

УДК 621.317

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИМПЕДАНСА В ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ МОСТАХ С ВАРИАЦИОННЫМ УРАВНОВЕШИВАНИЕМ

А.А.Михаль, канд.техн.наук, **Д.В.Мелешук**, канд.техн.наук, **А.А.Душко**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
e-mail: a_mikhail@ukr.net

Рассмотрен комбинированный метод измерения импеданса, который реализуется в устройствах с мостовой измерительной цепью. Указанный метод основан на использовании реакции измерительной цепи на вариацию сигнала неравновесия. Он предназначен для уравнивания измерительной цепи и последующего уточнения результата измерения по остаточному сигналу. Приведен алгоритм применения вариационного метода уравнивания для двухпараметрового трансформаторного измерительного моста. Показана возможность увеличения разрешающей способности измерительного устройства с ограниченной дискретностью индуктивного делителя. Рассмотрены особенности вариационного метода оценки неравновесия усовершенствованного термометрического моста с дополнительным контуром регулирования. Исследована погрешность, возникающая при использовании упрощенных выражений для определения параметров неравновесия предложенной измерительной цепи. Библ. 7, рис. 3.

Ключевые слова: измерение, мост, уравнивание, вариационный метод, погрешность.

Для обеспечения единства измерения температуры согласно международной температурной шкалы МТШ–90 в диапазоне 13–1200 К применяются высокоточные средства измерения сопротивления. Их метрологические характеристики напрямую определяют погрешность воспроизведения единицы основной физической величины температуры – градуса Кельвина. В ведущих метрологических лабораториях и поверочных центрах для этих целей используются термометрические мосты с 6–8-ю декадами отсчета таких известных фирм как ASL, MI, Guildline, Hart Scientific и др. Как правило, измерительные цепи таких мостов представляют собой уравновешенные структуры с трансформаторными делителями напряжения с тесной индуктивной связью. Приборы подобного рода являются сложными и дорогими устройствами, имеют низкое быстродействие и неудовлетворительные весогабаритные характеристики. С появлением дешевых малогабаритных, с большим количеством разрядов АЦП появилась возможность разрабатывать на их основе детекторы равновесия. В связи с этим широкое применение получили экстраполяционные методы уравнивания с использованием вариации для оценки сигнала неравновесия [1]. Это позволило существенно (в несколько раз) снизить время уравнивания. Метод вариационного уравнивания начали применять в различных приборах для измерения электрических и неэлектрических величин с помощью импедансных датчиков более 20 лет назад. Например, он лежит в основе принципов построения эталона импеданса, прецизионного измерения температуры, измерения тангенса угла потерь в датчиках качества бумаги [1–3, 7].

Оценка параметров неравновесия с помощью вариации в мостовых цепях позволяет реализовывать комбинированный метод измерения импеданса [6], содержащий два этапа: уравнивание цепи и уточнение результата измерения по остаточному сигналу неравновесия. Однако особенности построения измерительных цепей термометрических мостов приводят к тому, что точность известных алгоритмов [2, 3, 7] существенно снижается. Это вызывает рост числа итераций уравнивания и погрешности моста в целом. *Цель статьи* заключается в оценке погрешности вычисления сигнала неравновесия в известном алгоритме и создании нового, более точного алгоритма.

Рассмотрим упрощенную принципиальную схему измерительной цепи трансформаторного моста (рис. 1). Она позволяет обеспечить прямой отсчет по двухэлементной последовательной схеме замещения с индуктивным характером реактивности. На схеме обозначены: Γ – генератор напряжения (U_{Γ}) рабочей частоты; T_1 – трансформатор напряжения с тесной индуктивной связью между обмотками

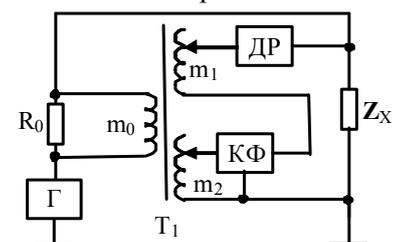


Рис. 1

© Михаль А.А., Мелешук Д.В., Душко А.А., 2013

(выполняет роль делителя напряжения); R_0 – образцовая мера сопротивления; $Z_X = R_X + j\omega L_X$ – объект измерения; ДР – детектор равновесия (здесь и далее по тексту жирным шрифтом выделены обозначения комплексных величин). Для уравнивания по реактивной составляющей в схему включен квадратурный фазовращатель (КФ) с коэффициентом передачи напряжения jQ . Нормированными регулируемыми параметрами измерительной цепи являются отношения чисел витков обмоток трансформатора T_1 ($p = m_1/m_0$ и $q = m_2/m_0$).

