

## Метод половинных сечений для контроля погрешности линейности прецизионных термометрических мостов

*Рассмотрен новый метод контроля погрешности линейности трансформаторных мостов переменного тока на уровне  $10^{-7}$  без использования эталонов высокой точности. Предложено его аппаратное обеспечение.*

*Розглянуто новий метод контролю похибки лінійності трансформаторних мостів змінного струму на рівні  $10^{-7}$  без використання еталонів високої точності. Запропоновано його апаратне забезпечення.*

Прецизионные мосты переменного тока широко применяют в метрологии высшего звена, конкретно в измерительных системах для решения задач воспроизведения, хранения и передачи как электрических физических величин (сопротивления, емкости, индуктивности), так и неэлектрических (температура). Так, в термометрии мосты переменного тока являются одной из неотъемлемых составляющих аппаратного обеспечения температурной шкалы МТШ-90 в диапазоне (13—1200) К. Очевидно, их метрологические характеристики напрямую определяют погрешность воспроизведения единицы основной физической величины температуры — градуса Кельвина (К). В самом алгоритме МТШ-90 заложена методическая погрешность порядка (0,1—0,13) мК. Эта норма требует применения измерителей сопротивления с относительной погрешностью менее  $4 \cdot 10^{-7}$ . В соответствии с действующими нормативными документами (ГОСТ 8.294 и ГОСТ 25242) для определения столь малой погрешности необходима многозначная мера сопротивления с собственной погрешностью не более 0,1 ppm. Однако, реально такое условие не выполнимо, т.к. значительно превышает возможности эталона сопротивления переменному току и государственной поверочной схемы. Поэтому обеспечение контроля основных метрологических характеристик прецизионных средств измерений при отсутствии набора мер необходимой точности является одной из важнейших и приоритетных задач в области практической метрологии.

В работах [1,2] (согласно ГОСТ 8.009) рассмотрены особенности применения комплекса нормируемых метрологических характеристик в прецизионных термометрических мостах. Установлено, что одной из основных составляющих их систематической погрешности является погрешность линейности. Подтверждение этих соображений — спецификации зарубежных термометрических мостов, в которых основной (и часто единственной) метро-

логической характеристикой есть нелинейность. Здесь и далее имеется в виду интегральная нелинейность.

**Анализ известного метода.** Предложенный в [2] метод контроля нелинейности является более эффективным, доступным и апробированным, чем другие, например, метод, описанный в [4]. Он основан на свойстве аддитивности линейной функции  $f(x_1) + f(x_2) = f(x_1 + x_2)$  и для его реализации используется переходная цепочка, описанная в [3]. Цепочка содержит  $n$  последовательно включенных, равноточечных эталонных мер сопротивления с отводами в точках соединения для токовых и потенциальных зажимов моста. Конфигурация токовых и потенциальных зажимов цепочки позволяет измерять отдельно каждый из включенных в цепочку резисторов или отдельно сопротивление, равное сумме последовательно включенных резисторов цепочки. Разница между алгебраической суммой сопротивлений, значения которых лежат на луче  $OC$  (идеализированной базовой прямой), и измеренным суммарным сопротивлением цепочки, значения которого лежат на дуге  $ON_{p\max}N$ , характеризует нелинейность.

Этому методу, однако, также свойственны определенные недостатки. Как следует из рис. 1, значения погрешности, найденные таким образом, будут отражаться областью  $\xi$  и, следовательно, будут нарастать к концу диапазона измерения. По отношению к другой базовой прямой, например, отрезку  $ON_{\max}$ , который соединяет начало и конец дуги (область  $\eta$ ), этот метод будет давать завышенное значение погрешности, что является одним из главных и существенных его недостатков.

