

# Воспроизводство литого микропровода и резистивных элементов из него с электрическими параметрами заданного значения

Н. С. Димитраки

Технический университет Молдовы,  
ул. Штефана чел Маре, 168, г. Кишинев, MD-2004, Республика Молдова, e-mail: [s.dimitrachi@mail.ru](mailto:s.dimitrachi@mail.ru)

Рассматривается метод воспроизводства изолированного провода с заданным погонным сопротивлением при его литье и резистивных элементов с заданным сопротивлением при их изготовлении путем измерения упомянутых сопротивлений методом последовательного сравнения. При этом используется измерительная информация в управлении режимом литья микропровода или процессом изготовления упомянутых элементов, когда связь измеряемого объекта с измерительной цепью неомического (негальванического) характера. Описывается принцип метода, приводятся электрические схемы, поясняющие предложенный метод, проводится анализ погрешностей и предварительных его возможностей, даются рекомендации по его применению.

*Ключевые слова:* микропровод, литье, неомическая связь (гальваническая, резистивная), воспроизводство, сопротивления заданного значения.

УДК 681.2.08

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Литой микропровод в силу специфических особенностей метода его литья [1] отличается сравнительно высокой неоднородностью электрических и физических параметров. Например, погонное сопротивление *резистивного микропровода* на длине не более десяти метров может изменяться до десяти и более раз, а магнитная проницаемость микропровода из *ферромагнитных материалов* может изменяться в единицы раз, не остается постоянной и толщина его изоляционного покрытия [2].

Поэтому промышленная реализация этого метода для широкого использования микропровода в производстве высококачественных изделий из него сопряжена с решением ряда задач, и в первую очередь – с разработкой специальных методов и устройств для измерения при воспроизводстве микропровода заданных электрических и физических параметров непосредственно в процессе его литья.

Сложность измерения микропровода, как и изделия из него, в особенности в процессе их производства, заключается в наличии изоляционного покрытия на проводе и его движении. Это не позволяет объектам иметь омическую связь с измерительным устройством. Она может быть только неомического характера (полностью или частично) [3, 4]. Переходное сопротивление контактов неомической связи значительно больше измеряемого и по отношению к измерительной цепи включено последовательно с измеряемым объектом, вместе составляя одно целое [2].

Классические методы подразумевают наличие омического контакта измеряемого объекта с измерительной цепью, в связи, с чем использовать эти методы для решения поставленной задачи не представляется возможным.

Предложенные ранее методы решения этих задач отличаются низкой точностью, что отрицательно сказывается на качестве самого микропровода и изделий из него. Причина этого – присутствие в составе измеряемого сопротивления переходного сопротивления неомической связи, которое по отношению к измеряемым объектам (сопротивлению) включено последовательно, вместе составляя измеряемый двухполюсник.

## ПРИНЦИП И АНАЛИЗ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОПРОВОДА И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕГО ПРИ ИХ ВОСПРОИЗВОДСТВЕ

В работе рассматривается один из практически возможных методов высокоточного измерения микропровода и резистивных изделий из него при их воспроизводстве сопротивлением заданного значения, где связи указанных объектов с измерительным устройством частично неомического (емкостного) характера.

Метод построен на последовательном сравнении двух гармонических напряжений:  $u(t) = U_m \sin \omega t$  и  $u_{on}(t) = U_{on,m} \sin \omega t$ . Амплитуда  $U_m$  первого  $u(t)$  пропорциональна сопротивлению определенного участка  $l$  микропровода с погонным сопротивлением заданного значения  $r_3(U_m \sim r_3 l)$ , а второго  $u_{on}(t)$  пропорциональна сопротив-

лению  $R$  ( $U_{m.on} \sim R$ ) со значением

$$R[\Omega] = Z_6[\Omega]/\delta r[\%], \quad (1)$$

где  $|Z_6| = \sqrt{\frac{r_3}{2\pi f C}}$  – эквивалентное электрическое

сопротивление бобины с тянутым микропроводом с погонным сопротивлением заданного значения  $r_3$ ;  $C$  – погонная емкость микропровода в бобине;  $f$  – частота измерительного сигнала;  $\delta r, \%$  – допустимое относительное отклонение реального погонного сопротивления  $r$  литого микропровода от его заданного значения  $\delta r = (r_3 - r)/r_3$ .

