

Применение высокоомных мер электрического сопротивления в качестве групповых эталонов

И. А. Самодуров, А. В. Плошинский, И. А. Никандрова

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева

i.a.samodurov@vniim.ru

Аннотация. В статье рассматривается применение высокоомных прецизионных переходных мер электрического сопротивления в качестве группового эталона. В этом аспекте каждая мера анализируется, как потенциальный групповой эталон, состоящий из 10 равнономинальных значений сопротивления в диапазоне от 100 кОм до 1 ГОм. В статье показаны исследования временного дрейфа каждого резистора по отдельности и среднего значения группы, влияние неисключенных систематических погрешностей при передаче единицы. Основной акцент сделан на исследовательско-практическое применение переходных мер, как в обычной метрологической практике, так и ряде высокоточных измерений при передаче единицы от квантового сопротивления Холла в область ГОм.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, передача единицы, групповой эталон

I. ВВЕДЕНИЕ

В метрологической практике передача единицы электрического сопротивления от одного точно известного (или хранимого) значения другим, обычно десятикратным мерам сопротивления, осуществляется при помощи переходных мер электрического сопротивления (ПМЭС), представляющих собой набор равнономинальных резисторов.



Рис. 1. Внешний вид ПМЭС

Исследования, проведенные в 1950–60-х годах [1–3], показали, что если выполнить ряд определенных условий, то при переходе от последовательного соединения группы равнономинальных резисторов к параллельному можно достичь погрешности передачи отношения сопротивлений гораздо меньшей, чем погрешность подгонки значений резисторов друг к другу.

В настоящем докладе рассмотрено применение переходных мер в качестве вторичных групповых эталонов электрического сопротивления в высокоомной области измерений.

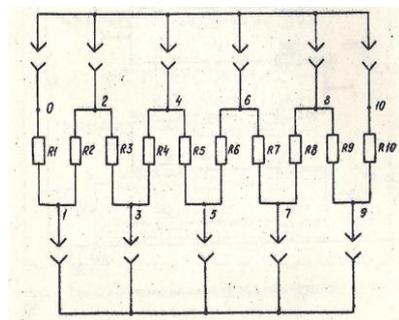


Рис. 2. Схема электрическая эквивалентная ПМЭС

II. ПЕРЕХОДНАЯ МЕРА КАК ГРУППОВОЙ ЭТАЛОН СОПРОТИВЛЕНИЯ

До 1991 года ПМЭС хранил единицу на номинальном значении 1 Ом при помощи группы прецизионных мер с номинальными значениями 1 Ом. При переходе воспроизведения единицы Ома посредством квантового эффекта Холла (КЭХ) и фундаментальных физических констант (ФФК) групповые эталоны, как воспроизведение единицы, утратил свою актуальность. Однако передача единицы от КЭХ ограничивается диапазоном от 1 Ом до 10 кОм. Дальнейшая передача единицы в диапазоне от 100 кОм до 1 ГОм несет в себе различного рода влияющие факторы, которые оцениваются некоторыми систематическими погрешностями, обусловленные процессом и схемой передачи.

Существующий в настоящее время во ВНИИМ метод хранения единицы в диапазоне сопротивления от 1 МОм до 1 ГОм происходит при помощи трех однозначных мер каждого из номиналов. Это обеспечивает «метрологический» треугольник при передаче, но не дает высокоточную стабильность получаемых действительных значений.

С целью повышения точности, достоверности и стабильности результатов измерений при метрологическом обеспечении при передаче единицы от квантового сопротивления Холла (КСХ) к однозначным мерам от 1 МОм до 1 ГОм, предложено применять прецизионные ПМЭС в качестве групповых эталонов. Это сделано по ряду причин:

- идентичность всех встроенных резистивных элементов повышает надежность хранения единицы электрического сопротивления в диапазоне от 1 МОм до 1 ГОм;
- по статистике все встроенные резисторы не могут дрейфовать одновременно в одну сторону. Вероятность такого изменения почти минимальна.

Поэтому существует компенсация временного дрейфа значений встроенных резисторов ПМЭС;

- совершенствование группы путем выявления брака и проведения диагностики встроенных резистивных элементов.

