

Повышение точности высокоомных средств измерений с помощью переходных мер

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

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

I.a.samodurov@vniim.ru

Аннотация. В статье рассматривается исследование высокоомной прецизионной переходной меры электрического сопротивления с номинальным значением каждого из 10 резисторов 1 ГОм. Кроме передачи отношения и в качестве группового эталона, мера исследовалась для аттестации тераомметров и построения эталонов на основе Т-цепей в области номинальных значений свыше 1 ГОм.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, меры электрического сопротивления, T-цепи, тераомметр, групповой эталон, передача единицы

I. ВВЕДЕНИЕ

Передача единицы электрического сопротивления от Государственного первичного эталона ГЭТ 14-2014 на основе квантового сопротивления Холла в высокоомную область до 1 ГОм осуществляется путем реализации двух взаимосвязанных параллельных цепей передачи, состоящих из компараторов и набора переходных мер (рис. 1). Применение переходных мер, входящих в обе передающие цепи, в качестве высокоточных средств передачи, а также в качестве групповых высокоомных эталонов, рассмотрено в статье [1].

Переходные меры выпускаются предприятиями отечественного приборостроения с максимальным номинальным значением каждого из 10 составных резисторов 1 ГОм. Применяемыми в современной метрологической практике такими средствами измерения являются переходные меры Р4067 и Р40115.

Свыше 1 ГОм передача единицы обеспечивается масштабирующими тераомметрами и однозначными (или многозначными мерами), основанными на так называемых Т цепях.

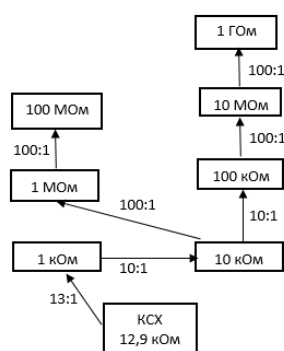


Рис. 1. Схема передачи единицы электрического сопротивления в высокоомную область до номинального значения мер 1 ГОм

В настоящей статье приведены результаты исследования по разработанной методике использования переходной меры P4067 с равнономинальными резисторами по 1 ГОм для аттестации тераомметра по

значению сопротивления 10 ГОм и последующем его масштабирующим применением для повышения точных измерений в высокоомной области.

В статье также рассмотрено применение этой меры для создания прецизионных эталонов на основе Т-цепей в области номинальных значений свыше 1 ТОм.

II. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ МЕР Р4067 И Р40115 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

Переходные меры Р4067 и Р40115 с номинальным значением входящих в них резисторов 1 ГОм, как конструктивно, так и по электрической схеме, существенно отличаются по выполнению.

Мера P4067 является двухопорной десятиступенчатой, каждая ступень которой состоит из последовательно соединенных микропроволочного и постоянного подгоночного резистора. Резисторы крепятся между двумя изоляционными опорами зигзагообразно. Кольцевые изоляторы, к которым подходят выводы резисторов соседних ступеней в опорах, выполнены из двух частей. Между этими частями изоляторов закреплены кольцевые металлические защитные электроды, электрически замкнутые с точкой соединения соседних резисторов, расположенной на соседней изоляционной опоре меры. Это позволяет снизить токи утечки и обеспечить шунтирование резисторов меры только одним кольцевым изолятором. Высокопотенциальный зажим меры P4067 расположен на верхнем изоляторе, который в процессе измерения является вершиной консольно закрепленной опоры.

Мера Р40115 конструктивно выполнена на одном изоляционном столбе, а каждая ее ступень состоит из трех постоянных микропроволочных резисторов и одного переменного для подстройки к номинальному значению. Соединение соседних ступеней конструктивно представляет собой фигуру 8 для того, чтобы между ними разность потенциалов была равна электрическому напряжению только одной ступени. Высокопотенциальный зажим меры расположен на верхней части изоляционной консоли.

По результатам сравнительных измерений и опыта эксплуатации в качестве дальнейших исследований была выбрана мера P4067.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕРЫ P4067

При исследовании проводилось измерение действительного значения каждого из входящих в меру резисторов 1 ГОм в 2022 г. и в 2024 г. Это необходимо как для использования меры в качестве группового эталона, так и для аттестации тераомметров.

