

УДК 389.14

С.Н. Шевкун,
М.Н. Сурду, д-р техн. наук,
М.В. Добролюбова, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ СРАВНЕНИЯ ИМПЕДАНСОВ В ВАРИАЦИОННЫХ МОСТАХ–КОМПАРАТОРАХ

Посвящена актуальному вопросу метрологии – повышению точности прецизионных компараторов для оценки отношения импедансов. Произведен анализ погрешности измерения неравновесия универсального компаратора, а также оценено влияние основных дестабилизирующих факторов при измерении отношения двух импедансов, что позволяет обеспечить высокие метрологические характеристики компараторов при их конструктивной простоте и невысокой стоимости.

Ключевые слова: точность, вариационные мосты-компараторы.

S.N. Shevkun,
M.N. Surdu, ScD.,
M.V. Dobroliubova, PhD.

FEATURES OF ERROR ESTIMATION FOR THE COMPARISON OF IMPEDANCES IN AUTOMATIC QUADRATURE BRIDGES

The article concerns a very important problem in metrology – the increase of precision of automatic quadrature bridge for the assessment of inductivity unit. It was carried out the analysis of measurement error for imbalance universal automatic quadrature bridge and estimated impact of the major destabilizing factors in the measurement of the ratio of two impedances, all of these permits to get high accuracy, simple design and low-cost devices.

Keywords: precision, automatic quadrature bridge.s

С.М. Шевкун,
М.М. Сурду, д-р техн. наук,
М.В. Добролюбова, канд. техн. наук

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ ПОХИБКИ ПОРІВНЯННЯ ІМПЕДАНСІВ У ВАРІАЦІЙНИХ МОСТАХ-КОМПАРАТОРАХ

Присвячено актуальному питанню метрології – підвищенню точності прецизійних компараторів для оцінки відношення імпедансів. Проведено аналіз похибки вимірювання нерівноваги універсального компаратора, а також оцінено вплив основних дестабілізуючих факторів при вимірюванні відношення двох імпедансів, що дозволяє забезпечити високі метрологічні характеристики компараторів за їх конструктивною простотою і невисокою вартістю.

Ключові слова: точність, варіаційні мости-компаратори.

В настоящее время основным инструментом для измерения отношения двух эталонных импедансов являются трансформаторные или автотрансформаторные мосты (компараторы) переменного тока [1].

При точных измерениях в состав таких мостов входят, по меньшей мере, два индуктивных делителя и прецизионные фазовращатели. Эти делители представляют собой сложные многоразрядные цифровые устройства (с числом разрядов до 8-9), которые содержат значительное количество коммутирующих обмоток и соответствующее им количество коммутаторов.

В виду их высокой сложности такие делители часто выпускаются в виде отдельных (самостоятельных) устройств.

Существенное упрощение моста может быть достигнуто за счет уменьшения разрядности его индуктивных делителей. При этом для сохранения высокой точности измерения производится вариационное измерение неравновесия моста, т.е. расстояния между текущим состоянием моста и точкой его истинного равновесия. Такой подход использован при построении прецизионного компаратора, являющегося основой Государственного эталона единиц индуктивности и тангенса угла потерь в Украине [2, 3]. В основу определения неравновесия моста положено измерение сигналов неравновесия моста (напря-

© Шевкун С.Н., Сурду М.Н.,
Добролюбова М.В., 2012

жений или токов) и вычисление по определенному алгоритму неравновесия моста, выраженного в виде приращений импеданса, т.е. применены косвенные измерения.

В настоящей статье рассматривается анализ погрешностей измерения неравновесия моста.

Цель статьи – анализ погрешности измерения неравновесия универсального компаратора и оценка влияния основных дестабилизирующих факторов при измерении отношения двух импедансов.

Ниже рассматривается структурная схема и принцип уравнивания автотрансформаторного моста-компаратора, который позволяет проводить точные измерения параметров импедансов во всем широком диапазоне значений с применением двухконтурного уравнивания по двум параметрам и вариационным измерением неравновесия моста. Структурная схема моста-компаратора приведена на рис.1.