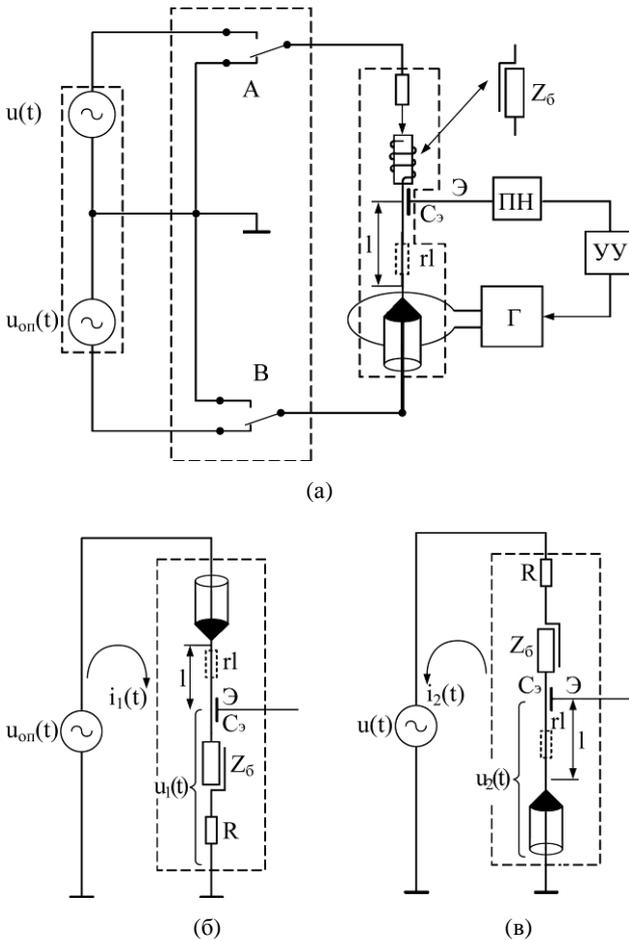


Рис. 1. Общая электрическая схема (а), поясняющая формирование сравниваемых напряжений: (б) –  $u_1(t)$ ; (в) –  $u_2(t)$ .

Принцип метода поясняется схемами, показанными на рис. 1–2. Последовательная электрическая цепь (рис. 1), образованная измеряемым участком микропровода сопротивлением  $rl$ , бобиной с тянутым микропроводом эквивалентным сопротивлением (импедансом)  $Z_6$  и добавочным резистором сопротивлением  $R$ , поочередно с частотой  $\Omega < f$  коммутируется к одному или другому из выходов источника гармонических напряжений со значениями  $u_{on}(t) = U_{m.on} \sin \omega t$  и  $u(t) = U_m \sin \omega t$  соответственно (рис. 1а), где  $\Omega$  – ча-

стота напряжения коммутации упомянутой электрической последовательной цепи. При подключении цепи сопротивлением  $R + Z_6 + rl$  к выводу с напряжением  $u_{on}(t)$  (рис. 1б) по ней потечет ток

$$i_1(t) = \frac{U_{m.on} \sin \omega t}{R + Z_6 + rl}, \quad (2)$$

а при подключении ее к выводу с напряжением  $u(t)$  (рис. 1в) потечет ток

$$i_2(t) = \frac{U_m \sin \omega t}{R + Z_6 + rl} \quad (2a)$$

направлением, обратным току  $i_1(t)$ .

