева. М.: Энергия, 1970.

Дата принятия 07.11.2011 г.

620.179.14

## Измерения толщины и удельной электрической проводимости немагнитных пластин вихретоковым методом

В. А. САНДОВСКИЙ

Институт физики металлов РАН, Екатеринбург, Россия, e-mail: mar19@e-sky.ru

Выполнены исследования, показывающие, что при использовании адекватной математической модели путем решения соответствующих электродинамических уравнений, включающих результаты экспериментальных измерений вихретоковым методом, можно отдельно определять толщину и удельную электрическую проводимость немагнитных материалов и образцов в форме пластин, лент и фольг.

**Ключевые слова:** удельная электрическая проводимость, толщина, фольга, вихретоковый преобразователь, математическая модель.

The studies were carried out showing that at using of the adequate mathematical model by means of solution of appropriate electrodynamic equations including the results of experimental measurements by eddy current method the separate determination of thickness and conductivity of nonmagnetic materials and of specimens of plates, tapes and foils types is possible.

**Key words:** conductivity, thickness, foil, eddy current converter, mathematical model.

Вихретоковые преобразователи [1] широко используются в технике, в производственных и лабораторных условиях для измерений и контроля деталей и материалов. В случае если контролируемые образцы достаточно тонкие, измеряемый вихретоковым преобразователем сигнал зависит не только от свойств материала образца, но также и от его толщины. Были поставлены задачи — измерять удельную электрическую проводимость пластин независимо от их толщины и, наоборот, измерять толщину пластин независимо от удельной электрической проводимости материала. Для этой цели исследована возможность применения расчетов по соответствующей математической модели совместно с экспе-

риментальными измерениями с использованием вихретокового трансформаторного преобразователя накладного типа [1].

**Описание математической модели.** Для расчетов вихретоковый преобразователь рассматривается в виде математической модели, состоящей из двух concentрических витков, расположенных над немагнитной пластиной толщиной  $d$  (рис. 1). Внешний виток радиусом  $R$  является токовым, внутренний виток радиусом  $r$  — измерительным. Расстояния до каждого из витков от поверхности пластины равны соответственно  $h_1$  и  $h_2$ .