В соответствии с классификацией измерительных цепей трансформаторных мостов, приведенной в [5], данная цепь относится к схемам сравнения напряжений, имеет нормальную структуру, при этом измеряются два нормальных параметра. Благодаря этому цепь имеет принципиально линейную зависимость составляющих сигнала неравновесия от измеряемых параметров импеданса. Это является одним из необходимых условий упрощения вычислительных процедур при использовании комбинированного метода.

При подключении питающего напряжения в цепи $\Gamma - R_0 - Z_X$ (рис. 1) протекает рабочий ток $i = U_{\Gamma}/(R_0 + Z_X)$. На детекторе равновесия выделяется напряжение неравновесия

$$U_H = iR_0(p + jqQ - Z_X/R_0). \quad (1)$$

В исходном состоянии регулируемые параметры цепи содержат по две составляющие: $p_p = m_{1p}/m_0$, $q_p = m_{2p}/m_0$ – равновесные составляющие и $\Delta p = \Delta m_1/m_0$, $\Delta q = \Delta m_2/m_0$ – составляющие неравновесия. Обозначим через P величину, определяющую неравновесие цепи,

$$P = p + jqQ - Z_X/R_0 = \Delta p + j\Delta qQ. \quad (2)$$

В состоянии равновесия цепи (при $U_H = 0$) имеем

$$p_p = p - \Delta p = R_X/R_0, \quad q_p = q - \Delta q = \omega L_X/(R_0Q). \quad (3)$$

Согласно рассматриваемому комбинированному методу измерения на первом этапе осуществляется уравнивание моста вариационным методом. Для этого проводится измерение исходного сигнала неравновесия U_{H1} (синфазной U_{C1} и квадратурной U_{K1} составляющих относительно напряжения генератора). После вариации регулируемого параметра, например, определяющего активную часть импеданса (изменения его на величину вариации $K_B = p_{B1} = m_{1B1}/m_0$), измеряются составляющие полученного сигнала неравновесия U_{H2} (синфазная U_{C2} и квадратурная U_{K2}). Измеренные напряжения определяются выражениями

$$U_{H1} = iR_0P_1; \quad U_{H2} = iR_0(P_1 + p_{B1}). \quad (4)$$

Из (4) находится выражение для величины P_1

$$P_1 = p_{B1} \frac{U_{H1}}{U_{H2} - U_{H1}} = p_{B1} F_1(U_H). \quad (5)$$

Значение величины $F(U_H)$ вычисляется по результатам измерений составляющих двух сигналов неравновесия

$$F(U_H) = \frac{U_{C1}(U_{C1} - U_{C2}) + U_{K1}(U_{K1} - U_{K2})}{(U_{C1} - U_{C2})^2 + (U_{K1} - U_{K2})^2} + j \frac{U_{C1}U_{K2} - U_{K1}U_{C2}}{(U_{C1} - U_{C2})^2 + (U_{K1} - U_{K2})^2} = A + jB. \quad (6)$$

Согласно выражениям (2), (5) после вычисления значения $F_1(U_H) = A_1 + jB_1$ определяются составляющие регулируемых параметров

$$\Delta p_1 = A_1 p_{B1}, \quad \Delta q_1 = B_1 p_{B1}/Q. \quad (7)$$

По окончании первого этапа измерения цепь принудительно приводится в состояние, близкое к равновесию, путем установки равновесных значений регулируемых параметров цепи (3).

Второй этап заключается в усилении остаточного сигнала и повторном определении параметров неравновесия аналогично первому этапу. В результате будем иметь следующие выражения:

$$P_2 = p_p + jq_pQ - Z_X/R_0 = \Delta p_2 + j\Delta q_2Q, \quad F_2(U_H) = A_2 + jB_2, \quad \Delta p_2 = A_2 p_{B2}, \quad \Delta q_2 = B_2 p_{B2}/Q. \quad (8)$$

По завершению второго этапа вычисляются значения параметров объекта измерения согласно выражениям

$$R_X = R_0(p - \Delta p_1 - \Delta p_2) = R_0(p - A_1 p_{B1} - A_2 p_{B2}), \quad (9)$$

$$L_X = R_0Q(q - \Delta q_1 - \Delta q_2)/\omega = R_0(qQ - B_1 p_{B1} - B_2 p_{B2})/\omega. \quad (10)$$

Таким образом, появляется возможность использовать в измерительной цепи делитель напряжения с ограниченной дискретностью (число разрядов делителя существенно меньше числа разрядов результата измерения).