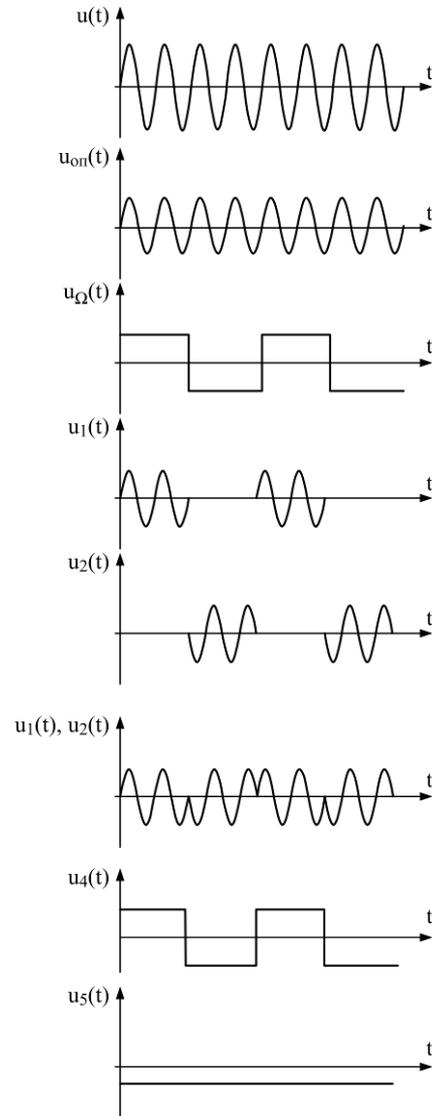


Рис. 2. Осциллограммы напряжения в основных узлах устройства с блок-схемой, показанной на рис. 1.

В первом случае ток  $i_1(t)$  на сумме сопротивлений ( $R+Z_6$ ) создает падение напряжения (рис. 1б, 2):

$$u_1(t) = \frac{R + Z_6}{R + Z_6 + rl} U_{m.on} \sin \omega t, \quad (3)$$

а при подключении к выводу с напряжением  $U_m \sin \omega t$  ток  $i_2(t)$  на участок микропровода с соп-

**Таблица 1.** Данные расчета  $\delta r = \varphi\left(K \frac{\sqrt{r}}{R}, \%\right)$  при  $R = 10^6 \Omega$ ,  $f = 10^5$  Гц,  $C = 160$  пФ/м, где  $K = 1/\sqrt{2\pi f C}$

	$R = 10^6 \Omega, f = 10^5 \text{ Гц}, C = 160 \text{ пФ/м}$						
$r, k\Omega/\text{м}$	0,1	1,0	10,0	50,0	100,0	500,0	1000
$Z_6 = \sqrt{r/2\pi f C}, k\Omega$	0,997	3,154	9,974	22,302	31,540	70,525	99,737
$\delta r = \frac{ Z_6 }{R} = K \frac{\sqrt{r}}{R}, \%$ $K = 1/\sqrt{2\pi f C} = \text{const}$	0,0	0,03	0,1	0,2	0,3	0,7	1,0

ротивлением  $rl$  создаст следующее падение напряжения (рис. 1в, 2) значением:

$$u_2(t) = \frac{rl}{R + Z_6 + rl} U_m \sin \omega t \quad (4)$$

со знаком, обратным напряжению  $u_1(t)$ .

Напряжения  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  (рис. 2) через емкость  $C_3$ , образованную электродом Э и участком микропровода, что скользит по нем (емкость  $C_3$  стабилизирована по значению [2]), поочередно во времени снимаются и подаются на усилитель – преобразователь переменного напряжения в постоянное ПН, входное сопротивление которого должно удовлетворять условию  $R_{ex} \gg 1/j2\pi f C_3$  (рис. 1а, 2). Преобразованное напряжение воздействует на устройство управления (УУ) режимом литья микропровода таким образом, что в течение всего процесса сохраняется равенство

$$\frac{R + Z_6}{R + Z_6 + rl} U_{m,оп} \sin \omega t = \frac{rl}{R + Z_6 + rl} U_m \sin \omega t,$$

обеспечивая при этом значение сопротивления  $r$  литого микропровода равным заданному значению  $r_3$ :

$$r = \frac{1 U_{m,оп}}{l U_m} R = r_3. \quad (5)$$

Оценим степень возможного отклонения действительного значения сопротивления  $r$  от его заданного значения  $r_3$ , обусловленного присутствием в измеряемой цепи сопротивления элемента неомической связи (бобины с тянутым микропроводом) значением  $Z_6 \neq 0$ :