Следующий недостаток обусловлен тем, что метод базируется на измерении  $n$  равноточечных мер сопротивления (как правило,  $n=10$ ). Измерение каждого отдельного сопротивления  $N_{pi}$  осуществляется в начале диапазона, где полезный сигнал в  $n$  раз меньше максимального. В итоге соответственно уменьшается отношение сигнал/по-

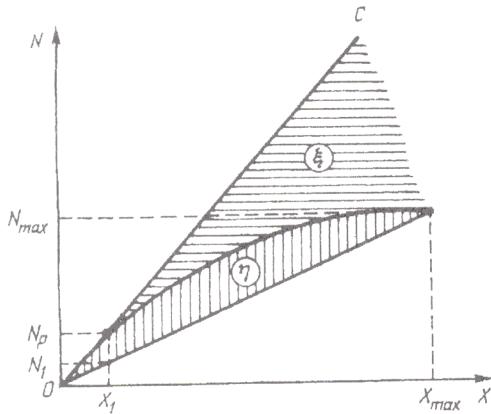


Рис. 1

меха, ухудшается чувствительность и увеличивается погрешность самого метода. Действительно, если среднее квадратичное отклонение (СКО) каждого  $N_{pi}$  измерения известно и равно  $\sigma_{1p}$ , то эту методическую погрешность как частный случай косвенных измерений можно определить по формуле

$$\sigma = \left( \sum_{i=1}^n \sigma_{1i}^2 \right)^{0.5} \approx \sigma_{11} \sqrt{n},$$

где  $\sigma_{11}$  — СКО результатов измерения первого резистора цепочки  $N_p$ .

Используемые в цепочке равноточные резисторы подогнаны с погрешностью, меньшей 0,01%. Поэтому все результаты измерений укладываются в небольшой области вокруг точки  $X_1 N_p$ , показанной на рис. 1. Отсюда, погрешности  $\sigma_{1i}$  практически одинаковы и, следовательно, справедливо приближенное выражение.

Обратимся к технической реализации известного метода. Измерение отдельно каждого сопротивления цепочки возможно в двух вариантах. Первый не предусматривает коммутацию токовых зажимов и связан с прохождением рабочего тока через все резисторы цепочки одновременно. В этом случае возникает существенная (до 1000,0 %) синфазная составляющая, приложенная к потенциальным входам. Соответственно для 7-декадного поверяемого средства коэффициент подавления синфазной помехи на переменном токе должен превышать 160 dB, что реализовать практически крайне сложно. Второй вариант предусматривает переключение токовых и потенциальных выводов по синхронному алгоритму. Однако коммутация токовых выводов приводит к скачкообразному выделению тепла на измеряемых резисторах. Для учета этого эффекта необходимо время. Тогда при большом количестве резисторов в цепочке значительно возрастает общее время измерений, требования к стабильности резисторов и точности поддержания температуры.

В настоящей работе предлагается новый метод, который лишен большинства этих недостатков. В

то же время необходимо отметить, что новый метод может использоваться для средств измерения, нелинейность которых представлена монотонной функцией, не имеющей перегибов. Именно такой вид интегральной нелинейности наблюдается в трансформаторных мостах с тесной индуктивной связью. Как правило, обусловлено это нагрузочной погрешностью индуктивных делителей, возникающей из-за каскадного соединения трансформаторов.

**Описание нового метода.** Представим, что передаточная характеристика средства измерения имеет вид кривой  $0f_1f_2f_3f_4f_m$ , рис. 2. Суть нового метода заключается в нахождении разницы между точками с соответствующими значениями координат на кривой и прямой, соединяющей начало и конец кривой. Как и известный метод [2], новый метод основан на свойстве аддитивности линейной функции. Он состоит в том, что подбирают пару мер сопротивления  $R_{11}$  и  $R_{12}$ , номинальные значение которых близки и соответствуют середине контролируемого диапазона, а их сумма соответствует концу диапазона  $R_{1C}$ . Далее производят измерение отдельно каждого сопротивления и их суммарного сопротивления. Разница между математическим суммированием и результатом измерения суммарного сопротивления будет характеризовать погрешность линейности в точке, относящейся к середине диапазона. Для оценки погрешности линейности в точке, относящейся к четверти диапазона измерения, необходимо подобрать две меры, номинальное значение которых соответствует  $1/4$  контролируемого диапазона  $R_{21}$  и  $R_{22}$ , а их сумма — половине диапазона  $R_{2C}$ . Затем сделать три измерения по приведенному выше алгоритму. Аналогичным образом подбирают меры  $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$  и  $R_{kC}$  и проводят измерения для оценки погрешности линейности в произвольной  $k$ -ой точке, относящейся к  $1/8$ ,  $1/16$  и т.д. диапазона измерения.

