

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Н.А. Сухорукова

nadya.suh.24@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проанализированы методы измерения электрического сопротивления и методы обработки результатов измерений. Проведена оценка доверительного интервала значений измеряемой величины. Разработана компьютерная программа, исключая грубые погрешности измерений и рассчитывающая среднее значение измерений, доверительный интервал, в котором с вероятностью $P = 0,95$ содержится истинное значение измеряемой величины

Ключевые слова

Электрическое сопротивление, измерения, обработка результатов

Поступила в редакцию 20.06.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

При проектировании, испытаниях и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры необходимо точно определять электрическое сопротивление радиоэлектронных приборов, их составных частей и элементов [1–4]. Измерение электрического сопротивления — один из самых распространенных видов измерений.

Одним из методов измерения активного электрического сопротивления является метод вольтметра-амперметра, использующий закон Ома. При этом измеряемое сопротивление R_x рассчитывают по напряжению U и силе тока I : $R_x = U/I$. Метод является наиболее простым, но точность результатов измерения не высока (вследствие ограничения точности применяемых измерительных приборов и потребляемой ими мощности). Еще одним недостатком данного метода является отсутствие непосредственной оценки и необходимость проведения вычислений для определения результатов.

Другой метод измерения электрического сопротивления — мостовой метод. Измерение проводят с использованием моста-четырёхполюсника, к двум входным зажимам которого подводят питающее напряжение (точки v, z , рис. 1), а к двум другим присоединяют указатель равновесия (точки $a, б$, рис. 1).

Сопротивления R_1, R_2, R_3 и R_4 называют плечами моста. Измеряемое сопротивление включают в одно из плеч схемы. При соблюдении равновесия моста напряжение, а следовательно и ток между точками a и $б$, равны нулю. Используя это условие, вычислим значение сопротивления одного плеча по трем другим из уравнения равновесия: $R_1 R_3 = R_2 R_4$. Момент уравнивания моста определим

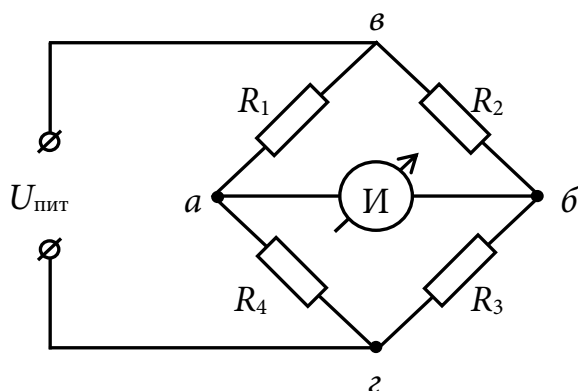


Рис. 1. Схема измерения активных сопротивлений мостовым методом

с помощью индикатора равновесия И, в качестве которого могут быть использованы амперметр или вольтметр.

Преимуществом мостового метода является высокая точность, недостатками — отсутствие непосредственной оценки, необходимость регулировок и вычислений для определения результатов измерений.

Еще одним методом измерения активного электрического сопротивления является резонансный метод, в котором используют колебательный контур (рис. 2).

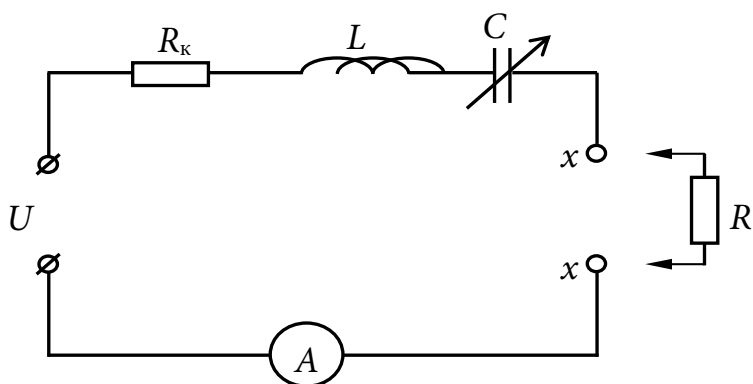


Рис. 2. Схема измерения активных сопротивлений резонансным методом

При замкнутых клеммах $x-x$ в ходе изменения емкости C колебательный контур настраивается в резонанс. Наступление резонанса (показания максимальны) контролируют по показаниям амперметра. Затем определяют ток $I = I_1$, после чего к клеммам $x-x$ подключают измеряемое сопротивление R и снова определяют ток $I = I_2$. При резонансе без измеряемого сопротивления значение тока в контуре: $I_1 = U/R_k$. При включении сопротивления значение тока в контуре составляет: $I_2 = U/(R_k + R)$.

