

Н.С. Димитраки, С.Н. Димитраки

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ ПРИ ИХ НАМОТКЕ ИЗОЛИРОВАННЫМ ПРОВОДОМ

*Технический университет Молдовы,
бул. Штефана чел Маре, 168, г. Кишинев, MD-2004, Республика Молдова,
s_dimitrachi@mail.ru*

Наивысшая точность измерения высокого напряжения на постоянном токе достигается путем использования высоковольтных резистивных делителей напряжения в простейшем случае, состоящих из двух последовательно соединенных сопротивлений R_1 и R_2 [1].

Измеряемое высокое напряжение, прикладываемое к такому делителю, определяется выражением

$$U_1 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_2 = (1 + K) U_2, \quad (1)$$

где K – коэффициент деления делителя, U_2 – измеряемое напряжение на R_2 .

Из (1) следует, что точность измерения напряжения определяется точностью и стабильностью коэффициента K .

Что касается точности измерения высоковольтных напряжений переменного тока с использованием резистивных делителей, то наряду с точностью коэффициента K должна обеспечиваться и точность отношения его реактивностей. Резистивные делители состоят из микропровода, в дальнейшем провода характеризуются только емкостной реактивностью, ибо реактивность индуктивного характера пренебрежимо мала по сравнению с его резистивным сопротивлением [2]. Емкостная реактивность этих делителей определяется типом обмотки уложенного на каркас провода, его погонным сопротивлением и однородностью распределения провода в обмотке по сопротивлению. Резисторы с обмоткой типа „рядовая в навал“* и однородным распределением провода в обмотке по сопротивлению обладают наименьшей емкостной реактивностью.

С учетом особенностей литого микропровода для однородного его распределения по сопротивлению в обмотке при намотке его обмоткой „рядовая в навал“ требуется непрерывное измерение как сопротивления уложенного на каркас провода, так и длины каркаса, на котором провод уложен, причем непрерывно следует сравнивать их в процентном отношении.

Известные методы измерения не в достаточной степени обеспечивают упомянутые требования, в особенности при намотке высокоомных резисторов и делителей сопротивления [3–5, 6–9].

Метод, рассмотренный в данной работе, обеспечивает изготовление среднеомных резисторов с погрешностью по сопротивлению не более 1–2% при однородном распределении сопротивления в обмотке и количестве провода, необходимом для их намотки ($l_p < 3/\sqrt{r\omega c}$), и с особо высокой точностью, когда количество провода l_σ в отдающей бобине имеет длину

$$\left(l_p + \frac{3}{\sqrt{r\omega c}}\right) < l_\sigma > l_p, \quad (2)$$

что чаще всего имеет место при намотке высокоомных резисторов.

Принцип метода поясняется схемой, приведенной на рис. 1. Бобина с намотанным на металлический каркас резистивным проводом с обмоткой типа „рядовая в навал“* с достаточным приближением может быть представлена структурой типа R-C-O с распределенными электрическими параметрами [6] или в виде двухпроводной линии с распределенными электрическими параметрами.

* Раскладка провода ведется только в одном направлении – шагом больше, меньше или равным диаметру провода по изоляции.

Один провод является металлической бобиной, с сопротивлением пренебрежимо малого значения по сравнению с сопротивлением провода [7]. Эквивалентное электрическое сопротивление такой линии при двухполюсном ее включении в электрическую цепь равно:

$$Z_{\sigma} = \sqrt{\frac{r}{j\omega c}} * \operatorname{cth}\sqrt{r\omega c}l, \quad (3)$$

когда $l < 3/\sqrt{r\omega c}, u,$ $Z_{\sigma} = \sqrt{\frac{r}{j\omega c}},$ (4)