В термометрических мостах объектом измерения является термометр сопротивления с активным сопротивлением в качестве информативного параметра. Реактивный параметр (в силу конструктивных особенностей термометра) имеет индуктивный характер. В области положительных температур на частотах меньше 200 Гц прецизионные платиновые термометры имеют тангенс фазового угла, не превышающий 10^{-4} [4]. Очевидно, чтобы не уравнивать измерительную цепь по второй (реактивной) составляющей, весовой коэффициент младшего разряда делителя напряжения по основному параметру должен быть больше, нежели тангенс фазового угла. Т.о., тангенс фазового угла может выступать в качестве меры сложности индуктивного делителя напряжения в мостах с комбинированным методом измерения.

В созданном нами термометрическом мосте СА300 [2] была использована усовершенствованная измерительная цепь (рис. 2). Трансформатор напряжения T_1 выполнен по схеме автотрансформатора, где коэффициент трансформации является нормированным регулируемым параметром цепи $p=m_1/m_0$. Повторитель напряжения (ПН) позволяет уменьшить шунтирование образцовой меры R_0 первичной обмоткой m_0 . В измерительную цепь включен дополнительный трансформатор T_2 с одинаковым числом витков во вторичных обмотках (коэффициенты трансформации $m_{31}/m_2=m_{32}/m_2=K_2$). Он необходим для получения напряжения в точке A (рис. 2), близкого к нулю (в состоянии равновесия), что приведет к снижению влияния шунтирующих эффектов и уменьшению требований к погрешности повторителя ПН.

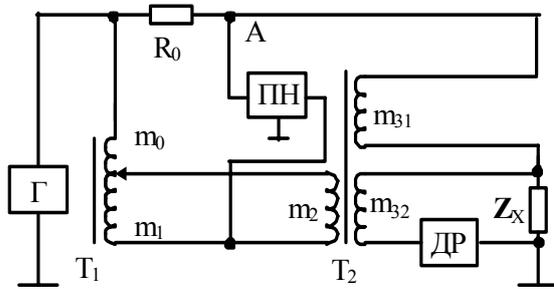


Рис. 2

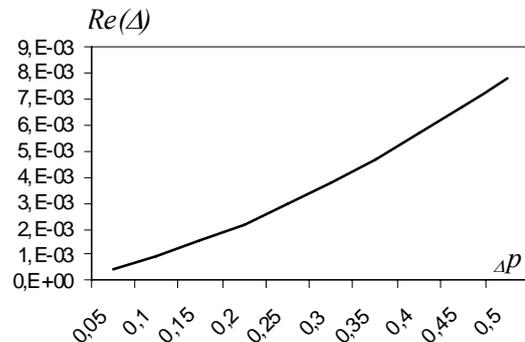


Рис. 3

Наряду с полезными свойствами схема на рис. 2 имеет недостаток – при проведении вариации ток в цепи мера/объект изменяется. Это приводит к усложнению определения составляющих регулируемых параметров цепи вариационным методом. Рассмотрим данную ситуацию более подробно.

Выражение для напряжения неравновесия данной цепи имеет следующий вид:

$$U_H = U_\Gamma \frac{R_0 p K_2 - Z_X}{R_0 + Z_X - p K_2 R_0} = U_\Gamma \frac{p K_2 - Z_X / R_0}{1 - (p K_2 - Z_X / R_0)}. \quad (11)$$

Аналогично вышеизложенному анализу определим величину P при некотором состоянии индуктивного делителя T_1 (коэффициент трансформации p)

$$P = \Delta p K_2 + j \Delta q K_2 = p K_2 - Z_X / R_0. \quad (12)$$

В выражении (12) присутствует квадратурная составляющая Δq , поскольку объект измерения имеет комплексный характер.