Решая эти уравнения относительно R , запишем:

$$R = R_k \frac{I_1 - I_2}{I_2}. \quad (1)$$

Для получения более точного значения измеренной величины необходимо провести обработку результатов измерений. Как правило, это делают в два этапа [1–3, 5]. На первом этапе из полученной выборки результатов исключают грубые неточности. На втором этапе проводят оценку доверительного интервала значений измеряемой величины.

Причинами погрешностей могут стать ошибочные действия оператора, неверная запись результата измерения, пропуски в наблюдениях и записях, неправильные манипуляции с измерительными приборами, резкие кратковременные изменения условий измерения: толчки прибора, внезапное изменение напряжения, нарушение контактов и т. п.

Результаты, содержащие погрешности (определяют путем сравнения с максимальной величиной), исключают из дальнейшего рассмотрения и обработки, потому что они могут значительно исказить средний показатель измеряемой величины A , среднеквадратического отклонения σ и диапазон доверительного интервала. Как правило, определить их не сложно, но в каждом конкретном случае требуется подтверждение. Существует несколько критериев их оценки.

Критерий 3σ основан на предположении, что при нормальном распределении случайной величины (результата измерений), вероятность отклонения измерения от среднего значения более чем на 3σ , составляет не более 0,3 % ($P \leq 0,003$). Такая ситуация маловероятна, поэтому измерение можно квалифицировать как сомнительный результат. Его исключают при условии, если $|a_i - A| > 3\sigma$.

Данный критерий надежен при числе измерений от 20 до 50. При выполнении лабораторных работ число измерений, как правило, составляет не более 10 для каждого режима работы измерительной аппаратуры и каждого метода измерений, что не позволяет использовать критерий 3σ для выявления грубых неточностей. Если число измерений $n < 10$, то используют критерий Шовене, суть которого заключается в следующем. Из полученного ряда результатов, содержащего N отсчетов, выбирают аномальный отсчет a_i и вычисляют модуль его отклонения от среднего значения в долях выборочного среднеквадратического отклонения:

$$Z = \frac{|a_i - A|}{\sigma}. \quad (2)$$

Затем вычисляют вероятность P этого отклонения и ожидаемое число измерений, которые дадут отсчеты, имеющие отклонение величины Z . После опреде-

ляют минимальное число опытов m , при котором с вероятностью более $P > 0,5$ может наступить такое аномальное отклонение. Это число опытов сравнивают с числом проведенных измерений n . Если выполняется неравенство $m > n$, то отсчет a_i считают ошибкой.

Соотношение величины Z и числа измерений n представлено в табл. 1. Соотношение величины интервала, непопадание в который позволяет считать результат ошибкой, и числа измерений — в табл. 2 [6].

Таблица 1

Соотношение величины Z и необходимого числа измерений

Z	Число измерений	Z	Число измерений	Z	Число измерений	Z	Число измерений	Z	Число измерений
1,0	2	1,4	3	1,8	7	2,2	18	2,6	54
1,1	2	1,5	4	1,9	9	2,3	23	2,7	72
1,2	2	1,6	5	2,0	11	2,4	30	2,8	98
1,3	3	1,7	6	2,1	14	2,5	40	2,9	134

Таблица 2

Соотношение величины интервала и числа измерений

Число измерений	2	5	7	10	20
Интервал	$\pm 1,6\sigma$	$\pm 1,7\sigma$	$\pm 1,9\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 2,26\sigma$

Оценку доверительного интервала значений измеряемой величины проводят, как правило, по критерию Стьюдента. Полуширину доверительного интервала рассчитывают по следующим соотношениям:

$$\varepsilon = \frac{t\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (a_i - A)^2}{n}}, \quad (4)$$

$$A = \frac{\sum_1^n a_i}{n}, \quad (5)$$

где t — параметр Стьюдента, σ — среднеквадратическое отклонение, n — число измерений, a_i — значение i -го измерения, A — среднее значение измерений.