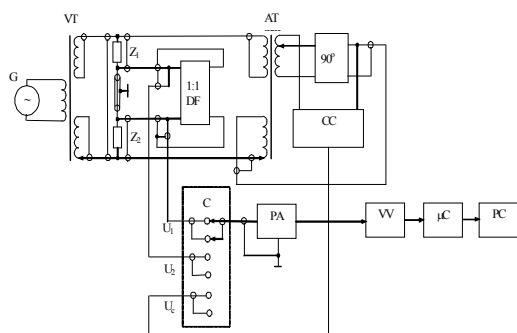


Рис.1. Структурная схема автотрансформаторного моста-компаратора

Мост содержит генератор напряжения G , который питает трансформатор напряжения VT . Трансформатор напряжения VT осуществляет гальваническую развязку генератора и измерительной цепи моста. Он имеет две последовательно соединенные выходные обмотки. Одна из этих обмоток имеет постоянное число витков, а другая – регулируемое число витков. Средняя точка этих обмоток выполняет роль «Земли Вагнера».

Сравниваемые эталоны Z_1 и Z_2 соединены последовательно и подключены к вторичным обмоткам трансформатора VT своими высокопотенциальными токовыми зажимами.

К высокопотенциальным потенциальным зажимам сравниваемых эталонов подключен автотрансформаторный делитель напряжения AT . Автотрансформаторный делитель напряжения AT имеет две первичные обмотки m_2 и m_{1c} , первая обмотка является нерегулируемой, а вторая – регулируемой. Регулируемые обмотки ТН и АТ подключены к смежным зажимам одного из сравниваемых эталонов и регулируются синхронно таким образом, что их число витков всегда равно.

Мост уравнивается по основному параметру (этим параметром, в зависимости от вида сравниваемых эталонов, может быть емкость, индуктивность или сопротивление) посредством регулировки числа витков m_{1c} обмоток АТ и ТН.

Для уравнивания моста по второму параметру используется намотанная на автотрансформатор вторичная регулируемая обмотка m_{1k} , к выходу которой подключен квадратурный фазовращатель. Выход фазовращателя соединен последовательно с регулируемой основной обмоткой автотрансформаторного моста. Фазовращатель калибруется при помощи калибровочной цепи CC по специальной процедуре. Для этого анализируется выходное напряжение калибровочной цепи U_c .

Здесь предложено новое решение, при котором достигаются две цели: в два раза уменьшаются число делителей напряжения и, по крайней мере, в два раза уменьшается число декад в делителе.

С этой целью падение напряжения на проводе, соединяющем сравниваемые импедансы, вводится при помощи дифференциального повторителя DF между основными обмотками основного делителя.

Для анализа состояния моста и получения точного результата измерения, не зависящего от размера Z_n , и погрешности DF , измеряют два напряжения неравновесия U_1 , и U_2 , между низковольтными выводами обмоток автотрансформаторного моста и соответствующими потенциальными выводами сравниваемых эталонов.

Напряжения неравновесия U_1, U_2 усиливаются предварительным избирательным усилителем РА. Их ортогональные составляющие измеряются векторным вольтметром VV. Микроконтроллер μC передает результаты измерения в персональный компьютер РС, который на основе анализа этих напряжений через интерфейс и микроконтроллер μC управляет всем процессом измерения и калибровки.

Автотрансформаторный мост работает в не полностью уравновешенном режиме (мост уравновешивается лишь по четырем декадам). Основой процесса его уравновешивания и измерения является вариация сигнала неравновесия посредством вариации Δm_v отношения числа витков плечевой обмотки m_1 и измерения соответствующего сигнала неравновесия U_{2v} . Затем решается система уравнений, которая описывает измеренные напряжения U_1, U_2, U_{2v} . На основании рассматриваемой процедуры находят расстояние от текущей точки моста до точки равновесия.

