

Н.С. Димитраки

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ВЫТЯГИВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ СПОСОБОМ

*Технический университет Молдовы,
Штефан чел Маре, 168, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

В последнее время, благодаря достижениям в технологии получения волоконно-оптических линий, новый импульс в своем развитии получили литые проводники и полупроводники (далее в тексте – проводники), вытягиваемые из жидкой фазы в виде проволоки в стеклянной оболочке. Геометрические параметры литых проводников определяются параметрами технологического процесса вытягивания их из расплава; наиболее существенными являются поперечное сечение проводника, толщина его изолирующего покрытия и их однородность по длине. Неоднородность упомянутых параметров по длине проводника негативно сказывается на качестве как самого проводника, так и изделий из него. Известно, что сечение проводника и толщина изолирующей оболочки зависят от температуры расплавов и скорости вытягивания, а их соотношение определяется однородностью преформы [1].

Известные методы литья не обеспечивают получение проводников заданных параметров с достаточной для практики точностью [2–5]. Поэтому в процессе литья проводника необходим непрерывный контроль упомянутых величин с последующей корректировкой режимов литья в случае возможных отклонений параметров проводника от заданных значений. На практике корректировка режимов осуществляется путем соответствующего изменения скорости вытягивания и температуры расплава. Если, однако, разница между заданным и эффективным значениями упомянутых величин превосходит определенное значение, то можно изменять исходную скорость преформы таким образом, чтобы скорость вытягивания поддерживалась на оптимальном уровне.

Известные оптические методы контроля [1] требуют весьма сложного измерительного оборудования, а известные электрические методы [6] не обеспечивают требуемой точности.

В настоящей работе рассматривается простой высокоточный электрический метод косвенного измерения поперечного сечения проводника. Метод основан на использовании зависимости сопротивления R_l проводника заданной длины l от его поперечного сечения S .

Рассмотрим принцип метода на примере проводника цилиндрической формы диаметром d . Связь между диаметром d и сопротивлением R_l проводника длиной l имеет вид:

$$d = 2\sqrt{\frac{l\rho}{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_l}}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника.

Проводник, измеряемый по этому методу, включается в измерительную цепь по трехполюсной схеме (рис. 1). На рисунке полюса обозначены цифрами 1, 2 и 3. Каждый полюс связи проводника с измерительной цепью имеет переходное сопротивление. У двух из полюсов (1 и 2) переходные сопротивления имеют комплексный характер и обозначены Z_1 и Z_2 соответственно. У третьего полюса (3) переходное сопротивление имеет чисто резистивный характер и обозначено $R_{пф}$. Измерение сопротивления проводника R_{lx} по этому методу осуществляется путем непрерыв-

ного сравнения двух напряжений. Одно из этих напряжений пропорционально сопротивлению проводника R_l с заданными диаметром d_{30} , удельным сопротивлением ρ_{30} и длиной l .

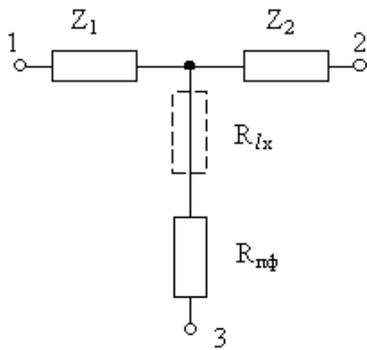


Рис. 1. Эквивалентная схема включения измеряемого проводника в электрическую цепь.

Другое напряжение пропорционально сумме двух последовательно включенных сопротивлений: сопротивления R_l и сопротивления дополнительного резистора R_δ , причем $R_\delta \gg R_l$. Упомянутые напряжения сдвинуты по фазе относительно друг друга на π , непрерывно и периодически следуя друг за другом. Первое из напряжений с частотой Ω повторяется на сопротивлениях R_δ и Z_1 , соединенных между собой последовательно. Второе напряжение с той же частотой повторяется на измеряемом проводнике с сопротивлением R_{lx} .