Наличие десяти равноминальных резисторов в составе переходной меры потенциально предопределяет возможность её использования в качестве группового эталона электрического сопротивления, хранящего промежуточное значение сопротивления между значениями при параллельном и последовательном включениях, входящих в эту меру высокостабильных резисторов.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате проведенных исследований при передаче единицы сопротивления от КСХ мерам сопротивления при помощи ПМЭС, были проведены работы по изучению и снижению влияния систематических погрешностей.

1. Снижена температурная составляющая встроенных резисторов в ПМЭС и самой меры в целом порядка 0,001 %. (при недопущении периодического извлечения меры из термостата) Это достигнуто путем постоянного хранения меры в воздушном термостате при температуре термостатирования ($20,000 \pm 0,005$) °C, а также за счет массивного металлического корпуса, увеличивающий общую теплоемкость конструкции меры, улучшающему внутреннему температурному полю по всей ПМЭС.
2. Анализ конструктивных особенностей мер показал, что воздействие электростатических помех не приводит к увлечению погрешности измерения выше допустимого значения. Конструкция мер представляет собой 10 равноминальных резисторов, помещенных в металлический корпус, который служит для защиты от электростатических помех. Для уменьшения влияния токов утечки на работу схемы, меры выполнены на одном изоляционном столбе, собранном из отдельных изоляторов, между которыми зажаты токопроводящие скобы, несущие на себе резистивные элементы. Каждая скоба связана только с резисторами одной ступени и двумя смежными изоляторами, таким образом, действительное значение каждого резистора включается параллельно сопротивлению соединенного с ним изолятора. Для повышения точности, изоляционный столб закреплен только одним концом на проводящем основании.
3. Выбор оптимального места расположения мер в термостате обеспечивает отсутствия влияния конвекционных потоков воздуха на увлечения температурной составляющей погрешности меры.
4. Дополнительное экранирование и проведение отдельной заземляющей линии ПМЭС позволяет свести влияние токов утечки к минимуму.
5. Для дополнительного снижения фактора влияния влажности окружающего воздуха её

значение поддерживается на постоянном уровне не превышающим 30 %.

6. Произведенный отбор кабелей с высоким сопротивлением изоляции исключает влияние дополнительной погрешности, вызванной шунтированием основного сопротивления меры.

Тщательный отбор при ежегодном исследовании и естественное старение встроенных резисторов, позволило отобрать ПМЭС, которые подогнаны с учетом компенсации друг друга при влиянии различных окружающих факторов (температурная составляющая, испытательное напряжение и т. д.).

Результаты исследований показали, что при расчете среднearифметического значения из 10 резисторов получается отклонение от номинального значения порядка (0,0008–0,01) %. Этот результат позволяет уравнивать компараторы сопротивлений, которые работают непосредственно при отношении 1:1.

Проведен ряд исследований по обеспечению точности уровня вторичных эталонов с применением ПМЭС. Исследована кратковременная нестабильность ПМЭС (от 0,00005 % до 0,0001 %); годовая нестабильность в течение 10 лет (от 0,0005 % до 0,0004 %).

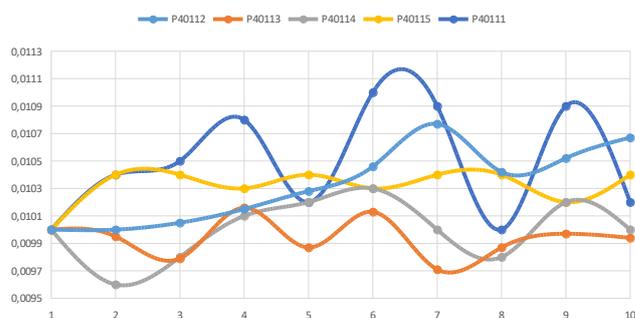


Рис. 3. Характер поведения временного дрейфа ПМЭС за 10 лет. По оси абсцисс – год (10 лет), по оси ординат – отклонения от номинального значения

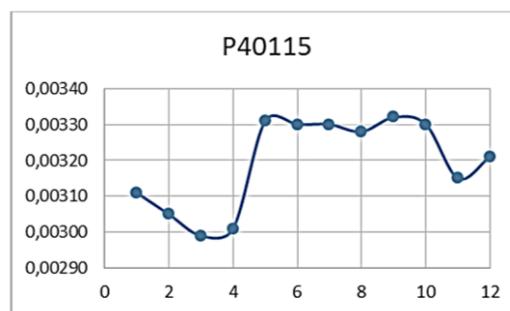


Рис. 4. Характер поведения временного дрейфа P40115 за 12 месяцев. По оси абсцисс – месяца, по оси ординат – отклонения от номинального значения