Для получения формул обработки результатов данного метода обратимся к рис. 2, на котором по оси абсцисс отложены действительные значения

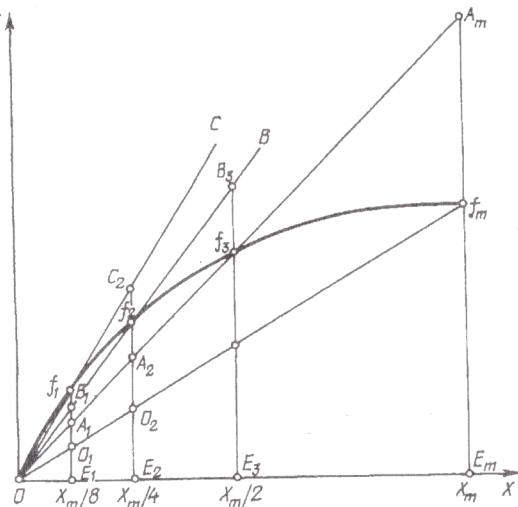


Рис. 2

сопротивления, а по оси ординат — результаты измерения. Имеем исходно нелинейную передаточную характеристику моста с соответствующими точками  $O, f_1, f_2 \dots f_m$ . Прямую, соединяющую начало и конец передаточной характеристики и проходящую через точки  $O, O_1, O_2 \dots f_m$ , будем считать базовой идеально линейной (без учета аддитивной и мультиплексной составляющих) передаточной характеристикой. Для упрощения рассмотрения геометрической интерпретации метода предположим, что для нахождения нелинейности в середине диапазона использованы две идентичные меры сопротивления. Тогда результаты измерения отдельных мер сопротивления  $R_{11}$  и  $R_{12}$  будут определяться ординатой точки  $f_3$ , а их физическая сумма  $R_{1C}$  — ординатой точки  $f_m$ . Из свойства аддитивности математическая сумма  $R_{11}$  и  $R_{12}$  будет находиться на одной прямой с прямой  $Of_3$  и будет определяться ординатой точки  $A_m$ . Из подобия треугольников  $OA_mf_m$  и  $Of_3O_3$  следует, что длина отрезка  $af_3O_3$ , численно равная нелинейности передаточной характеристики, в два раза меньше отрезка  $A_mf_m$ . Тогда в точке, соответствующей середине диапазона, значение погрешности линейности, приведенной к концу диапазона измерений  $R_{\max}$ , можно получить из следующего выражения:

$$\delta_1 = [R_{1C} - (R_{11} + R_{12})] / 2R_{\max}.$$

Погрешность линейности в точке, соответствующей четверти диапазона, численно равна отрезку  $f_2O_2$ , который, в свою очередь, состоит из двух отрезков  $f_2A_2$  и  $A_2O_2$ . Исходя из подобия соответствующих треугольников, эти отрезки равны соответственно половине отрезков  $B_3f_3$  и  $f_3O_3$ . Поскольку ордината точки  $f_2$  определяется сопротивлениями  $R_{21}$  ( $R_{22}$ ), а ордината точки  $B_3$  — их суммой, то несложно показать, что погрешность  $\delta_2$  должна вычисляться по формуле

$$\delta_2 = \frac{R_{2C} - (R_{21} + R_{22})}{2R_{\max}} + \frac{R_{1C} - (R_{11} + R_{12})}{4R_{\max}}.$$

Аналогичным приемом, при том, что ордината точки  $f_1$  определяется сопротивлениями  $R_{31}$  или  $R_{32}$ , а ордината точки  $C_2$  — их суммой, воспользуемся для вычисления погрешности в точке, соответствующей 1/8 диапазона измерения.