1.  $R \gg |Z_6|$ , и тогда согласно (5)

$$r = \frac{1 U_{m,оп}}{l U_m} R \approx r_3, \quad (5a)$$

2.  $R > |Z_6|$ , и тогда

$$r = \frac{1 U_{m,оп}}{l U_m} (R + Z_6) = r_x \neq r_3. \quad (5b)$$

Неравенства (5а) и (5б) приводят к погрешности воспроизводства микропровода по погонному сопротивлению следующими значениями:

– абсолютным:

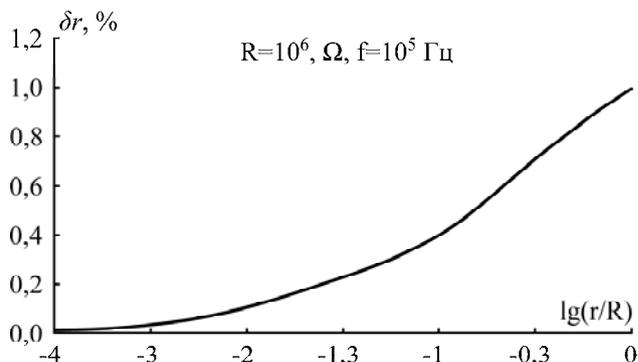
$$\Delta r = r_3 - r_x = -\frac{1 U_{m,оп}}{l U_m} |Z_6|, \quad (6)$$

– относительным:

$$\begin{aligned} \delta r = \frac{r_3 - r_x}{r_3} &= -\frac{|Z_6|}{R} = \sqrt{\frac{r}{2\pi f C}} / R = \\ &= \frac{1}{2\pi f C} \cdot \frac{\sqrt{r}}{R} = K \frac{\sqrt{r}}{R}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $K = 1/2\pi f C$ .

На рис. 3 по данным табл. 1 построена зависимость  $\delta r = \varphi(\sqrt{r}/R)$  для случая, когда измерение сопротивления  $r$  при литье микропровода осуществляется сигналом той же частоты. Например:  $f = 10^5$  Гц = const при сопротивлении,  $R = 10^6 \Omega$  независимо от значения  $r_3$ .



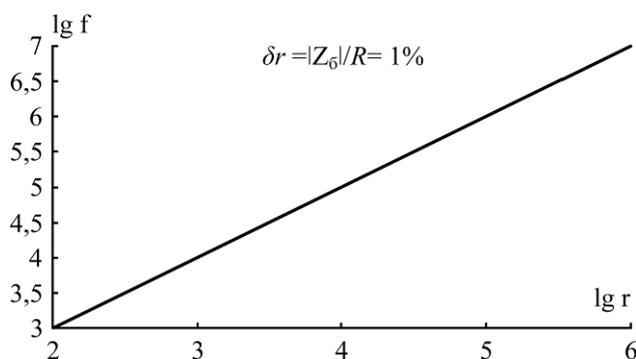
**Рис. 3.** Зависимость  $\delta r = \varphi(\sqrt{r}/R)$  при измерении погонного сопротивления  $r$  сигналом той же частоты независимо от значения  $r_3$ .

Погонную емкость  $C$  при укладке микропровода на каркас бобиной «рядовая в навал», как показано в [2], можно принять постоянной и равной 160 пФ/м независимо от значения  $r$ .

Из рис. 3 видно, что погрешность  $\delta r$  при  $f = \text{const}$  и  $R = \text{const}$  с изменением  $r$  меняется, с ростом  $r$  – растёт.

Для сохранения  $\delta r$  на заданном уровне для всех значений  $r$  можно менять либо  $f$  при

$R = \text{const}$ , либо  $R$  при  $f = \text{const}$ . На рис. 4 приведен график  $f = \varphi(r)$ , когда  $\delta r = 1\%$  и  $R = \text{const}$ .



**Рис. 4.** Зависимость  $\lg r = \varphi(\lg r)$  при относительной погрешности  $\delta r = 1\%$  и добавочном сопротивлении  $R$  постоянного значения.