Значение параметра Стьюдента (табл. 3) является функцией от доверительной вероятности и числа степеней свободы, равно $n-1$.

Таблица 3

**Значения параметра Стьюдента для различных значений
доверительной вероятности**

<i>k</i>	Доверительная вероятность <i>P</i>		
	0,90	0,95	0,998
1	6,3130	12,7060	318,306
2	2,9200	4,3020	22,327
3	2,35340	3,182	10,214
4	2,13180	2,776	7,173
5	2,01500	2,570	5,893
6	1,943	2,4460	5,2070
7	1,8946	2,3646	4,785
8	1,8596	2,3060	4,5008
9	1,8331	2,2622	4,2968
10	1,8125	2,2281	4,1437
15	1,7530	2,1314	3,732
20	1,7247	2,08600	3,5518
25	1,7081	2,0595	3,4502
30	1,6973	2,0423	3,3852
40	1,6839	2,0211	3,3069
60	1,6706	2,0003	3,2317
70	1,6689	1,9944	3,2108
80	1,6640	1,9900	3,1950
90	1,6620	1,9867	3,1833
100	1,6602	1,9840	3,1737
200	1,6525	1,9719	3,1315
300	1,6499	1,9679	3,1176
400	1,6487	1,9659	3,1107
500	1,6470	1,9640	3,1060

Для повышения точности и достоверности результатов измерения процедуру проводят несколько раз для каждого метода и каждого режима работы измерительной аппаратуры, поэтому обработка результатов может оказаться трудоемким процессом. Чтобы уменьшить временные затраты и исключить ошибки в вычислениях, целесообразно автоматизировать процесс с помощью специальной компьютерной программы.

При запуске программы (язык программирования Delphi) сначала необходимо ввести число измерений, затем их значения. После проводят расчет среднего значения измерений и их среднеквадратического отклонения от среднего значения. По критерию Шовене проверяют каждый результат на наличие

ошибки. На экране отображается информация о количестве обнаруженных ошибок, которые необходимо исключить из дальнейшего рассмотрения.

Новая выборка результатов измерений отображается на экране, далее рассчитывают среднее значение составляющих ее измерений и их среднеквадратического отклонения от среднего значения.

На следующем этапе выполнения программы для доверительной вероятности $P = 0,95$ рассчитывают значение полуширины доверительного интервала, после чего на экране появляется доверительный интервал, и работа программы считается завершенной (рис. 3).

```

G:\Progr_1.exe
Vvedite kolichestvo izmereniy n = 8
Vvedite rezultaty izmereniy izm[i] =
izm[1] = 12.2
izm[2] = 12.3
izm[3] = 12.5
izm[4] = 26.4
izm[5] = 12.0
izm[6] = 13.1
izm[7] = 12.9
izm[8] = 12.8
Obnaruzhen Promah izm[4] = 26.400
Obnaruzheno 1 promahov, promahi isklyucheny iz analiza rezultatov
izm[1] = 12.20
izm[2] = 12.30
izm[3] = 12.50
izm[4] - PROMAH !!!
izm[5] = 12.00
izm[6] = 13.10
izm[7] = 12.90
izm[8] = 12.80
Srednee znachenie rezultatov izmereniy = 12.543
SKO rezultatov izmereniy = 0.374
Dlya P=0.95 polovina doveritelnogo intervala ravna = 0.346
Dlya P=0.95 doveritelnyi interval : [ 12.197 ; 12.889 ]
    
```

Рис. 3. Скриншот экрана после обработки результатов измерений

Проведенная с использованием данной программы обработка результатов измерений активного сопротивления резистора позволила определить доверительные интервалы (рис. 4 и 5), в которых с вероятностью $P = 0,95$ будет находиться действительное значение сопротивления резистора.