Принцип метода поясняется схемами и осциллограммами, показанными на рис. 2. Дополнительный резистор с сопротивлением R_δ (рис. 2,б,в), измеряемый проводник с сопротивлением R_{lx} и полюса 1 и 2 с переходными сопротивлениями Z_1 и $R_{n\phi}$ соответственно образуют с источником измерительного сигнала ИС последовательную электрическую цепь, по которой течет ток I . Источник измерительного сигнала построен таким образом, что на его выходе имеют место два независимых напряжения (рис. 2,а,з):

$$u(t) = U_m \sin(\omega t) \text{ и } u_{on}(t) = U_{onm} \sin(\omega t + \pi).$$

Последовательная цепь, составленная из элементов с сопротивлениями R_δ , Z_1 , R_{lx} и $R_{n\phi}$ с помощью коммутатора K периодически подключается то к выходу с напряжением $u(t)$, то к выходу с напряжением $u_{on}(t)$ (рис. 2,б,в). Коммутатор управляется напряжением $u_\Omega(t) = U_{\Omega m} \text{sign} \sin \Omega t$ с частотой $\Omega = \omega / 2\pi n$, где ω – частота измерительного сигнала, $n > 1$ и целое число. В процессе последовательного периодического переключения к общей шине источника ИС подключается то измеряемый проводник (рис. 2,б), то последовательная цепь, состоящая из R_δ и Z_1 (рис. 2,в). Когда цепь, составленная из элементов с сопротивлениями R_δ , Z_1 , R_{lx} и $R_{n\phi}$, подключается к выходу источника сигнала с напряжением $u(t)$, на вход усилителя $A \omega$ (точка В, рис. 2,а,б) поступает напряжение:

$$u_l(t) = \frac{R_{lx} + R_{n\phi}}{R_\delta + Z_1 + R_{lx} + R_{n\phi}} U_m \sin \omega t. \quad (2)$$

Напряжение $u_l(t)$ снимается с измеряемого проводника сопротивлением R_{lx} и переходного сопротивления $R_{n\phi}$ полюса 3 (рис. 2,б). Когда эта же цепь подключена к выходу с напряжением $u_{on}(t)$, то на усилитель поступает напряжение:

$$u_\delta(t) = \frac{R_\delta + Z_1}{R_\delta + Z_1 + R_{lx} + R_{n\phi}} U_{onm} \sin(\omega t + \pi). \quad (3)$$

Напряжение $u_\delta(t)$ снимается с последовательной цепи R_δ , Z_1 (рис. 2,б).

Каждому диаметру проводника при одном и том же ρ соответствует свое соотношение между U_m и U_{onm} , которое определяется равенством (4):