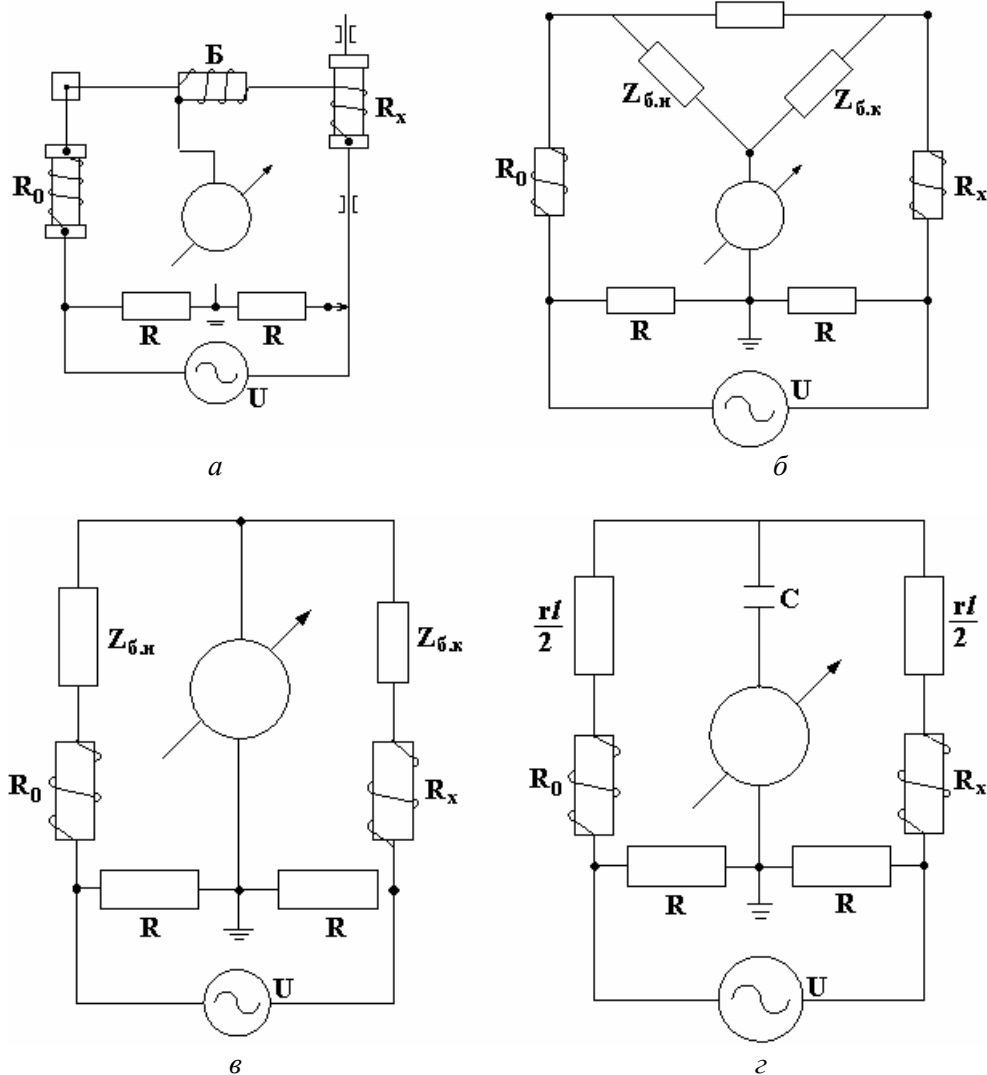


Рис.1

когда $l > 3/\sqrt{r\omega c}$, где r и C – погонное сопротивление собственно провода и соответственно его погонная емкость относительно металлического каркаса.

В упомянутых методах [3–5, 9] измерение сопротивления резисторов при их намотке отдающая бобина с проводом входит в электрическую цепь как электрический двухполюсник и наряду с измеряемым резистором является [9] (или не является) [3–5] измеряемым объектом. И при $l_{\delta} < 3/\sqrt{r\omega c}$ она отрицательно влияет на точность измерения сопротивления резистора, приводя к погрешности изготовления резистора по сопротивлению до десятки процентов.

В данной работе предложено трехполюсное включение бобины в электрическую цепь (рис. 1,а), и измерение сопротивления резистора по мостовой схеме (рис. 1,б). Погрешность намотки резистора по сопротивлению, обусловленная конечным значением эквивалентного электрического сопротивления бобины с проводом, может быть существенно уменьшена, а в некоторых случаях полностью исключается.