Уравнения для напряжений неравновесия до и после вариации

$$U_{H1} = U_\Gamma \frac{P}{1 - P}; \quad U_{H2} = U_\Gamma \frac{P + p_B K_2}{1 - (P + p_B K_2)}, \quad (13)$$

откуда

$$F(U_H) p_B K_2 = P(1 - P - p_B K_2). \quad (14)$$

Решая уравнения, полученные после выделения вещественной и мнимой частей из (14), получим выражения для составляющих величины P

$$\Delta p = \frac{(1 - p_B K_2) \pm \sqrt{(1 - p_B K_2)^2 - 4(A p_B K_2 - \Delta q^2 K_2^2)}}{2K_2}; \quad \Delta q = \frac{B p_B}{1 - 2\Delta p K_2 - p_B K_2}. \quad (15)$$

Как видно из формулы (14), вычисление P существенно усложняется наличием квадратичной зависимости. В результате искомые величины $\Delta p, \Delta q$ будут взаимозависимыми (15). Используя известный алгоритм уравнений (3)–(5), можно получить упрощенную формулу для схемы на рис. 2

$$P_1 = p_B K_2 F(U_H). \quad (16)$$

Однако при ее использовании возникает аддитивная погрешность Δ , определяемая выражением

$$\Delta = P - P_1 = P(P + p_B K_2) = \Delta p K_2^2 (\Delta p + p_B) - \Delta q^2 K_2^2 + j \Delta q K_2^2 (2\Delta p + p_B). \quad (17)$$

Оценим данную погрешность для разработанного моста СА300, в котором используется двенадцатирядный индуктивный делитель напряжения и понижающий трансформатор с $K_2=0,125$. Поскольку в рассматриваемой цепи производится уравнивание только по активной составляющей, произведем оценку вещественной части погрешности. График зависимости погрешности $\text{Re}(\Delta)$ от величины Δp ($\Delta q = 10^{-4}$) показан на рис. 3 (вариация $p_B=0,5$).

Как следует из графика, максимальная погрешность вычисления составляющей неравновесия достигает 0,8 %. Тем самым ограничивается точность уточнения результата на втором этапе измерения. Кроме того, наличие рассмотренной погрешности приводит к необходимости нескольких итераций при уравнивании цепи и в итоге к снижению быстродействия. Для исключения указанных недостатков необходимо для вычисления параметров неравновесия пользоваться точным выражением (15).

Выводы. Применение комбинированного метода измерения сопротивления термопреобразователей в трансформаторных мостах с вариационным уравниванием позволяет уменьшить дискретность делителя напряжения при сохранении высокой разрешающей способности измерительного устройства. В высокоточных термометрических мостах это упрощение делителя напряжения совместно с наличием априорной информации о тангенсе фазового угла термометра сопротивления дает возможность ограничиться уравниванием измерительной цепи только по информативному параметру (активной составляющей импеданса термометра).

Особенности построения функциональной или структурной схемы измерительной цепи термометрических мостов не всегда позволяют получить выражения для вычисления параметров неравновесия в виде линейных функций. Использование упрощенных выражений приводит к заметным погрешностям. Модель вычисления параметров неравновесия, рассмотренная в данной статье, дает возможность исключить эту погрешность.

При использовании АЦП и трансформаторного делителя напряжения с организацией 12-бит общая погрешность измерения в термометрических мостах с комбинированным методом может быть снижена до 0,1 ppm. Это позволит проводить измерения температуры с точностью, отвечающей современным требованиям.

1. *Гриневиц Ф.Б., Сурду М.Н.* Высокоточные вариационные измерительные системы переменного тока. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.

2. *Гриневиц Ф.Б., Сурду М.Н., Михаль А.А., Швец Т.В., Кромпляс Б.А., Мелещук Д.В.* Прецизионный мост переменного тока для работы в диапазоне частот 125–925 Гц // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки».* – 2000. – Ч. 3. – С. 76–78.

3. *Мельник В.Г., Швец Т.В.* Автоматический низкочастотный высоковольтный измеритель тангенса угла потерь диэлектриков // *Технічна електродинаміка.* – 1997. – № 4. – С. 63–66.

4. *Михаль А.А., Сурду М.Н., Походун А.И., Мелещук Д.В.* Особенности измерения параметров термометров сопротивления в диапазоне частот // *Труды III Международной научно-технической конференции "Метрологія та вимірювальна техніка".* – Харьков: Національний науковий центр «Інститут метрології». – 2002. – С. 240–243.