$$\frac{U_{onm}}{U_m} = \frac{R_l}{R_\delta}. \quad (4)$$

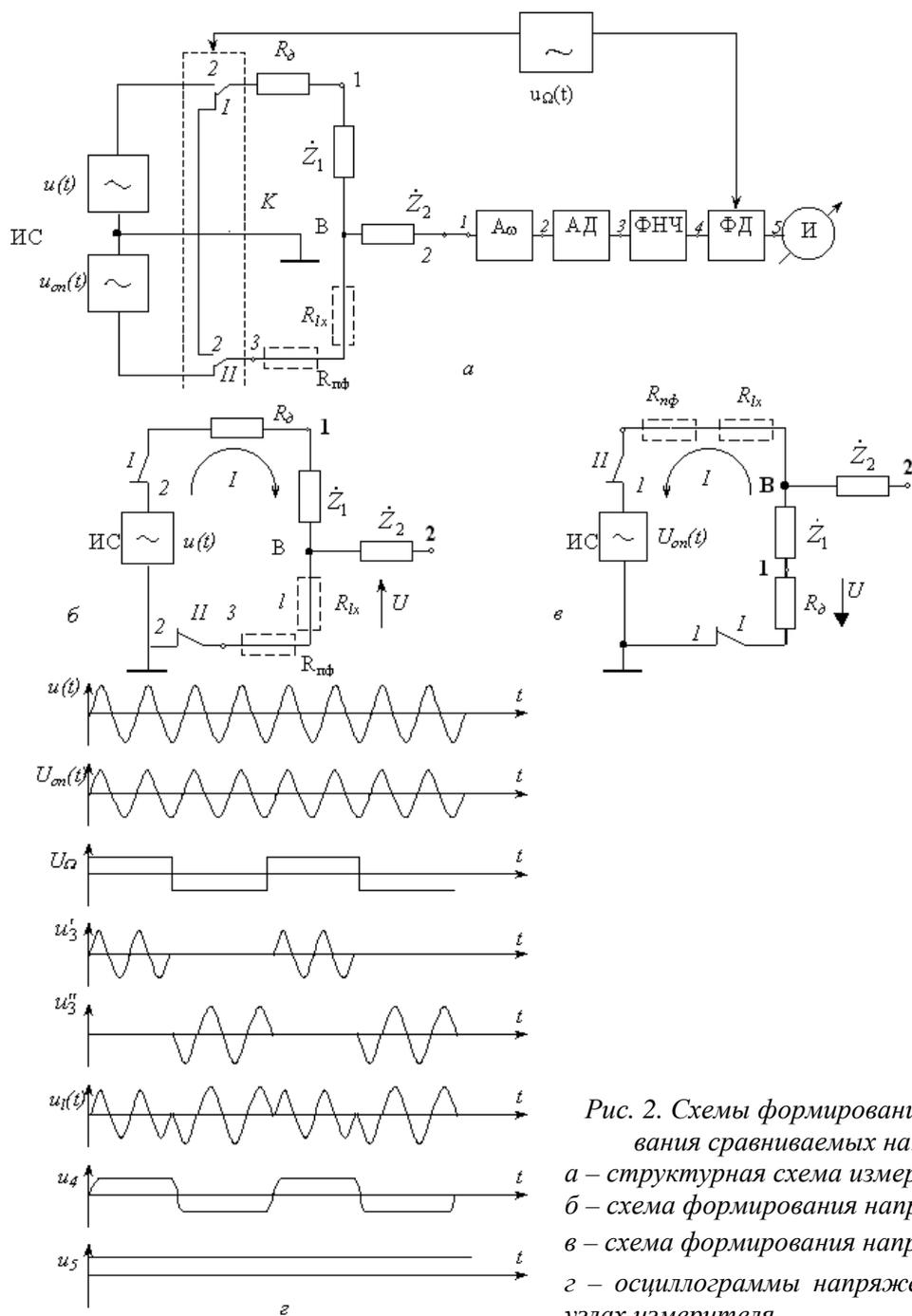


Рис. 2. Схемы формирования и преобразования сравниваемых напряжений:
 а – структурная схема измерителя;
 б – схема формирования напряжения $u(t)$;
 в – схема формирования напряжения $u_0(t)$;
 г – осциллограммы напряжений в основных узлах измерителя.

Таким образом, при непрерывном функционировании коммутатора на усилитель A_ω воздействует напряжение $u_1(t)$ (рис. 2,г), состоящее из пакетов радиоимпульсов $u_1(t)$ и $u_0(t)$, сдвинутых по фазе относительно друг друга на π . Напряжение $u_1(t)$, усиленное усилителем A_ω , возбуждает амплитудный детектор АД. На выходе АД при этом образуется напряжение u_3^1 , равное

$$u_3 = u_3^1 = \frac{k_{21}k_{10}S_{32}\omega}{2\pi} \cdot \frac{(R_{lx} + R_{nph})}{R_d} \int_0^{\pi/\omega} U_m \sin(\omega t) dt. \quad (5)$$

При воздействии напряжения $u_0(t)$ на усилительный тракт на выходе детектора образуется напряжение u_3^2 , равное

$$u_3 = u_3^2 = \frac{k_{21}k_{10}S_{32}\omega}{2\pi} \cdot \frac{R_l}{R_d} \int_0^{\pi/\omega} U_{om} \sin(\omega t + \pi) dt. \quad (6)$$