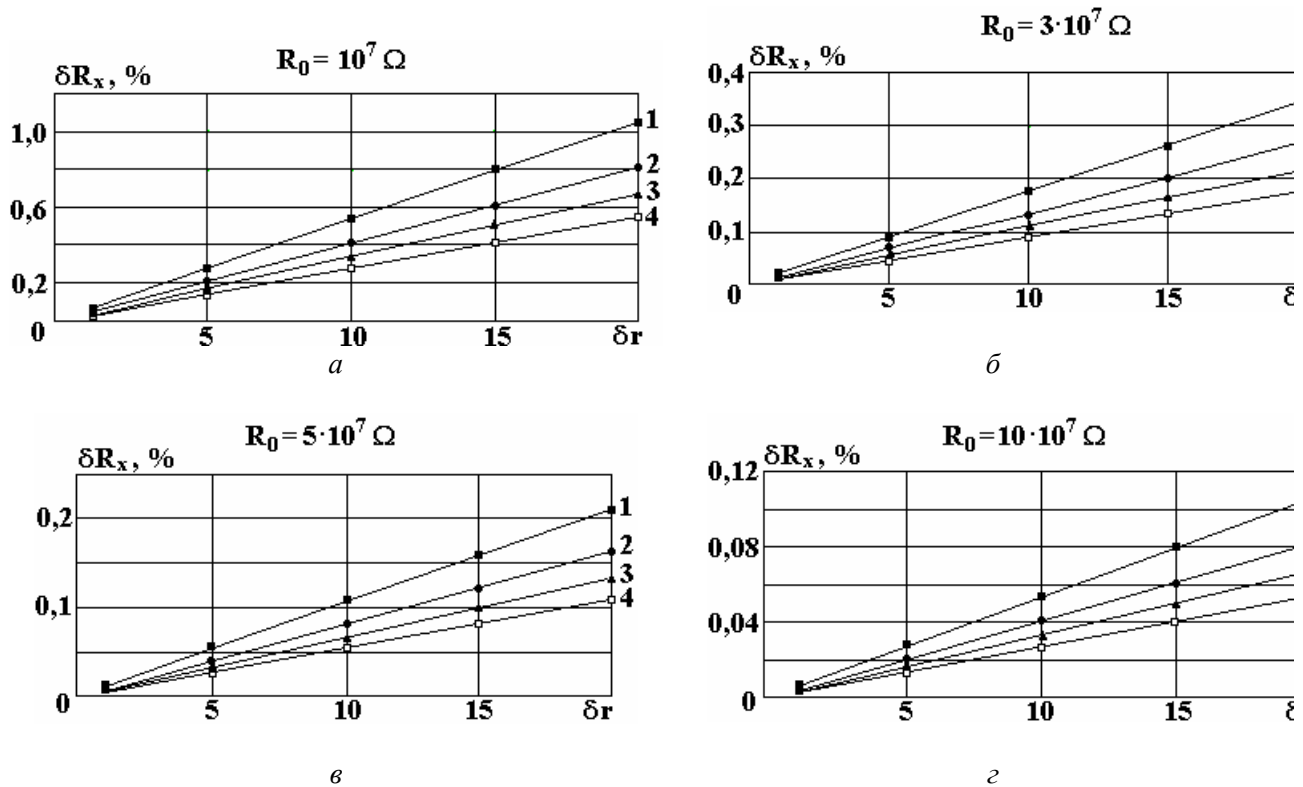
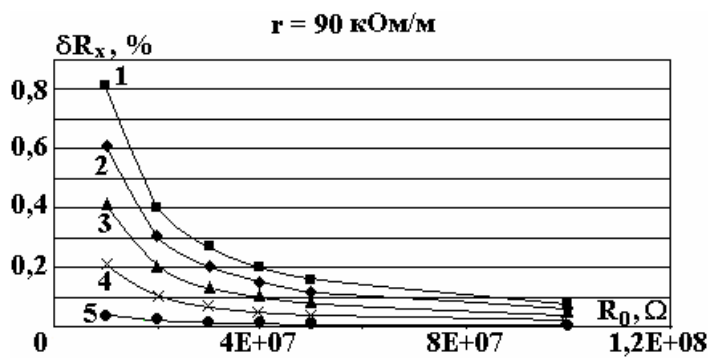
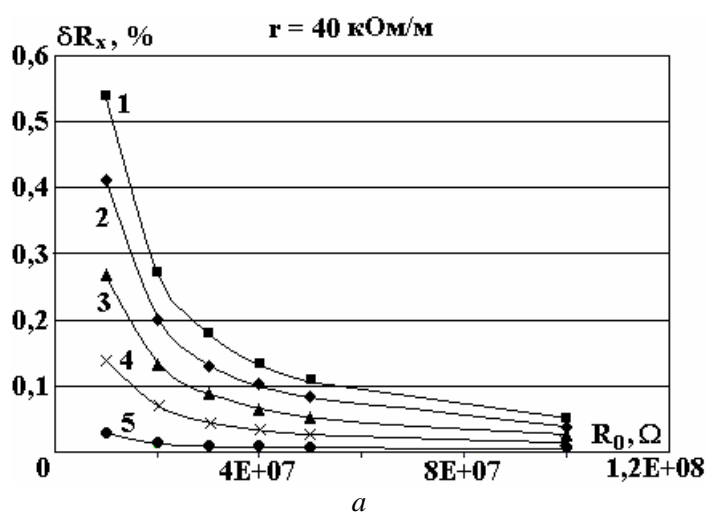


