

УДК 621.317

Е.Н. Белоконь<sup>1</sup>, А.М. Науменко<sup>2</sup><sup>1</sup> Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації, Харків<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків**ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЗАИМНООБРАТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЗИСТОРОВ**

Определены погрешности, которые вносят ограничения на использование смешанных соединений резисторов в практике метрологических работ. Приведено условие минимизации погрешности возникающей из-за разницы действительного и расчетного коэффициентов эквивалентного сопротивления. Оценена погрешность от влияния коммутационных элементов для соединений с сопротивлением 1000, 100 и 10 Ом.

**Ключевые слова:** взаимнообратные соединения резисторов, коммутационные элементы, коэффициент эквивалентного сопротивления.

**Введение**

Взаимно обратные соединения резисторов с обратно пропорциональными коэффициентами эквивалентного сопротивления (далее СРВО) представляют собой достаточно простой и эффективный механизм решения задач сравнения неравнозначных резисторов с высокой точностью [1 – 3]. Однако существует ряд факторов, которые ограничивают применение СРВО в практике метрологических работ. Первая группа ограничений обусловлена методической погрешностью, которая возникает в процессе передачи размера единицы электрического сопротивления из-за разницы между действительным  $B$  и расчетным  $B_0$  коэффициентами эквивалентного сопротивления. Вторая группа ограничений обусловлена дополнительными погрешностями СРВО, вызванными сопротивлением соединительных проводов и коммутационных элементов.

Коэффициент эквивалентного сопротивления  $B$  является одной из основных характеристик СРВО. В соответствии с [1] для соединений резисторов с номинальным значением сопротивления  $R$  относительная погрешность соединения с сопротивлением  $R \cdot B$  отличается от относительной погрешности взаимнообратного соединения с сопротивлением  $R/B$  на величину второго порядка малости.

**Основной материал**

Известно, что основные методы передачи размера единицы электрического сопротивления с использованием СРВО предполагают процедуры измерения, в которых осуществляется сравнение многозначной меры на базе СРВО с эталонной мерой и измеряемым резистором.

На первом этапе реализации этих методов осуществляется выбор взаимно обратных соединений резисторов с действительным коэффициентом экви-

валентного сопротивления  $B$ , наиболее близким по значению к расчетному коэффициенту эквивалентного сопротивления  $B_0$ , который определяют из соотношения (1)

$$\sqrt{\frac{A}{C}} = B_0, \quad (1)$$

где  $A$  – значения электрического сопротивления в омах эталонной меры, от которой необходимо передать размер единицы электрического сопротивления;  $C$  – значение сопротивления в Омах измеряемого резистора.

Действительный коэффициент эквивалентного сопротивления  $B$  зависит от схемы коммутации резисторов в соединении. Практически, коэффициенты  $B$  и  $B_0$  никогда не совпадают и при выборе необходимой схемы соединения одним из основных условий является минимизация погрешности коэффициента  $B_0$ :

$$\Delta B_0 = \frac{B - B_0}{B_0} \leq Z, \quad (2)$$

где  $\Delta B_0$  – погрешности коэффициента  $B_0$ ;  $Z$  – диапазон регулирования устройства сравнения. Соответственно чем меньше величина  $\Delta B_0$  тем более точными методами и средствами сравнения можно воспользоваться в процессе измерения.

Однако выполнить условие  $\Delta B_0 \leq Z$  удается далеко не всегда. Распределение количества соединений с различными значениями коэффициента  $B$  находится в обратно пропорциональной зависимости от количества резисторов  $n$  из которых оно состоит. Ниже приведен график дискретной плотности распределения коэффициентов  $B$  соединений резисторов в диапазоне от 1 до  $n$  (рис. 1). Для примера взято количество резисторов  $n = 9$ .

Из графика видно, что вероятность существования соединений резисторов с коэффициентом экви-

валентного сопротивления В, при котором выполняется условие минимизации погрешности коэффициента, тем больше, чем коэффициент В ближе к единице. И хотя на практике удастся найти соединение с большим коэффициентом эквивалентного сопро-

тивления и малой погрешностью ΔВ<sub>0</sub>, сделать это тем сложнее, чем дальше коэффициент отстоит от единицы. Максимально возможный коэффициент эквивалентного сопротивления В равен количеству резисторов n в соединении.