Система уравнений, описывающая выполняемую совокупность измерений при вариации в плече m_1 и одновременно измерения напряжения U_{2v} ,

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= U_o \left[1 - \frac{Z_n}{Z_c} (1 + \delta) \right] \frac{m_1}{m_1 + m_2} - U_o \frac{Z_1}{Z_c}; \\ \dot{U}_2 &= -U_o \left[1 - \frac{Z_n}{Z_c} (1 + \delta) \right] \frac{m_2}{m_1 + m_2} + U_o \frac{Z_2}{Z_c}; \\ \dot{U}_{2v} &= U_o \left[1 - \frac{Z_n}{Z_c} (1 + \delta) \right] \times \\ &\times \frac{m_2}{m_1 + m_2 + \Delta m_v} - U_o \frac{Z_2}{Z_c}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Z_c = Z_1 + Z_2 + Z_n$, δ – погрешность коэффициента передачи дифференциального повторителя DF, U_o – напряжение генератора, Z_n – импеданс соединительного кабеля.

Решив приведенную систему уравнений, получим соответствующие выражения, определяющие расстояние от текущего состояния моста до точки истинного равновесия, выраженное в витках или в относительных

отклонениях отношения измеряемых импедансов $\delta Z = \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2} = \frac{m_1}{m_2}$

$$\delta Z = -\frac{1}{2} \left(\frac{m_1 + m_2}{m_2} \right) \frac{\dot{C} + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \dot{D}}{1 + (\dot{C} + \dot{D}) \delta_v} \delta_v, \quad (2)$$

где $\dot{C} = \frac{\dot{U}_2 + \dot{U}_1}{\dot{U}_{2v} - \dot{U}_2}; \quad \dot{D} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_{2v} - \dot{U}_2};$
 $\delta_v = \frac{\delta m}{1 + \delta m}; \quad \delta m_v = \frac{\Delta m_v}{m_1 + m_2}.$

Погрешность определения координат точки равновесия по полученному выражению определяется чувствительностью ΔU_s и нелинейностью векторного вольтметра ΔU_{xy} на участке xu его функции преобразования.

Проанализируем выражение (1) для вычисления расстояния от текущего состояния моста до точки истинного равновесия. С этой целью рассмотрим выражения \dot{C} и \dot{D} с учетом составляющих погрешностей векторного вольтметра VV.

С учетом этих погрешностей выражения принимают вид:

$$\begin{aligned} \dot{C} &= \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_{2v} - \dot{U}_2} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1 + \Delta \dot{U}_{21} + \sqrt{2} \Delta \dot{U}_s}{\dot{U}_{2v} - \dot{U}_2 + \Delta \dot{U}_{22} + \sqrt{2} \Delta \dot{U}_s} \approx \\ &\approx \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_{2v} - \dot{U}_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta \dot{U}_{22}}{\Delta \dot{U}_v} + \sqrt{2} \frac{\Delta \dot{U}_s}{\Delta \dot{U}_v}} + \frac{\Delta \dot{U}_{21}}{\Delta \dot{U}_v} + \\ &+ \sqrt{2} \frac{\Delta \dot{U}_s}{\Delta \dot{U}_v}; \\ \dot{C} &= \dot{C}_n \left(1 - \frac{\Delta \dot{U}_{22}}{\Delta \dot{U}_v} + \sqrt{2} \frac{\Delta \dot{U}_s}{\Delta \dot{U}_v} \right) + \frac{\Delta \dot{U}_{21}}{\Delta \dot{U}_v} + \\ &+ \sqrt{2} \frac{\Delta \dot{U}_s}{\Delta \dot{U}_v}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta \dot{U}_{21}$ – погрешность от нелинейности вольтметра на участке измерения $U_2 - U_1$;

$\Delta \dot{U}_{22}$ – погрешность от нелинейности вольтметра на участке измерения $U_{2v} - U_2$;