Рис. 2.
 $r, \kappa \text{OM/M}$: 1 – 150; 2 – 90; 3 – 60; 4 – 40, $r = (r_n - r_\kappa) / r_\kappa, \%$



б

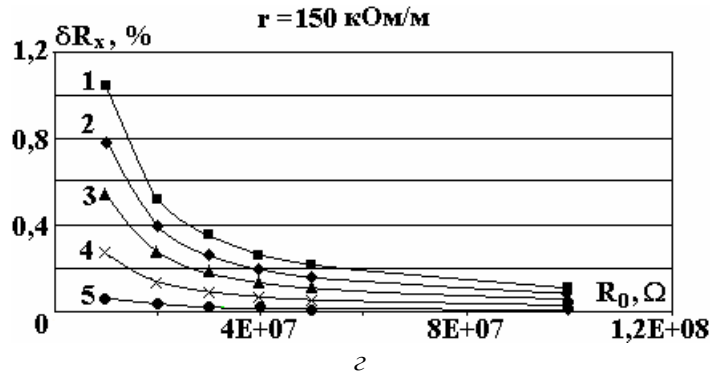
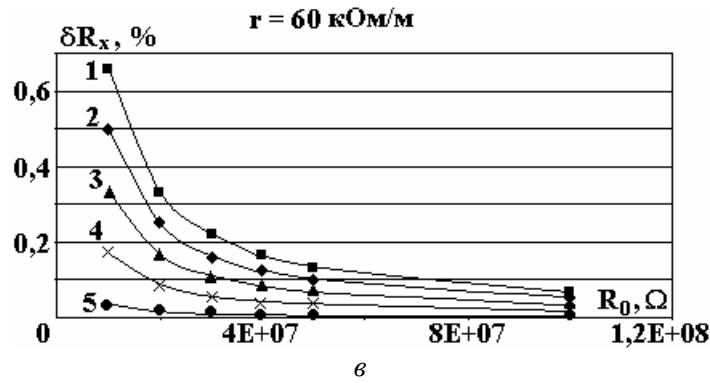


Рис. 3.
 $\delta r, \%$: 1 – 20; 2 – 15; 3 – 10; 4 – 5, 5 – 1

Действительно. При $l_\delta > 3/\sqrt{r\omega C}$, $rl_\delta \gg Z_{\delta n}$, $rl_\delta \gg Z_{\delta k}$ схема на рис. 1,б упрощается и принимает вид схемы на рис. 1,в, а баланс моста имеет место при равенстве

$$R_0 + \text{Re}Z_{\delta n} = R_x + \text{Re}Z_{\delta k}. \quad (5)$$

Здесь могут иметь место два случая:

