

## Л и т е р а т у р а

1. В и л о п Л.Э., С к о б е л е в О.П. Многоточечная система измерения деформаций с токовым входом. Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Тензометрия-76" Кишинев, 1976.
2. В и л о п Л.Э., С к о б е л е в О.П. Подсистема сбора информации с тензорезисторных датчиков. В сб.: Автоматизация экспериментальных исследований, Куйбышев, КуАИ, 1976.

Б.К. Райков, Н.Л. Юмашева

### О ЛИНЕАРИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Основными требованиями, предъявляемыми к измерению температур при медико-биологических исследованиях, являются требования высокой чувствительности и точности. Диапазон температур, как правило, ограничен несколькими десятками градусами.

В этих условиях наиболее приемлемы полупроводниковые терморезисторы (ПТР), обладающие высокой чувствительностью, малой инерционностью, простотой конструкции. Существенным недостатком ПТР является значительная нелинейность его характеристики, хорошо описываемой выражением

$$R_T = R_{\infty} e^{\frac{A}{T}}$$

Известны различные способы линеаризации характеристики ПТР [1], [2]. Недостатком их является значительное уменьшение чувствительности.

Предлагается способ преобразования сопротивления терморезистора на основе тестового переходного процесса в апериодической мостовой цепи. Результат преобразования - временной интервал:

$$t = \tau \ln \left( 1 + \frac{R}{R_T} \right), \quad (1)$$

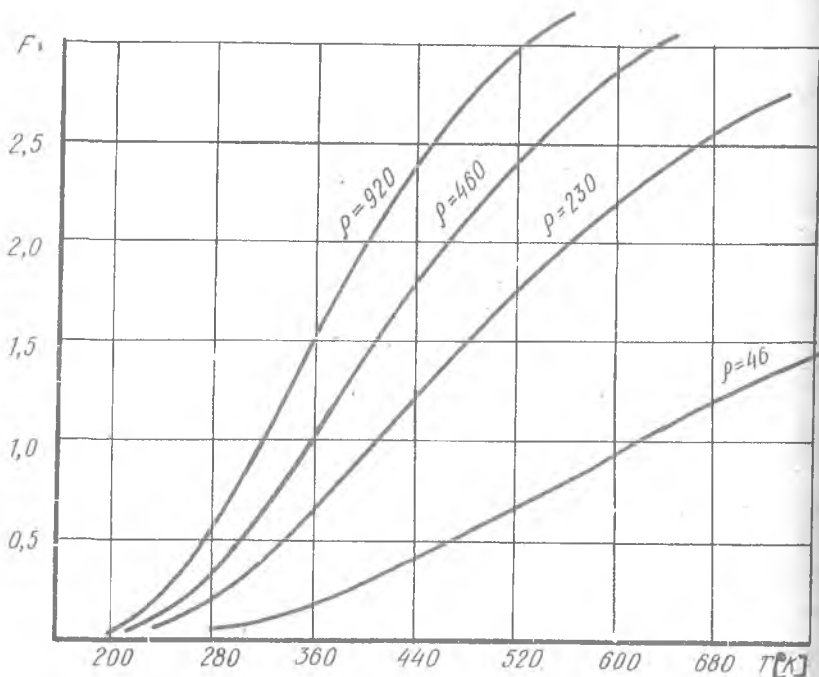
где  $\tau$  - постоянная времени апериодической ветви моста;  
 $R$  - параметр цепи.

Достоинством такого преобразования является хорошая линейность характеристики и высокая чувствительность.

Нормируя  $t$  по  $\tau$  и обозначив  $\rho = R/R_\infty$ , уравнение (1) можно свести к виду

$$F = \ln \left( 1 + \rho e^{-\frac{B}{T}} \right). \quad (2)$$

Графики функции (2) для различных  $\rho$ , представлены на рис. 1



Р и с. 1. Графики функции  $F = \ln \left( 1 + \rho e^{-\frac{B}{T}} \right)$  для ПТР с параметрами  $B = 2000$ ,  $R_T / T - 20^\circ\text{C} = 20 \text{ км}$

Как видно из графиков, с ростом  $\rho$  точка перегиба функции (2) смещается влево, увеличивается чувствительность, но уменьшается линейный участок кривой.

При выборе режима (величина  $\rho$ ) ведущим требованием может быть или требование высокой чувствительности, или требование минимальной погрешности нелинейности в заданном диапазоне.

В данной статье рассматривается второе условие, т.е. для заданного интервала температур необходимо подобрать такое  $\rho_{opt}$  (а, следовательно,  $R$ ), чтобы в этом интервале функция (2) была бы наиболее линейна. Нелинейность будем определять по среднеквадратичному отклонению кривой от аппроксимирующей ее прямой.

Следует отметить, что интегральный метод наименьших квадратов приводит к интегралу, который в элементарных функциях не выражается. Поэтому для определения  $\rho_{opt}$  и коэффициентов аппроксимирующей прямой  $f = A + B_S T$  использовался дискретный метод наименьших квадратов.