При проведении исследований, поверке или калибровке мер-имитаторов (например, типа P4085), необходимо определение действительных значений опорных сопротивлений 0,250 МОм, 2,5 МОм и 25 МОм. Ранее для определения действительных значений этих резисторов использовались 4 параллельно включенные ОМЭС (типа P4013, P4023, P4033) 1, 10 и 100 МОм соответственно. Несмотря на простоту этого метода

практическая реализация приводит к большим потерям из-за сложности коммутаций и подверженности влиянию внешних помех (электростатика, температура, токи утечки и т. д.). При расчете действительных значений 10, 100 и 100 ГОм погрешность превышала необходимую точность ВНИИМ и составляла порядка 0,1 %.

Встроенные резисторы ПМЭС, включенные в параллель по 4 резистора, в независимости от их расположения в мере, позволили оценить результаты Р4085 на несколько порядков точнее. Расчетная погрешность при определении действительного значения 10, 100 и 1000 ГОм составила 0,0008 %, относительная нестабильность за год лежит в пределах от 0,0003 % до 0,001 %.

Таким образом, высокоомные переходные меры осуществляют несколько важных функций при передаче единицы сопротивления с отношением 1:1 и 1:100 при переключении параллельного соединения резисторов на последовательное, хранение единицы сопротивления в качестве группового эталона и применение среднего значения группы резисторов переходной меры для аттестации резисторов высокоомных мер (на примере построенных на основе Т-цепей).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достижения современного высокоточного приборостроения, а также совершенствование технологических процессов в области изготовления прецизионных высокоомных резисторов позволяют создать на основе переходных мер вторичные групповые эталоны электрического сопротивления. Результаты предварительных исследований показывают, что переходные меры могут осуществлять несколько функций, в том числе стабильное хранение среднего значения высокоомного сопротивления из группы входящих в них резисторов.

Учитывая перечисленные факторы, сегодня проблема высокоточной передачи отношения сопротивлений в высокоомную область, при использовании ПМЭС, требует более детального изучения и должна быть сформулирована, как исследование возможности снижения погрешности отношения до уровня $1 \cdot 10^{-7}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] B. Hamon. A 100 Ohm Build-up Resistor for Calibration of Standard Resistors. *J.Sci.Instr.* vol 31, No 12, Dec. 1954, pp. 450-453.
- [2] C. Page. Errors in the Series-Parallel Buildup of Four-Terminal Resistors. *J.of Res. NBS*, vol 69-C. No 3, Sept. 1965, pp. 181-189.
- [3] J. Riley. The Accuracy of Series and Parallel Connections of Four-Terminal Resistors. *IEEE Trans.and Meas.* vol. IM-16. No 3, Sept 1967, pp. 258-268.
- [4] A. Ploshinsky, Yu. Tarbeev, I. Khakhamov. The Group Resistance Standards on the basis of the QHR at VNIIM. *CPEM-92*. Paris, France, 1992, Digest, pp. 292-293.
- [5] В. Заславский, А. Плошинский. Новое поколение мер электрического сопротивления // Тезисы докладов Международной Европейской научной конференции. 1992, С-Петербург, с. 53.
- [6] B. Litvinov, A. Ploshinsky, Yu. Semyenov. Development and Investigation Base and Transportable Resistance Standards. *Doc.CCE* 97-38.
- [7] B. Litvinov, A. Ploshinsky, Yu. Semyenov. New Group Resistance Standards. *CPEM-2000*. Sydney, Australia, 2000, Digest, p. 106.
- [8] P. Capra, F. Galliana. Hamon-Guarded 10x100 MΩ Network to Increase the Accuracy of the Transfer of the Resistance Unit up to 1 GΩ at INRIM. *IEEE Trans.and Meas.* vol. 58, No. 8, August 2009, pp. 2726-2729.
- [9] R. Honig Practical Aspects of High Resistance Measurements. *J.Cal-Lab*, 2010, Jan-Mar. pp. 19-25.
- [10] S. Rashai, M. Helmy, A. Raouf. Automated Hamon Transfer Standard for High Resistance Traceability in the Range from 100 MΩ to 10 GΩ. *J. of Sc.& Eng.Res.* vol 10, No 4, April-2019. pp. 114-119.