а) $\text{Re}Z_{\delta n} = \text{Re}Z_{\delta k}$, и тогда:

$$R_x = R_0, \quad (6)$$

б) $\text{Re}Z_{\delta n} \neq \text{Re}Z_{\delta k}$, и тогда:

$$R_x = R_0 + \text{Re}Z_{\delta n} - \text{Re}Z_{\delta k}, \quad (7)$$

откуда относительная погрешность изготовления резистора по сопротивлению будет следующей:

$$\delta R = \frac{R_0 - R_x}{R_0} = \frac{\text{Re}Z_{\delta k} - \text{Re}Z_{\delta n}}{R_0} = \frac{1}{R_0} \frac{\sqrt{r_H} - \sqrt{r_K}}{\sqrt{2\omega C}}. \quad (8)$$

Величины r_H и r_K – погонное сопротивление провода соответственно в начале и в конце обмотки, усредненные на длине $l = 3/\sqrt{r\omega C}$. На рис. 2 и 3 показаны некоторые графики возможных погрешностей изготовления резисторов по сопротивлению, когда усредненное погонное сопротивление конца провода отличается от усредненного погонного сопротивления его начала, то есть $r_H \neq r_K$.

При $l_\delta < 3/\sqrt{r\omega C}$; $rl_\delta < Z_{\delta n}$; $rl_\delta < Z_{\delta k}$ (рис. 1,з) условие баланса моста имеет вид

$$R_0 + \frac{rl}{2} = R_x + \frac{rl}{2}, \quad (9)$$

откуда

$$R_x = R_0. \quad (10)$$

Сопротивление в данном случае усредняется на длине $3/\sqrt{r\omega c}$ как со стороны начала бобины, так и со стороны ее конца.

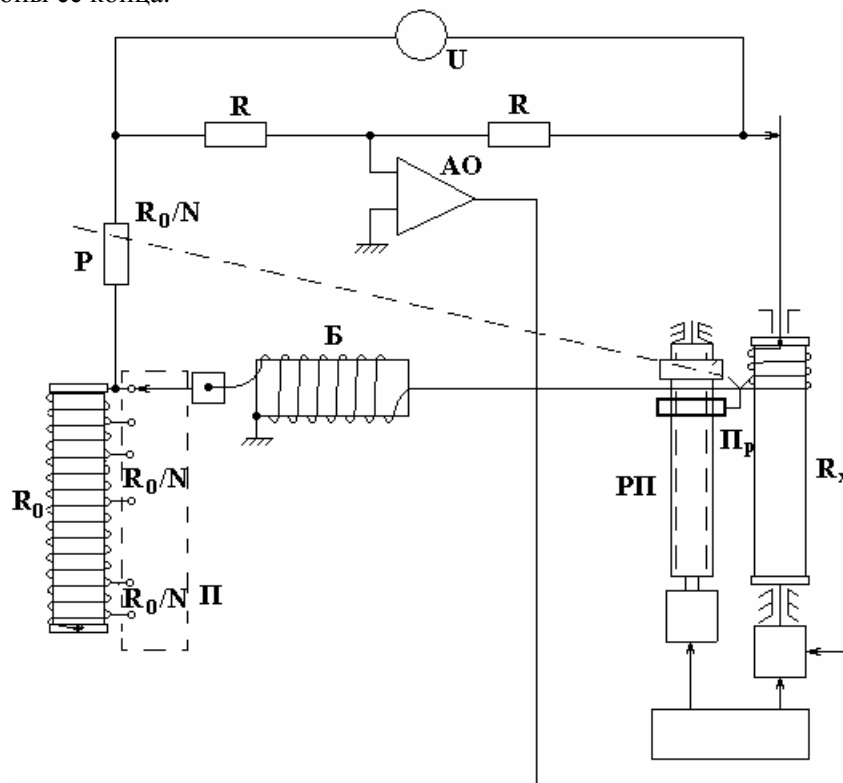


Рис. 4

Из последнего следует, что при количестве провода, оставшегося на бобине ($l_s < 3/\sqrt{r\omega c}$), погрешность намотки резистора по сопротивлению определяется только погрешностью метода и не зависит от значения эквивалентного электрического сопротивления начала ($Z_{\text{он}}$) и конца ($Z_{\text{ок}}$) бобины.

Практик при современных методах измерения погонного сопротивления провода при его литье и методах управления литьем, неоднородность погонного сопротивления провода не превышает 10–15% [8].