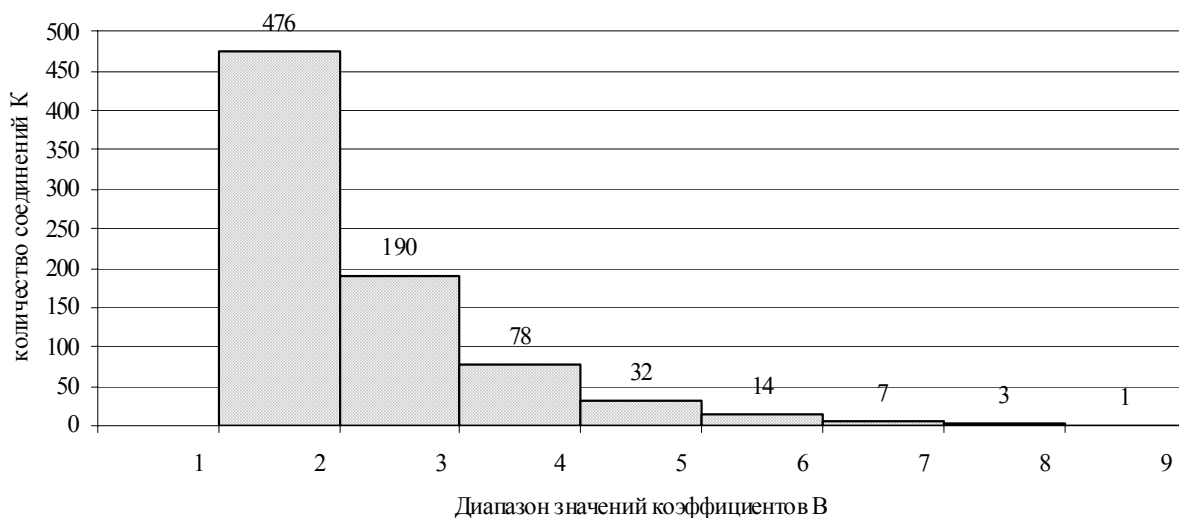


Рис .1. Плотность распределения коэффициентов эквивалентного сопротивления В

Погрешности, вносимые коммутационными элементами и соединительными проводами (далее просто коммутационными элементами), носят специфический характер, их оценка возможна только в привязке к конкретной конструкции устройства. Но при этом общая закономерность погрешности коммутационных элементов для СРВО заключается в увеличении погрешности с ростом количества точек коммутации. Соответственно, наибольшее влияние сопротивления коммутационных элементов, переходного сопротивления контактов и их вариации наблюдается у схем с параллельным включением резисторов, с максимальным числом точек коммутации.

Рассмотрим параллельные соединения резисторов, как соединения с максимальными погрешностями от влияния коммутационных элементов.

В эталонных переходных мерах с параллельными и последовательными соединениями резисторов [4, 5], борьба с влиянием сопротивления комму-

тационных элементов, привела к созданию схем с уравнительными резисторами, с небольшим сопротивлением порядка R<sub>ур</sub> = 0,3 Ом, которые суммируются с переходным сопротивлением контактов и его вариацией. Если для R<sub>ур</sub> = 0,3 Ом положить с большим запасом величину переходного сопротивления равную 0,0001 Ом, а его вариацию принять как лежащую в следующем разряде, то в общем случае можно утверждать, что влияние этих величин на уравнительное сопротивление пренебрежимо мало (не более 0,05%).

К сожалению, для смешанных соединений включение уравнительных сопротивлений не представляется возможным, поэтому сопротивления соединительных проводов, переходное сопротивление контактов и его вариация суммируются с сопротивлениями резисторов. В соответствии с [6] параллельное соединение резисторов R<sub>p</sub> с учетом сопротивлений коммутационных элементов можно выразить формулой (3)

$$R_p = \frac{R^2(1+\hat{r}\mathfrak{B})}{(m-1)\left(R(1+\hat{r}\mathfrak{B}) + \frac{R}{m-1}\right)} * \left( 1 + \frac{R^2(1+\hat{r}\mathfrak{B}) \left[ \frac{-R_f}{R(1+\hat{r}\mathfrak{B})} \right]}{(m-1) \left[ R_n(1+\hat{r}\mathfrak{B}) + \frac{R_n}{m-1} + R_f \right]} * \frac{\left[ \frac{R_n}{R} - \frac{R_n(1+\hat{r}\mathfrak{B})}{R(1+\hat{r}\mathfrak{B})} \right]}{\left[ R(1+\hat{r}\mathfrak{B}) + \frac{R}{m-1} + \frac{\left[ R_n(1+\hat{r}\mathfrak{B}) + \frac{R_n}{m-1} \right] R_f}{R_n(1+\hat{r}\mathfrak{B}) + \frac{R_n}{m-1} + R_f} \right]} \right), \quad (3)$$

где  $R$  – номинальное сопротивление резисторов;  $m$  – количество резисторов замкнутых параллельно;  $\gamma$  – наибольшая относительная погрешность сопротивления резисторов замкнутых параллельно;  $R_f$  – сопротивление токовых клемм в четырехпроводной схеме включения;  $R_n$  – сопротивление потенциальных клемм в четырехпроводной схеме включения с учетом уравнивающих сопротивлений;  $\delta$  – наибольшая относительная погрешность сопротивления потенциальных клемм.