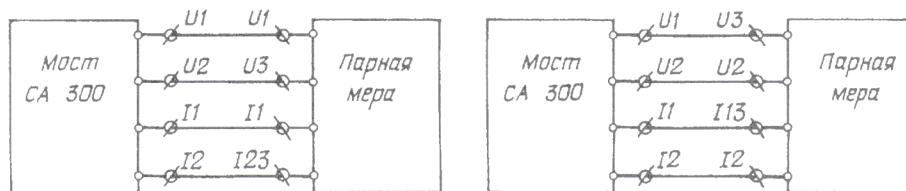


Рис. 4

$$\delta_3 = \frac{R_{3C} - (R_{31} + R_{32})}{2R_{\max}} + \frac{R_{2C} - (R_{21} + R_{22})}{4R_{\max}}.$$

В общем случае для  $k$ -той точки диапазона формула погрешности имеет вид

$$\delta_k = \frac{1}{R_{\max}} \sum_{i=1}^k \frac{R_{iC} - (R_{i1} + R_{i2})}{2^{k-i+1}}. \quad (1)$$

**Аппаратное обеспечение метода.** Для реализации метода необходим набор парных мер сопротивления. На практике достаточно трех мер, суммарное номинальное сопротивление которых соответствует началу, середине и концу диапазона измерения.

Конструктивно каждая парная мера состоит из двух четырехвыводных сопротивлений. Меры собраны по одной электрической схеме, (рис. 3), где  $R_{01}$  и  $R_{02}$  — действительные значения сопротивлений,  $r_{11} - r_{15}$  и  $r_{21} - r_{25}$  — сопротивления их выводов. Соответствующие (эквипотенциальные токовые и потенциальные) выводы подключают к зажимам  $I_1, I_2, U_1, U_2$ . Другие потенциальные выводы, условно обозначенные как  $U_{12}$  и  $U_{21}$ , замыкают перемычкой с общим сопротивлением  $r_1 + r_2$ . Приблизительно от середины этой перемычки делают отвод (сопротивление  $r_3$ ) и подключают его к зажиму  $U_3$ . Так же приблизительно от середины потенциальных выводов мер  $R_{01}$  и  $R_{02}$  делают отводы (сопротивления  $r_4$  и  $r_5$ ) и подключают их к соответствующим зажимам  $I_{13}$  и  $I_{23}$ . Тогда для реализации приведенного ранее алгоритма измерения отдельно первого  $R_{11}$  и второго  $R_{12}$  сопротивлений необходимо подключить парную меру к мосту согласно рис. 4. Очевидно, что в результат измерения войдут кроме действительного значения мер  $R_{01}$  и  $R_{02}$  также сопротивления подводящих проводов

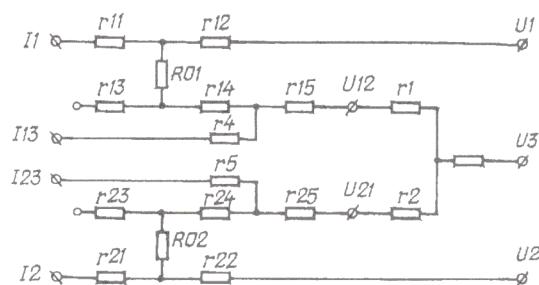


Рис. 3

$r_{14}, r_{15}, r_{24}, r_{25}$  и перемычки  $r_1, r_2$

$$R_{11} = R_{01} + r_{14} + r_{15} + r_1, \quad R_{12} = R_{02} + r_{24} + r_{25} + r_2.$$

Для измерения суммарного сопротивления парной меры необходимо использовать схему подключения на рис. 5. Суммарное сопротивление парной меры  $R_{1C}$  будет строго равно сумме отдельно первого  $R_{11}$  и второго  $R_{12}$  сопротивлений

$$R_{1C} = R_{01} + R_{02} + r_{14} + r_{15} + r_{24} + r_{25} + r_1 + r_2.$$

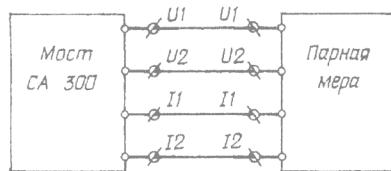


Рис. 5

Следует отметить, что точность физического суммирования сопротивлений в парной мере зависит от неизменности всех сопротивлений, входящих в последнее уравнение, и определяется некоторыми факторами.