Схема, представленная на рис. 4, поясняет принцип однородного распределения провода по сопротивлению резистора с обмоткой типа “рядовая в навал”. Однородное распределение сопротивления провода в обмотке уменьшает его емкостную реактивность, что делает возможным использование резисторов из микропровода в цепях переменного тока. Для однородного распределения сопротивления провода в обмотке резистора, по предложенному в работе методу сопротивление R_0 образцового резистора и действующая длина L каркаса наматываемого резистора делятся на N секций, значением (R_0/N и L/N) соответственно. От каждой секции сопротивлением R_0/N образцового резистора делаются выводы, которые гальванически соединяются с N неподвижными контактами переключателя Π . Последовательно с образцовым резистором через подвижный контакт переключателя Π соединяется переменный резистор P сопротивлением R_0/N , включенным по реостатной схеме. Упомянутые переменный и образцовый резисторы образуют образцовое плечо измерительного моста. Ось резистора P кинематически связана с поводком Π_p раскладчика провода $РП$. Упомянутая связь выбирается такой, чтобы полному повороту ползунка резистора P ($0-360^\circ$) соответствовало перемещение поводка раскладчика провода вдоль оси каркаса резистора на длину L/N , а сопротивление резистора P , введенного в образцовое плечо, увеличилось от 0 до R_0/N . Пропорционально закону роста сопротивления резистора P , внесенным в образцовое плечо моста растет и сопротивление провода намотанного на каркас резистора, составляющее измеряемое плечо моста. Через регулирование скорости намотки количество сопротивления уложенного на каркас провода поддерживается равным количеству сопротивления резистора P , введенного в образцовое плечо. Путем соблюдения равенства этих сопротивлений в процессе намотки сопротивление намотанного на каркас провода распределяется по закону изменения сопротивления переменного резистора во времени.

После первой ротации резистора P его ползунок становится в нулевое начальное положение (0°), а в образцовое плечо моста вместо резистора переменного сопротивления вводится первая секция сопротивлением R_0/N образцового резистора, после чего цикл повторяется до тех пор, пока в образцовое плечо моста введутся $(N-1)$ секции сопротивления образцового резистора и при этом на каркас изготавливаемого резистора наматывается провод сопротивлением $R_x = R_0$, а поводок раскладчика провода пройдет путь, равный L . На этом заканчивается намотка резистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шваб А. Измерение на высоком напряжении // Измерительные приборы и способ измерения. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 59–68.
2. Дегтярь Л. Э., Зелитовский З.И. Реактивность сопротивлений из микропровода // Микропровод и приборы сопротивления. Кишинёв: Штиинца, 1962.
3. Димитраки С.Н. Методы неконтактного измерения изолированного сопротивления. Кишинев: Штиинца, 1978. 124 с.
4. Фейгельс В.З. Методы и аппаратура для неконтактного измерения сопротивления движущейся изолированной проволоки. Автореф. дисс. кандидата технических наук. Л.; 1963.
5. А.С.222555,(СССР). Полуавтомат для намотки проволочных резисторов. Лучкин А.М, Давыдов Л.Н. в Б.И., 1968.
6. Каузер, Кастро, Нихолс. Схемы с распределенными постоянными на тонких пленках // Зарубежная радиоэлектроника. 1963. N. 4. С. 112–123.
7. Димитраки С.Н. Методы и приборы для измерения и воспроизведения микропровода и изделий из него в процессе производства. Дисс. доктора технических наук. 1986.
8. Brevet de inventie (11) 3329 (13) G2, Procedeu de control si reglare a sectiunii firului conductor in procesul turnarii lui. /DIMTRACHI Sergiu, MD; DIMITRACHI Nicolae,MD; NICOLU Dana, MD. Anul 2007. Republica Moldova.
9. Болбочан В.Ф., Драбенко И.Ф., Кодица В.М. Измерение больших сопротивлений из микропровода в процессе намотки // Микропровод и приборы сопротивления. Кишинёв: Картя Молдовеняскэ, 1972.

Поступила 15.10.09

Summary

Is considered the method of measuring the resistance of resistors and dividers, at their winding with insulated wire, as well as the distribution of their resistance on a frame for a given law. Is considered the theory of the method, an analysis of the error of the method and its possibilities.