Если принять сопротивление токовых клемм  $R_f \ll R, R_n$ , а погрешности  $\gamma, \delta \ll 1$ , то можно упростить выражение (4)

$$R_p = \frac{R}{m} \left( 1 + \gamma_{cp} + \frac{m-1}{m} \left( \frac{R_f}{R} \right) (\gamma - \delta) \right), \quad (4)$$

где  $\gamma_{cp}$  – среднее относительное отклонение сопротивления резисторов, замкнутых параллельно, от номинального значения.

Выражение (4) может быть использовано для определения эквивалентного сопротивления СРВО с некоторыми оговорками. Так из-за отсутствия в СРВО уравнивающих резисторов величина  $\delta$  может

быть большой, сопротивление контактов может в некоторых случаях отличаться в несколько раз и даже на порядок. Однако, для нормальных условий измерения при сопротивлении контактов  $R_f = 0,0001$  Ом и вариации сопротивления не более половины этого значения можно определить, что величина  $\delta$  не превышает единицы.

С учетом этих допущений погрешность влияния коммутационных элементов, полученная из выражения (4) для соединений с количеством резисторов  $n = 10$  и номинальным значением сопротивления резисторов  $R = 10$  Ом, составит  $2 \cdot 10^{-3} \%$ .

Таким образом, можно получить оценки погрешности для соединений с максимальным количеством точек коммутации  $n - 1$ . Однако для большинства соединений количество точек коммутации не превышает  $(n - 1)/2$ . Чтобы оценить влияния сопротивлений коммутационных элементов на СРВО в схемах с меньшим числом точек коммутации, был проведен ряд экспериментов, для чего были взяты СРВО с сопротивлением резисторов 1000 Ом, 100 Ом и 10 Ом, с коэффициентом эквивалентного сопротивления  $B = 1$ , и количеством резисторов  $n = 6$  и 7 (рис. 2, 3).

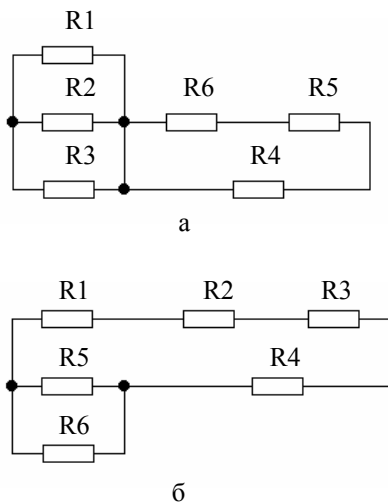


Рис. 2. Взаимно обратные соединения резисторов с  $n = 6, B = 1$

Путем сравнения СРВО с прямым и обратным соединением резисторов и эталонных однозначных мер с сопротивлением 1000 Ом, 100 Ом и 10 Ом, были получены результаты измерений, которые не содержат методических погрешностей, а погрешности от влияния температуры составляют величину второго порядка малости.

Основная погрешность СРВО минимизирована путем предварительного подбора сопротивлений с отклонениями от номинального значения не более  $\pm 0,01\%$ . Следовательно, доминирующей погрешно-

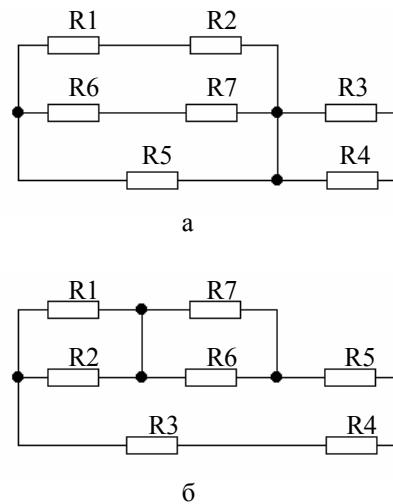


Рис. 3. Взаимно обратные соединения резисторов с  $n = 7, B = 1$

стью в полученных результатах измерений является погрешность коммутационных элементов.