**Таблица 2.** Данные расчета  $\lg r = \varphi(\lg r)$  при относительной погрешности  $\delta r = |Z_0|/R = 1\%$

$\delta r =  Z_0 /R = 1,0\%$					
$r, \Omega/\text{м}$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$f, \text{Гц}$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$

Принцип метода, схема измерения (рис. 1) и основные соотношения (1)–(7) остаются теми же и при воспроизводстве резистивных элементов из провода в изоляции. Разница только в том, что участок микропровода в изоляции сопротивлением  $rl$  заменяется изготавливаемым резистивным элементом – сопротивлением  $R_x$ .

Отметим, что при воспроизводстве резистивных элементов в отличие от воспроизводства провода в изоляции наряду с погрешностью от несильного выполнения неравенство  $R \gg Z_0$  присутствует и погрешность воспроизводства  $R_3$ , обусловленная их реактивными составляющими распределенной индуктивностью  $L$  и емкости  $C$  в обмотке. На значение этой погрешности  $\delta R$  наряду с  $L$  и  $C$  влияют также тип обмотки резистивного элемента и его габаритные размеры, например:

– для резистивных элементов с однослойной обмоткой и укладкой провода шагом  $h \geq d$ , где  $d$  – диаметр провода, погрешность  $\delta R$  определяется равенством

$$\delta R = \frac{R_3 - R_p}{R_3} = f^2 \left[ 3R_3^2 C^2 l^2 + 13CIL - 20 \frac{L^2}{R_3^2} \right], \quad (8)$$

а для элементов с обмоткой типа «рядовая в навал» [3], где  $h < d$ , следующим равенством:

$$\delta R_x = \frac{R_3 - R_p}{R_3} = -3a^2 f^2 R_3^4. \quad (9)$$

Здесь  $R_p$  – реальное значение сопротивления воспроизводимого резистивного элемента,  $a = C/2r$ ,  $2l$  – длина обмотки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный метод применим для воспроизводства проводов в изоляции погонным сопротивлением заданного значения при непрерывном его литье, а также резистивных элементов из него. Погрешности  $\delta r$  и  $\delta R$  их воспроизводства в заданный номинал сопротивления определяются отношениями  $|Z_0|/R$  и  $|Z_0|/R_3$  соответственно. Путем выбора частоты  $f$  измерительного сигнала погрешности  $\delta r$  может быть сделано сколь угодно малого значения. Что касается  $\delta R$ , то эта погрешность имеет ограниченные значения, в особенности при воспроизводстве резисторов небольших номиналов из высокоомного микропровода.

Метод прост в реализации и может быть внедрен в установках для непрерывного литья провода в изоляции, например микропровода и резистивных изделий из него непосредственно в процессе их воспроизводства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Способ изготовления литых проводов в сплошной стеклянной изоляции. Красинков В.Г., Реман А.В., Трояновский В.В. Оpubл. в Б.И., 1963, № 3 А.С. 149168 (СССР).
2. Шубин В.В., Зимодро А.Ф. Прибор для бесконтактного измерения погонного сопротивления высокоомных микропроводов в стеклянной изоляции. *Микропровод и приборы сопротивления*. Кишинев: Картя молдовеняскэ, 1970. Вып. VII, с. 51–59.
3. Dimitraki N.S. and Dimitraki S.N. Measurement of a Conductor Cross Sectional Area. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2008, **44**(1), 69–72.
4. Dimitraki N.S. and Dimitraki S.N. Measuring the Resistance of Resistors in the Winding Process with Insulated Wire. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010, **46**(2), 173–177.

Поступила 11.09.12

## Summary

The paper considers the method of production of insulated wire with the specified linear resistance while casting and of the production of resistive elements with the specified resistance at their manufacturing. To this end, the mentioned resistances are measured by successive comparison using the measurement information in the control of either regimes of microwire casting or of the process of manufacture of mentioned elements. This is the case when the relationship between the measured object and the measuring circuit is non-Ohmic (not galvanic). In the paper the principle of the method is described, circuit diagrams are given that illustrate the proposed method, potential errors and limits of the method are analyzed, recommendations for its use are provided.

*Keywords:* microwire, casting, non-Ohmic relationship, reproduction, resistance of set value, sequential comparison, stress.