Действительное значение резисторов определялось путем передачи единицы от Квантового сопротивления Холла. В таблице 1 приведены результаты исследования меры Р4067 при следующих условиях измерений: температура при котором располагалась Р4067 составляла (20,00±0,01) °С, измерительное напряжение 60 В, относительная влажность воздуха менее 40 %.

ТАБЛИЦА 1. Измеренные значения Р4067 ПОСЕКЦИОННО

Секция	2022 год, МОм	2024 год, МОм	ν, 10-6
0-1	1000,1406	1000,1396	0,5
1-2	1000,1596	1000,1586	0,5
2-3	999,9410	999,9438	-1,4
3-4	1000,0091	1000,0068	1,2
4-5	1000,2517	1000,2516	-0,1
5-6	1000,0810	1000,0797	0,7
6-7	1000,0638	1000,0654	-0,8
7-8	1000,1561	1000,1568	-0,4
8-9	1000,0504	1000,0494	0,5
9-10	1000,1231	1000,1238	-0,4
РΣ	10000,976	10000,976	
Рср	1000,0976	1000,0976	

где: ν - относительная нестабильность за год; РΣ – суммарное значение сопротивления из 10 резисторов; Рср – среднее значение из 10 резисторов.

А. Анализ результатов исследований

Из результатов измерения, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

- Определение суммарного значения 10 последовательно соединённых резисторов для последующей аттестации тераомметра и нестабильности этого значения
2022 г 10,000976 ГОм
2024 г 10,000976 ГОм
- Определение среднего значения входящих в меру резисторов и его среднего значения для использования меры в качестве группового эталона
2022 г 1,0000976 ГОм
2024 г 1,0000976 ГОм

IV. ПРИМЕНЕНИЕ МЕРЫ Р4067 ДЛЯ АТТЕСТАЦИИ ТЕРАОММЕТРОВ

Исследованная мера Р4067 с известным фактическим значением сопротивления каждого из резисторов 1 ГОм, была применена в следующих метрологических процедурах по обеспечению единства измерений в высокоомной области. При последовательном соединении резисторов мера Р4067 применялась для аттестации тераомметра 6530 в качестве стандарта с номинальным значением 10 ГОм.

Это привело к повышению точности измерений в высокоомном диапазоне с учетом масштабирующего коэффициента 1:10 и 1:100 в соответствии с принципом работы и функциональными возможностями тераомметра 6530.

При последовательно-параллельном соединении резисторов меры Р4067 осуществлялось как реализация эталонов на основе Т-цепи в более высокоомной области свыше 1 ТОм, так и аттестация тераомметра с помощью этих эталонов.

Проведены измерения 10 ГОм на тераомметре 6530 в соответствии с эксплуатационной документацией на него. Действительное значение сопротивления 10 ГОм определено по формуле:

$$R_d=R_{10G}+C_{cp}$$

где: R_{10G} – измеренное значение на тераомметре при 10 независимых измерениях; C_{ср} – коэффициент передачи единицы, определенный по фактическому значению меры Р4067.

При аттестации тераомметра 6530 с помощью меры Р4067 при номинальном значении сопротивления 10 ГОм, неопределенности измерения будут определяться по формуле:

$$u_{\Sigma o}=\sqrt{(u(R_x))^2+\sum_1^3\left(\frac{\delta_i^2}{3}\right)}$$

где u(R_x) – суммарная стандартная неопределённость по типу А, при 10 независимых измерениях; δ – неопределенности по типу В, обусловленные компарированием мер, температурной составляющей измеряемой меры и эталонной мерой.