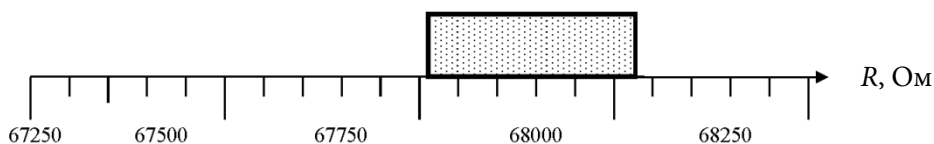


Рис. 4. Доверительные интервалы результатов измерения активного сопротивления резистора методом вольтметра-амперметра

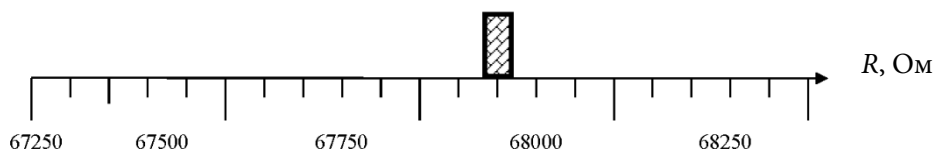


Рис. 5. Доверительные интервалы результатов измерения активного сопротивления резистора мостовым методом

Ширина доверительного интервала в случае применения мостового метода измерений меньше в 8–16 раз, чем в случае применения метода вольтметра-амперметра.

На основании полученных результатов можно сделать выводы о том, что мостовой метод измерения активного электрического сопротивления является наиболее точным.

Запланировано использование рассмотренных методов измерений и компьютерной программы при проведении лабораторной работы «Методы измерения активного электрического сопротивления» по дисциплине «Основы теории измерений».

Литература

1. Анцыферов С.С., Голубь Б.И. Общая теория измерений. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 176 с.
2. Романов В.Н. Теория измерений. Точность средств измерений. СПб.: СЗТУ, 2003. 154 с.
3. Журавлев Л.Г., Маринейко М.А., Семенов Е.И., Цветков Э.И. Методы электрических измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 287 с.
4. Мурашкина Т.И., Мещеряков В.А., Бадеева Е.А. и др. Теория измерений. М.: Высш. шк. 2007. 78 с.
5. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 88 с.
6. Савчук В.П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория. Ч. 1. Одесса: ОНПУ, 2002. 54 с.

Сухорукова Надежда Алексеевна — студентка кафедры «Защита информации», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — С.Б. Козлачков, канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

METHODS OF MEASURING ACTIVE ELECTRICAL RESISTANCE AND PROGRAM OF MEASUREMENT RESULTS ANALYSIS

N.A. Sukhorukova

nadya.suh.24@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of this work was to analyze the methods of measuring the electrical resistance and methods of the measurement results analysis. We estimated the confidence interval of the measured values and developed a computer program, eliminating crude measurement errors and calculating the average value of the measurements, the confidence interval which with the probability $P = 0,95$ contains the true measured value

Keywords

Electrical resistance, measurements, results analysis

© Bauman Moscow State Technical University, 2016

References

- [1] Antsyferov S.S., Golub' B.I. Obshchaya teoriya izmereniy [General measurement theory]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007. 176 p. (in Russ.).
- [2] Romanov V.N. Teoriya izmereniy. Tochnost' sredstv izmereniy [Measurement theory. Accuracy of measuring instruments]. Sankt-Petersburg, SZTU Publ., 2003. 154 p. (in Russ.).
- [3] Zhuravlev L.G., Marineyko M.A., Semenov E.I., Tsvetkov E.I. Metody elektricheskikh izmereniy [Electrical measurement methods]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 287 p. (in Russ.).
- [4] Murashkina T.I., Meshcheryakov V.A., Badeeva E.A. et al. Teoriya izmereniy [Measurement theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007. 78 p. (in Russ.).
- [5] Kravchenko N.S., Revinskaya O.G. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy i otsenki pogreshnostey v uchebnom laboratornom praktikume [Measured data processing and accuracy assessment in educational laboratory-based practical]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 88 p. (in Russ.).
- [6] Savchuk V.P. Obrabotka rezul'tatov izmereniy. Fizicheskaya laboratoriya. Ch. 1 [Measured data processing. Physical laboratory. P. 1]. Odessa, ONPU Publ., 2002. 54 p. (in Russ.).

Sukhorukova N.A. — student of the Department of Information Security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — S.B. Kozlachkov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Department of Information security, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.