5. *Новик А.И.* Системы автоматического уравнивания цифровых экстремальных мостов переменного тока. – Киев: Наук. думка, 1983. – 224 с.

6. *Орнатский П.П.* Теоретические основы информационно-измерительной техники. – Киев: Вища школа, 1976. – 432 с.

7. *Третьяк И.В.* Вариационные методы коррекции погрешностей трансформаторных мостов переменного тока: Автореферат дис. канд.техн.наук / НАН Украины, Ин-т электродинамики. – К., 1991. – 18 с.

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ІМПЕДАНСУ В ТЕРМОМЕТРИЧНИХ МОСТАХ З ВАРІАЦІЙНИМ ВРІВНОВАЖЕННЯМ

О.О.Міхаль, канд.техн.наук, **Д.В.Мелешчук**, канд.техн.наук, **А.А.Душко**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.
e-mail: a_mikhal@ukr.net

Розглянуто комбінований метод вимірювання імпедансу, який реалізується в пристроях з мостовим вимірювальним ланцюгом. Вказаний метод засновано на використанні реакції вимірювального ланцюга на варіацію сигналу нерівноваги. Він призначений для врівноваження вимірювального ланцюга та подальшого уточнення результату вимірювання за залишковим сигналом. Наведено алгоритм застосування варіаційного методу врівноваження для двопараметрового трансформаторного вимірювального моста. Показана можливість збільшення роздільної спроможності варіаційного методу оцінки нерівноваги вдосконаленого термометричного моста з додатковим контуром регулювання. Досліджено похибку, що виникає при використанні спрощених виразів для визначення параметрів нерівноваги запропонованого вимірювального ланцюга. Бібл. 7, рис. 3.

Ключові слова: вимірювання, міст, врівноваження, варіаційний метод, похибка.

COMBINED METHOD OF IMPEDANCE MEASURING IN THERMOMETRIC BRIDGES WITH VARIATION BALANCING

A.A.Mikhal, D.V.Meleshchuk, A.A. Dushko
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.
e-mail: a_mikhal@ukr.net

Combined method of impedance measuring, realized in devices with bridge measuring chain, is investigated. The above method is based on measuring chain reaction on the variation of the signal imbalance. It is designed to balance the measurement circuit and the subsequent refinement of the measurement result on the residual signal. Algorithm for application of variation method of balancing for two-parameter transformer measuring bridge is given. Possibility for increase of resolution of measuring device with limited discreteness of inductive divider is demonstrated. Peculiarities of variation method for assessment of imbalance of improved thermometric bridge with additional control loop are examined. Error, arising during use of simplified expressions for definition of proposed measuring chain imbalance parameters, is investigated. References 7, figures 3.

Key words: measurement, bridge, balancing, variation method, error.

1. Grinevich F.B., Surdu M.N. High-precision variation measuring systems of alternating current. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 192 p. (Rus)
2. Grinevich F.B., Surdu M.N., Mikhal A.A., Shvets T.V., Kromplias B.A., Meleshchuk D.V. Precision bridge of alternating current for operation in 125–925 Hz frequency range // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. – 2000. – №3. – Pp. 76–78. (Rus)
3. Melnik V.G., Shvets T.V. Automatic low-frequency high-voltage measurer of dielectrics losses tangent // Tekhnichna Elektrodynamika. – 1997. – №4. – Pp. 63–66. (Rus)
4. Mikhal A.A., Surdu M.N., Pokhodun A.I., Meleshchuk D.V. Peculiarities of parameters measuring for resistance thermometers in frequency range // Trudy III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii “Metrolohiia ta vymiriuvalna tekhnika”. – Kharkov: Natsionalnyi naukovyi tsentr “Instytut metrologii”. – 2002. – Pp. 240–243. (Rus)
5. Novik A.I. Systems of automatic balancing of digital extreme bridges of alternating current. – Kiev: Naukova dumka, 1983. – 224 p. (Rus)
6. Ornatskii P.P. Theory for information-measuring technique. – Kiev: Vyshcha shkola, 1976. – 432 p. (Rus)
7. Tretiak I.V. Variation methods of correction of alternating current transformer bridge errors: Abstract of a thesis of cand. of techn. sciences / NAS of Ukraine, Institute of Electrodynamics. – Kiev, 1991. – 18 p. (Rus)

Надійшла 23.10.2012
Received 23.10.2012