Таким образом, на выходе детектора будет присутствовать переменное напряжение с амплитудой U_m и частотой Ω , равное

$$U_{m4} = \frac{k_{43}\Omega}{2\pi} \left[\int_0^{\pi/\omega} u_3' dt - \int_0^{\pi/\omega} u_3'' dt \right]. \quad (7)$$

В выражениях (5)–(7) приняты обозначения: k_{10} – коэффициент передачи полюса с импедансом Z_2 на частоте измерительного сигнала ω , k_{21} – коэффициент передачи усилителя $A\omega$, S_{32} – крутизна характеристики преобразования амплитудного детектора АД, k_{43} – коэффициент передачи фильтра низких частот. С учетом выражений (5)–(7) напряжение на выходе фазового детектора равно

$$U_{\phiД} = k_{10}k_{21}k_{43}k_{54}S_{32}U_{m4} \frac{R_l - (R_{lx} + R_{n\phi})}{R_0}, \quad (8)$$

где k_{54} – коэффициент передачи фазового детектора.

Условием получения проводника заданного диаметра является выполнение равенства:

$$R_{lx} + R_{n\phi} = R_l. \quad (9)$$

Из соотношения (9), с учетом (1), получим

$$R_{lx} = 4\rho \frac{l}{\pi d^2} = R_l - R_{n\phi} = 4\rho_{30} \frac{l}{\pi d_{30}^2} - 4\rho \frac{l_{n\phi}}{\pi D_{n\phi}^2}. \quad (10)$$

Когда $\rho = \rho_{30}$, выражение (10) принимает вид:

$$\frac{l}{d^2} = \frac{l}{d_{30}^2} - \frac{l_{n\phi}}{D_{n\phi}^2}, \quad (11)$$

откуда

$$d = d_{30} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{l_{n\phi}}{l} \left(\frac{d_{30}}{D_{n\phi}} \right)^2}} > d_{30}. \quad (12)$$

Когда $\frac{l_{n\phi}}{l} \left(\frac{d_{30}}{D_{n\phi}} \right)^2 \ll 1$ (как правило, $d_{30} \ll D_{n\phi}$), тогда

$$d = d_{30}. \quad (13)$$

Относительная погрешность измерения истинного значения диаметра получаемого проводника, обусловленная конечным значением отношения $l_{n\phi} d_{30}^2 / l D_{n\phi}^2$, равна

$$\delta = \frac{(d_{30} - d)}{d_{30}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{l_{n\phi} d_{30}^2}{l D_{n\phi}^2}}}. \quad (14)$$

Выбор несущей частоты ω . В приведенных выше выражениях предполагалось, что индуктивная составляющая сопротивления проводника пренебрежимо мала по сравнению с его омическим сопротивлением. Это допущение справедливо только в случае правильного выбора частоты измерительного сигнала ω .

Индуктивность проводника определяется выражением [7]:

$$L_l = 5,08 \cdot 10^{-3} l \left(\ln \frac{l}{\pi r} + 1,193 + 0,223 \frac{\pi r}{l} \right) [\text{нГн}], \quad (15)$$

где l и r измеряются в мм, r – радиус проводника.

Например, проводник диаметром 2–200 мкм и длиной 500 мм имеет индуктивность:

$$L_l = 5,08 \cdot 10^{-3} l \left(\ln \frac{l}{\pi r} + 1,193 + 0,223 \frac{\pi r}{l} \right) = 5,08 \cdot 10^{-3} 500 \cdot 0,0254.$$

$$\left(\ln \frac{500}{\pi(1-100) \cdot 10^{-3}} + 1,193 + 0,223 \cdot 3,14 \frac{(1-100)10^{-3}}{500} \right) = 0,85 - 0,55 [\text{нГн}]$$

В случае неправильного выбора рабочей частоты индуктивная составляющая сопротивления приводит к погрешностям в измерении поперечного сечения проводника. Эквивалентное сопротивление проводника на переменном токе определяется выражением: $Z_l = R_l + j\omega L_l$.