При аттестации тераомметра в более высокоомной области с помощью меры Р4067, резисторы меры соединяются следующим образом:

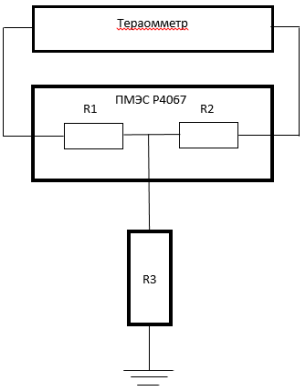


Рис. 2. Реализация высокоомного эталона на основе Т-цепи с помощью меры Р4067. R1 и R2 – последовательно соединенные резисторы меры Р4067, R3 – магазин сопротивления

На рис. 2 показана эквивалентная схема соединения резисторов переходной меры и включение дополнительного магазина и ПМЭС в электрическую цепь для построения Т-цепи.

При построении эталонной Т-цепи на основе переходной меры Р4067 используется последовательное соединение 10 резисторов по 1 ГОм. При этом высокоомный вывод меры, расположенный ближе к вершине консоли изоляционной опоры, целесообразно подключать к выходу Т-цепи, чтобы ослабить влияние токов утечки ввиду большого значения имитируемого эквивалентного сопротивления.

На магазине сопротивления устанавливаются значения таким образом, чтобы реализуемое Т-цепью сопротивление было десятикратно. Например: для получения значения 10 ТОм резисторы R1 и R2 необходимо выставить по 5 ГОм, а на магазине сопротивления R3 выставить 2,5 МОм.

По рассчитанному значению эквивалентного сопротивления Т-цепи на основе меры Р4067 и магазина сопротивлений производится аттестация тераомметра 6530 в области сопротивлений свыше 10 ГОм. При этом значительно повышается точность измерения тераомметра (примерно в 1,5–2,5 раз).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования переходной меры Р4067 позволили установить следующее:

- При поэлементной аттестации каждого из сопротивлений меры от квантового сопротивления Холла, установлено, что мера может быть использована в качестве меры отношения с высокой степенью точности с коэффициентом передачи менее $7 \cdot 10^{-6}$.
- Мера Р4067 может быть использована в качестве группового эталона с номинальным значением 1 ГОм. Исследование нестабильности значения мер показало, что среднее значение такого группового эталона сохраняется практически неизменным (менее 1×10^{-7}) в течение нескольких лет.
- Переходная мера Р4067 может быть использована в качестве эталонного резистора с номинальным значением 10 ГОм при стандартной неопределенности и нестабильности, соответствующей ГПС по электрическому сопротивлению.
- Построенные на основе меры Р4067 Т-цепи могут использоваться как высокоомные эталоны в области номинальных значений свыше 1 ТОм, а также при аттестации тераомметров для точных измерений в этой высокоомной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Самодуров И.А., Плошинский А.В., Никандрова И.А. // 79-я НТК Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова. Применение высокоомных мер электрического сопротивления в качестве групповых эталонов, стр. 406-408
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] A.Ploshinsky, Yu.Tarbeev, I.Khakhmurov. The Group Resistance Standards on the basis of the QHR at VNIIM. CPEM-92. Paris, France, 1992, Digest, pp. 292-293.
- [6] В. Заславский, А. Плошинский. Новое поколение мер электрического сопротивления // Тезисы докладов Международной Европейской научной конференции. 1992, Санкт-Петербург, с. 53.
- [7] B.Litvinov, A.Ploshinsky, Yu.Semyenov. Development and Investigation Base and Transportable Resistance Standards. Doc.CCE 97-38.
- [8] B.Litvinov, A.Ploshinsky, Yu.Semyenov. New Group Resistance Standards. CPEM-2000. Sydney, Australia, 2000, Digest, p. 106.
- [9] P.Capra, F.Galliana. Hamon-Guarded $10 \times 100 \text{ M}\Omega$ Network to Increase the Accuracy of the Transfer of the Resistance Unit up to 1 G Ω at INRIM. IEEE Trans.and Meas. vol. 58, No. 8, August 2009, pp. 2726-2729.
- [10] R.Honig Practical Aspects of High Resistance Measurements. J.Cal-Lab, 2010, Jan-Mar. pp. 19-25.
- [11] S.Rashai, M.Helmy, A.Raouf. Automated Hamon Transfer Standard for High Resistance Traceability in the Range from 100 M Ω to 10 G Ω . J. of Sc.& Eng.Res. vol 10, No 4, April-2019. pp. 114-119.