Во-первых, неидеальностью (реальными физическими размерами) точки, объединяющей резисторы  $r_1 - r_3$ . Для того, чтобы сопротивления перемычки  $r_1$  и  $r_2$  были неизменны, необходимо постоянство напряженности поля в точке суммирования при проведении переключений согласно рис. 4 и рис. 5. Как следует из [3], выполнение следующего условия — длина перемычки  $r_1 + r_2$  должна быть больше ее диаметра, по меньшей мере, в 10 раз — со значительным запасом устраняет влияние этого фактора.

Во-вторых, временной нестабильностью мер сопротивления  $R_{01}$  и  $R_{02}$ . Одними из лучших в этом ряду следует признать меры сопротивления типа MP3000. По паспорту их годовая нестабильность составляет  $5 \cdot 10^{-6}$ . Наши исследования показывают, что их нестабильность в течении недели не превышает  $10^{-7}$ . Поэтому за время проведения методики (с учетом требуемых усреднений) временная нестабильность мер будет находиться за порогом чувствительности моста. В качестве альтернативы мерам MP3000 можно использовать резисторы фирм Vishay (S102C, VHP 4, VPR 247) или Powertron (UNR4-T220, USR4-3425).

В-третьих, температурной нестабильностью сопротивлений, входящих в результат измерений. Подводящие провода и перемычка представляют собой медный провод с температурным коэффициентом  $\alpha_r \approx 4 \cdot 10^{-3}$ . Из равенства температурных коэффициентов влияния сопротивления меры и перемычки следует выражение для предельного значения сопротивления перемычки

$r_1 + r_2 \leq R_{01} \cdot \alpha_R / \alpha_r$ . Например, для меры 10 Ом с температурным коэффициентом  $\alpha_R = 10^{-6}$  сопротивление перемычки не должно превышать 2,5 мОм. Для устранения влияния температурной нестабильности на практике достаточно поместить парную меру в пассивный воздушный термостат. Активный термостат с погрешностью поддержания температуры  $0,01^{\circ}\text{C}$  выводит влияние температурной нестабильности парной меры в целом также за пределы чувствительности моста.

Таким образом, несложно создать условия, при которых на интервале трех измерений чувствительность самого метода будет определяться только порогом чувствительности поверяемого моста. В качестве такого порога можно выбрать среднее квадратичное отклонение результатов измерения, величина которого определяется шумовой полосой. При этом методическая погрешность, приведенная к концу диапазона (при погрешности подгонки номинала мер MP3000 —  $5 \cdot 10^{-5}$ ), не будет превышать  $0,01\%$ .

**Заключение.** Испытания данного метода проводились на нескольких экземплярах термометрического моста CA300, имеющего следующие технические характеристики: контролируемый диапазон измерения ( $0,00001 - 124,99999$ ) Ом, приведенная к концу поддиапазона измерения цена деления единицы младшего разряда, — не более  $6,2 \cdot 10^{-8}$ , действующее значение тока через объект измерений — 1 мА, частота питающего тока — 125 Гц. Полученные в итоге испытаний значения погрешности линейности находились в пределах  $(0,5 - 2,1) \cdot 10^{-7}$ , при этом СКО результатов не превышала  $3 \cdot 10^{-8}$  в шумовой полосе 0,05 Гц. Экспериментальные значения погрешности практически совпали с расчетными значениями. Тем самым подтверждается возможность использования приведенного метода для контроля нелинейности мостов переменного тока на уровне 0,1 ppm и меньше.

1. Михаль А.А. Выбор нормируемых метрологических характеристик прецизионных термометрических мостов // "Метрологія та вимірювальна техніка" Тези доповідей 5-ї Міжн. наук.-техн. конф. "Метрологія 2006", Харків. — 2006. — Т1. — С. 265—267.

2. Михаль А.А., Семеновичева Л.Н., Сурду М.Н. Методика определения нелинейности прецизионных термометрических измерителей // Техн. електродинаміка. — 2008. — № 4. — С. 75—79.

3. Сурду М.Н., и др. Пути повышения точности передачи на постоянном токе размера единицы сопротивления // Техн. електродинаміка. — 1999. — № 6. — С. 73—75.

4. White D.R., Jones K., Williams J.M. and Ramsey I.E. A simple resistance network for calibrating resistance bridges. // IEEE Trans. Instrum. Meas. — 1997. — Vol.46. — №5. — Pp. 1068—1074.

Надійшла 18.02.2009