Для определения искомых величин, запишем условие:

$$Q = \sum_{i=1}^N [F(T_i) - (A + B_S T_i)]^2 \xrightarrow{\rho, A, B_S} \min$$

Это условие выполняется, когда

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial \rho} = 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial A} = 0; \\ \frac{\partial Q}{\partial B_S} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

или

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \left[ \ln(1 + \rho e^{-\frac{B}{T_i}}) - (A + B_S T_i) \right] \frac{B}{T_i^2} \frac{\rho e^{-\frac{B}{T_i}}}{1 + \rho e^{-\frac{B}{T_i}}} \right\} = 0;$$

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \ln(1 + \rho e^{-\frac{B}{T_i}}) - (A + B_S T_i) \right\} = 0; \quad (4)$$

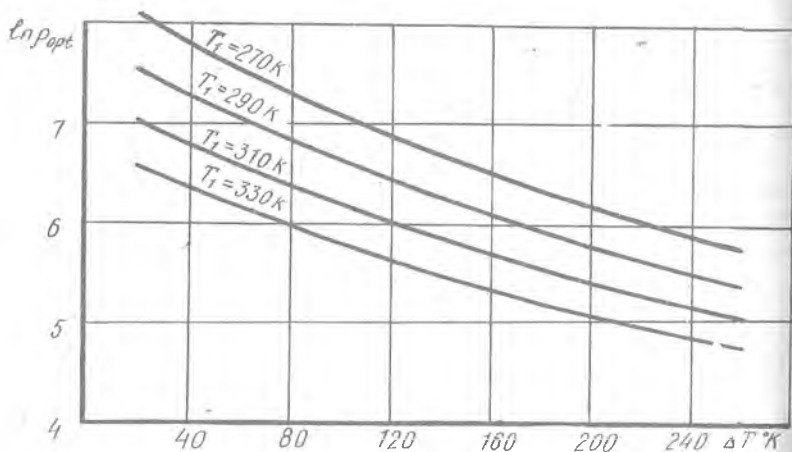
$$\sum_{i=1}^N \left\{ \left[ \ln(1 + \rho e^{-\frac{B}{T_i}}) - (A + B_S T_i) \right] T_i \right\} = 0.$$

Решая эту систему для заданных  $T_{нач} = T_1$  и  $T_{конеч} = T_N$ , получаем  $\rho_{opt}$ , коэффициенты  $A$  и  $B_S$ , а также погрешность нелинейности:

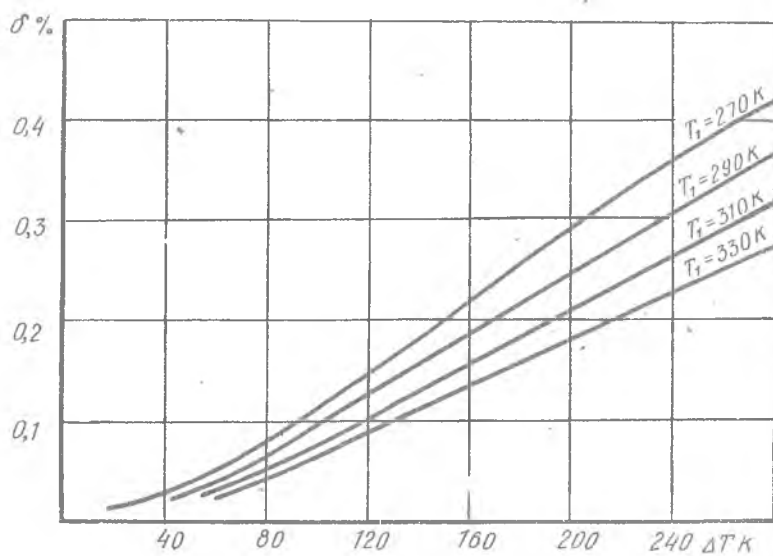
$$D = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N [F(T_i) - (A + B_S T_i)]^2}{F(T_N) - F(T_1)}.$$

Расчеты были проведены для различных диапазонов ( $\Delta T$ ) с различными начальными температурами ( $T_1$ ). Результаты представлены на рис. 2. На рис. 3 показаны погрешности нелинейности для тех же диапазонов температур.

Анализ графиков показывает, что увеличение диапазона и смещение его начала в область более высоких температур требует уменьше-



Р и с. 2. Графики функции  $\rho_{\text{р.т.}} = f(\Delta T, T_1)$



Р и с. 3. Погрешности нелинейности

ния  $\rho$ . Но это приводит, как видно из графиков рис. 1, к уменьшению чувствительности преобразователя. В то же время, погрешность нелинейности растет при увеличении диапазона и смещении его начала в область более низких температур.

Коэффициент  $B_S$ , полученный при решении системы (4), является чувствительностью преобразователя. В то же время, ввиду малости погрешности нелинейности, чувствительность ориентировочно можно определить как производную уравнения (1) в точке перегиба ( $T_n$ ), которая лежит внутри рабочего диапазона:

$$S = \frac{dF}{dT} \Big|_{T=T_n} = \frac{B}{T_n^2} - \frac{2}{T_n}$$

В заключение дадим таблицу сравнительной оценки линеаризации характеристики ПТР: 1) способом, описанным в работе [1] и 2) - предложенным для терморезистора с  $B = 2000^\circ\text{K}$  и  $R_T = 20 \text{ кОм}$  при  $20^\circ\text{C}$  в диапазоне температур  $+20 - +80^\circ\text{C}$ .

Погрешность нелинейности (%)	Относительная чувствительность преобразования (1/°C)
2,5	$1,3 \cdot 10^{-3}$
0,2	$13 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, предложенный способ обеспечивает при равных условиях на порядок меньшую погрешность нелинейности при гораздо более высокой чувствительности.

#### Л и т е р а т у р а

1. Петров В.А., Елин А.В. Расчет настройки неравновесного моста с нелинейным преобразователем сопротивления. "Измерительная техника", 1973, № 6.

2. Удазов Н.П. Полупроводниковые датчики. М.-Л., "Энергия", 1965.