После обработки многократных измерений были получены значения, приведенные в табл. 1 и 2, из которых следует, что влияние погрешности коммутационных элементов начинает сказываться на результатах измерений сопротивлении резисторов СРВО менее 100 Ом, а при сопротивлении резисторов 10 Ом погрешность, вызванная влиянием коммутационных элементов, может превышать величину 0,001%.

Таблиця 1

Расчетные и действительные значения сопротивлений соединений с  $n = 6$ ,  $B = 1$ 

Значение сопротивлений соединений резисторов		Разность измеренных значений сопротивлений		Случайная составляющая (%)	
Номинальное, Ом	Измеренное, Ом		Ом		
	Рис. 2, а	Рис. 2, б		%	
10	10,00038	10,00039	$1 \cdot 10^{-5}$	0,0001	$0,8 \cdot 10^{-4}$
100	100,01785	100,01795	$1 \cdot 10^{-4}$	0,0001	$0,6 \cdot 10^{-4}$
1000	999,9886	999,9887	$10^{-4}$	>0,0001	>0,0001

Таблиця 2

Расчетные и действительные значения сопротивлений соединений с  $n = 7$ ,  $B = 1$ 

Значение сопротивлений соединений резисторов		Разность измеренных значений сопротивлений		Случайная составляющая (%)	
Номинальное, Ом	Измеренное, Ом		Ом		
	Рис. 3, а	Рис. 3, б		%	
10	10,00040	10,00054	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,00140	$0,8 \cdot 10^{-4}$
100	100,02054	100,02087	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,00033	$0,4 \cdot 10^{-4}$
1000	999,99050	999,99090	$4,0 \cdot 10^{-4}$	0,00004	>0,0001

## Выводы

Таким образом, наибольшая погрешность влияния коммутационных элементов будет тем меньше, чем меньше сопротивление контактов и его вариация и чем больше номинальное сопротивление резисторов, входящих в СРВО, что, в принципе, не отличается от традиционных правил коммутации резисторов в измерительных устройствах.

Увеличение влияния погрешностей коммутационных элементов при использовании СРВО в диапазоне значений менее 10 Ом, следует учитывать при выборе конкретных схем коммутации.

## Список литературы

1. Белоконь Е.Н. Метод противопоставления в технике измерения электрических сопротивлений / Е.Н. Белоконь // Український метрологічний журнал. – 2002. – № 1. – С. 34-36.

2. Белоконь Е.Н. Измерение электрического сопротивления с высокой точностью / Е.Н. Белоконь // Український метрологічний журнал. – 2002. – № 3. – С. 38-40.

3. Белоконь Е.Н. Мостовые схемы омметров / Е.Н. Белоконь // Український метрологічний журнал. – 2002. – № 4. – С. 28-30.

4. ЗДФ.452.009 ПС. Меры переходные электрического сопротивления Р-40111, Р-40112, Р-40113, Р-40114 Р-40115. Паспорт. – Кишинев: Микропровод, 1988. – 16 с.

5. Шигорин В.П. Схема и методика оценки точности калибровки эталонных сопротивлений / В.П. Шигорин // Труды комитета стандартов. – Л.: НПО ВНИИМ, 1963. – Вып. 74 (134). – С. 5-10.

6. Riley J.C. The accuracy of series and parallel connections of four terminal resistors / J.C. Riley // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1967. – Vol. IM 16. – P. 258-268.

Поступила в редколлегию 3.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ВЗАЄМНОБЕРНЕНИХ СПОЛУЧЕНЬ РЕЗИСТОРІВ

Є.М. Білоконь, О.М. Науменко

Визначені погрешності, які вносять обмеження на використання змішаних сполучень резисторів в практиці метрологічних робіт. Приведено умови мінімізації погрешності, що виникає із-за різниці дійсного і розрахункового коефіцієнтів еквівалентного опору. Оцінена погрешність від впливу комутаційних елементів для сполучень з опором 1000, 100 і 10 Ом.

**Ключові слова:** взаємнозворотні сполучення резисторів, комутаційні елементи, коефіцієнт еквівалентного опору.

## QUESTIONS OF APPLICATION MUTUALLY OF REVERSE CONNECTIONS OF RESISTORS

E.N. Belokon, A.M. Naumenko

Errors which limit the use of the mixed connections of resistors in practice of metrology works are defined. The condition of minimization of an error which arises up as a result difference of real and calculation coefficients of equivalent resistance is resulted. The error from influence of commutative elements for mixed connections of resistors with a resistance 1000, 100 and 10 Ohm is estimated.

**Keywords:** mutually reverse connections of resistors, commutative elements, coefficient of equivalent resistance.