$\Delta \dot{U}_s$ – порог чувствительности векторного вольтметра;

\dot{C}_n – номинальное значение величины C ;

$$\delta\dot{C}_n = \frac{\Delta\dot{U}_{22} + \sqrt{2}\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v} - \text{мультипликативная составляющая погрешности измерения неравновесия моста};$$

$\frac{\Delta\dot{U}_{22}}{\Delta\dot{U}_v}$ – детерминированная составляющая мультипликативной погрешности;

$$\sqrt{2} \frac{\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v} - \text{случайная составляющая мультипликативной погрешности};$$

$\Delta\dot{C}_a = \frac{\Delta\dot{U}_{21} + \sqrt{2}\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v}$ – аддитивная составляющая погрешности измерения неравновесия моста;

$$\frac{\Delta\dot{U}_{21}}{\Delta\dot{U}_v} - \text{ее детерминированная составляющая};$$

$\sqrt{2} \frac{\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v}$ – ее случайная составляющая.

$$\text{Аналогичным образом рассмотрим теперь величину } \dot{D}$$

$$\dot{D} = \frac{\dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_2 + \dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_1 + \sqrt{2}\Delta\dot{U}_s}{\dot{U}_{2v} - \dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_{2v} - \Delta\dot{U}_2 + \sqrt{2}\Delta\dot{U}_s} =$$

$$= \frac{\dot{U}_2 + \dot{U}_1}{\Delta\dot{U}_v} \left(\frac{\Delta\dot{U}_{21} + \sqrt{2}\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v} + 1 \right) +$$

$$+ \frac{\Delta\dot{U}_{21} + \sqrt{2}\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \delta\dot{D}_n &\approx \frac{\Delta\dot{U}_{22} + \sqrt{2}\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v}; \\ \Delta\dot{D}_a &= \frac{\Delta\dot{U}_{21} + \sqrt{2}\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v}. \end{aligned} \quad (5)$$

В окрестности точки равновесия величина δ_v много меньше единицы. Поэтому выражение (2) может быть упрощено. Подставив в упрощенное выражение (2) величины (3),(4),(5) получим:

$$\begin{aligned} \delta\dot{Z} &\approx \frac{1}{2} \frac{m_1 + m_2}{m_2} \left(\dot{C}_n (1 + \delta\dot{C}_n) + \Delta\dot{C}_a + \right. \\ &+ \left. \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \left[\dot{D}_n (1 + \delta\dot{D}_n) + \Delta\dot{D}_a \right] \right) \delta_v = \\ &= \frac{1}{2} \frac{m_1 + m_2}{m_2} \left[\left(\dot{C}_n + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \dot{D}_n \right) + \dot{C}_n \delta\dot{C}_n + \right. \\ &+ \left. \Delta\dot{C}_a + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} (\dot{D}_n \cdot \delta\dot{D}_n + \Delta\dot{D}_a) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Если нелинейность векторного вольтметра мала, выражение (6) можно привести к такому виду:

$$\begin{aligned} \delta\dot{Z} &= \frac{1}{2} \frac{m_1 + m_2}{m_2} \left[\left(\dot{C}_n + \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \dot{D}_n \right) + \right. \\ &+ \left. \sqrt{2} \frac{\Delta\dot{U}_s}{\Delta\dot{U}_v} \sqrt{\left(1 + \dot{C}_n \right)^2 + \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot (1 + \dot{D}_n) \right)^2} \right]. \end{aligned}$$

Анализ последнего выражения показывает следующее:

- при малых значениях неравновесия моста основной вклад в погрешность измерения вносит случайная составляющая погрешности измерения векторного вольтметра, коэффициент ее накопления при этом не превышает $\sqrt{2}$;

- с ростом неравновесия моста растет и погрешность измерения за счет роста погрешности подкоренного выражения. При этом в случае сравнения равных ипедансов, когда $m_1 = m_2$, этот рост не превышает $\left[\sqrt{(1 + \dot{C}_n)^2} \right]$;

- при неравных сравниваемых импедансах случайная погрешность измерения растет быстрее и, в определенной степени, пропорциональна этому неравенству;

- в случае, когда нелинейностью функции преобразования векторного вольтметра пренебречь нельзя, появляются мультипликативная составляющая измерения неравновесия моста и смещение его нуля.