Абсолютная и относительная погрешности измерения сопротивления проводника, обусловленные индуктивной составляющей сопротивления, определяются выражениями (16) и (17) соответственно:

$$\Delta R = R_l - R_{lx} = \frac{4\rho}{\pi} \left(\frac{l}{d_{30}^2} - \frac{l}{d^2} \right) = 2\pi fl \cdot 5,08 \cdot 10^{-12} \left(\ln \frac{2l}{\pi d} + 1,193 + 0,223 \frac{\pi d}{2l} \right), \quad (16)$$

$$\delta_R = \frac{R_l - R_{lx}}{R_l} = \frac{d_{30}^2 - d^2}{d_{30}^2} = \frac{10,16 \cdot 10^{-12} \pi fl \left(\ln \frac{2l}{\pi d} + 1,193 + 0,223 \frac{\pi d}{2l} \right)}{4\rho \frac{l}{\pi d_{30}^2}}. \quad (17)$$

Диаметр d представим следующим образом:

$$d = d_{30} \pm \Delta d. \quad (18)$$

С учетом выражения (18) и принимая, что $(\Delta d)^2 \ll (d_{30}^2 \pm 2d_{30}\Delta d)$, уравнение (17) принимает вид:

$$\delta_R \approx \frac{d_{30}^2 \pm 2d_{30}\Delta d - d_{30}^2}{d_{30}^2} = \pm 2 \frac{\Delta d}{d_{30}} = \pm 2\delta_d = \pm 25 \cdot 10^{-12} \frac{d_{30}^2}{\rho} f \left(\ln \frac{2l}{\pi d} + 1,193 + 0,223 \frac{\pi d}{2l} \right),$$

откуда следует, что

$$\delta_d = \pm \frac{\delta_R}{2} = \pm 12,5 \cdot 10^{-12} f \frac{d_{30}^2}{\rho} \left(\ln \frac{2l}{\pi d} + 1,193 + 0,223 \frac{\pi d}{2l} \right). \quad (19)$$

Диаметры измеряются в миллиметрах.

Для заданного значения погрешности δ_d , частота измерительного сигнала выбирается из условия (20):

$$f \leq \delta_d \frac{\rho}{12,5 \cdot 10^{-12} d_{30}^2 \left(\ln \frac{2l}{\pi d} + 1,193 + 0,223 \frac{\pi d}{2l} \right)}. \quad (20)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Donici V., Pîrvulescu M. Transmisiuni prin fibre optice. Bucureşti, Editura Militară, 1994.
2. А.с. 85986 СССР. Способ получения металлической микропроволоки из жидкого металла / Улитовский А.В., Аверин Н.М. Оpubл. 1964. Бюл. № 5.
3. А.с. 149168 СССР. Способ изготовления литых проводов в сплошной стеклянной изоляции / Красиньков В.Г., Реман А.В., Трояновский В.В. Оpubл. 1965. Бюл. № 3.
4. Патент 9902 Япония. Способ получения микропровода со стеклянной изоляцией / Хоси Цунзо, Сэкигуби Такаси, Сева Дэнси, Кабусики Кайся.
5. Патент 3302803 США. Способ получения проводов в стеклянной изоляции / Walter Dannohl.
6. Дегтярь Л.Э., Зеликовский З.И., Цетенс В.П. Измерение погонного сопротивления микропровода в процессе литья // В сб. Микропровод и приборы сопротивления. Вып. 1. Кишинев, 1962, С. 2431.
7. Coulton M., Pool W. E. Проектирование усилителей СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами // Электроника. 1968. № 8. С. 9–21.

Поступила 04.04.2001

Summary

In this paper there is treating an electrical measuring method of conductor (semi-conductor) cross-section in insulation coat during its production by draw from melt; there are analyzes its errors and presenting extreme possibility of this method; there is presenting a block-scheme of arrangement which is realizing this method.