Приведенные выше выражения описывают комплексные значения составляющих погрешности измерения. Для оценки погрешности измерения составляющих комплексного сопротивления необходимо и дос-

таточно в соответствующие выражения для погрешности ввести комплексные значения соответствующих величин. Полученные при этом формулы здесь не приводятся ввиду их громоздкости.

Расчет погрешности измерения по приведенным формулам и экспериментальные исследования компаратора позволили оценить его погрешность измерения, вызванную несовершенством векторного вольтметра.

Выводы

В результате анализа погрешности измерения неравновесия универсального моста (компаратора) δ_a установлены основные влияющие на погрешность факторы:

- 1) нелинейность векторного вольтметра;
- 2) случайная составляющая погрешности векторного вольтметра.

Накопление погрешности измерения, вызванное этими факторами, относительно невелико и не превышает $1,5 \div 2$.

Оценка влияния основных дестабилизирующих факторов при измерении отношения двух импедансов позволяет обеспечить высокие метрологические характеристики компараторов при их конструктивной простоте и невысокой стоимости.

Список использованной литературы

1. Kibble B. P. Coaxial AC Bridges / B.P. Kibble, G.H. Rayner. – Bristol: Adam Hilger Ltd., 1984. – 203 p.

2. Прецизионный компаратор для воспроизведения единицы индуктивности и передачи её размера в диапазоне значений / М. Н. Сурду, А. А-Б. Ахмадов, С. А. Ахмадов, С. В. Курсин, А. Л. Ламеко, М. Я. Мухаровский // Український метрологічний журнал. – 2008. – № 4. – С. 14-22.

3. Величко О. Н. Оценка неопределенности результатов калибровки рабочих эталонов индуктивности на Государственном первичном эталоне единиц индуктивности и тангенса угла потерь / О. Н. Величко, М. Н. Сурду, С. Н. Шевкун // Системи обробки інформації. – 2011. – № 1 (91). – С. 131-134.

Получено 25.05.2012

References

1. Kibble B. P. Coaxial AC Bridges / B. P. Kibble, G. H. Rayner – Bristol: Adam Hilger Ltd., 1984. – 203 p. [in English].

2. Automatic quadrature bridge for the reproduction and transfer of the inductivity unit in the range of values / M. M. Surdu, A. A-B. Akhmadov, S. A. Akhmadov, S. V.Kursin, A. L. Lameko, M. Ya. Mukharovskii // Український метрологічний журнал. – 2008. – № 4. – С. 14–22 [in Russian].

3. Velychko O. M. The evaluation of the uncertainty of calibration results of working inductance standards at the national primary inductance and loss tangent standard / O. M. Velychko, M. M. Surdu, S. M. Shevkun // Системи обробки інформації. – 2011. - № 1 (91). – С. 131 – 134 [in Russian].



Шевкун
Сергей Николаевич,
нач. отдела ГП Всеукраинского гос. научно-произв. центра стандартизации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей. Тел: (044) 526–55–68,
e-mail:
shevkun@ukrcsm.kiev.ua



Сурду Михаил Николаевич,
д.т.н., проф., зам. директора НИИ прецизионных измерений ГП Всеукраин. гос. научно-произв. центра стандартизации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей. Тел: (044) 526–55–68,
e-mail: msurdu@nbi.com.ua.



Добролюбова
Марина Валериевна, к.т.н.,
ст. преп. каф. автоматизации экспериментальных исследований Нац. техн. университета Украины “КПИ”.
Тел: (044) 406–82–20,
e-mail: st-marina@yandex.ru.