

*В.С. ВОЛКОВ, И.Н. БАРИНОВ*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДАТЧИКОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания к выполнению курсовых и лабораторных работ

ПЕНЗА 2013

## Лабораторная работа № 1

### Исследование температурного коэффициента сопротивления чувствительных элементов датчиков, выполненных из полупроводниковых материалов

#### Основные сведения

В мостовых схемах на основе полупроводниковых тензорезисторов отмечается значительная зависимость коэффициента тензочувствительности от температуры по сравнению со схемами на основе металлических тензорезисторов, что в ряде случаев приводит к существенным температурным погрешностям. Такие схемы после изготовления представляют собой неуравновешенные мосты с выходным сигналом при начальной температуре не равным нулю, а при изменении температуры от начальной до максимальной еще и дополнительно изменяющимся. Уменьшить эту зависимость можно с помощью компенсационных методов и схем, когда неуравновешенные мосты преобразовываются в уравновешенные с выходным сигналом, не зависящим от изменения температуры. Зависимость сопротивления от температуры имеет чрезвычайно большую кривизну, что затрудняет компенсацию.

Зависимость изменения сопротивления полупроводникового тензорезистора от температуры характеризуется при помощи температурного коэффициента сопротивления (ТКС):

$$\gamma = \frac{R_{(T_{\max})} - R_{(T_{\min})}}{R_{(T_{\min})} \cdot \Delta T} 100\%. \quad (1)$$

Самостоятельные тензометрические преобразователи, имеющие в своем составе полупроводниковые ЧЭ, как правило, питаются от источника напряжения. Температурная зависимость выходного сигнала ЧЭ датчиков давлений является главным источником дополнительной погрешности преобразования. В этом случае для эффективной термокомпенсации выходного сигнала используется схемотехнический метод.

Температурная погрешность тензорезистивных измерительных преобразователей характеризуется температурными коэффициентами ухода чувствительности и начального выходного сигнала.

Температурный коэффициент ухода чувствительности рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{U_{\max(T_{\max})} - U_{\max(T_{\min})}}{U_{\max(T_0)} \cdot \Delta T} 100\%$$

где  $U_{\max(T_{\max})}$  - значение максимального выходного сигнала при максимальной температуре,

$U_{\max(T_{\min})}$  - значение максимального выходного сигнала при минимальной температуре.

$U_{\max(T_0)}$  - значение максимального выходного сигнала при нормальной температуре (25<sup>0</sup>С).

Температурный коэффициент ухода начального выходного сигнала рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{U_{0(T_{\max})} - U_{0(T_{\min})}}{U_{\max(T_0)} \cdot \Delta T} 100\%$$

где  $U_{0(T_{\max})}$  - значение начального выходного сигнала при максимальной температуре,

$U_{0(T_{\min})}$  - значение начального выходного сигнала при минимальной температуре.

В исследуемом ЧЭ используется тензочувствительная схема в виде активного моста с четырьмя тензорезисторами  $R_1 - R_4$ , два из которых ( $R_1$  и  $R_3$ ) увеличивают свое сопротивление под влиянием деформации ЧЭ, вызванной воздействием измеряемого механического параметра  $P$  (давления), а два других ( $R_2$  и  $R_4$ ) – уменьшают. Начальные сопротивления тензорезисторов при отсутствии деформации ЧЭ одинаковы, то есть мост сбалансирован при начальной температуре  $T_0$  и  $R_1 = R_3$ , а  $R_2 = R_4$ .

Коррекция аддитивной составляющей температурной погрешности наиболее просто осуществляется включением постоянного резистора параллельно одному из плеч измерительного моста с наибольшим значением температурного коэффициента сопротивления (рисунок 1).

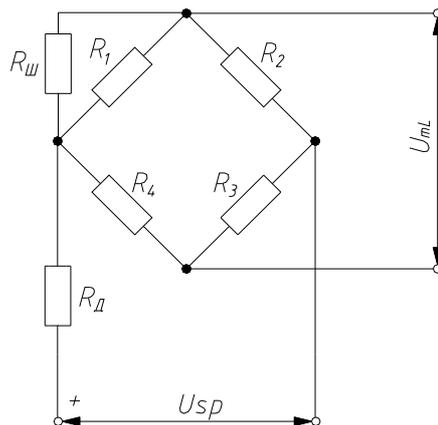


Рис. 1 – Схема включения резистора для термокомпенсации ЧЭ при питании постоянным напряжением

Значение резистора  $R_{ш}$  выбирается из условия равенства начального выходного сигнала ПТЧЭ при двух температурах  $T_1$  и  $T_2$ , соответствующих границам температурного диапазона компенсации:

$$\frac{R_{ш}(R_1^2(T_1) - R_2^2(T_1)) - R_1^2(T_1)R_2^2(T_1)}{(R_1(T_1)R_2(T_1) + R_{ш}(R_1(T_1) + R_2(T_1)))(R_1(T_1) + R_2(T_1))} = \frac{R_{ш}(R_1^2(T_2) - R_2^2(T_2)) - R_1^2(T_2)R_2^2(T_2)}{(R_1(T_2)R_2(T_2) + R_{ш}(R_1(T_2) + R_2(T_2)))(R_1(T_2) + R_2(T_2))},$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – значения тензорезисторов в смежных плечах измерительного моста.

Для коррекции мультипликативной составляющей температурной погрешности в питающую диагональ измерительного моста последовательно включается постоянный резистор  $R_d$  (см. рис.1), значение которого рассчитывается по формуле:

$$R_d = \frac{R_M(T_1)R_M(T_2)(U_d(T_2) - U_d(T_1))}{R_M(T_1)U_d(T_1) - R_M(T_2)U_d(T_2)}.$$

Распространенными также являются схемы температурной компенсации, основанные на использовании термозависимых резисторов. При питании от источника постоянного напряжения для компенсации могут быть применены две основные схемы. По схеме, представленной на рис. 2, а, термозависимое сопротивление, пространственно размещаемое как можно ближе к полупроводниковым тензорезисторам, включается последовательно в цепь питания моста и должно обладать отрицательным

ТКС, а для схемы, представленной на рисунке 2, б – положительным ТКС (резисторы  $R_1 - R_4$  имеют положительный ТКС).

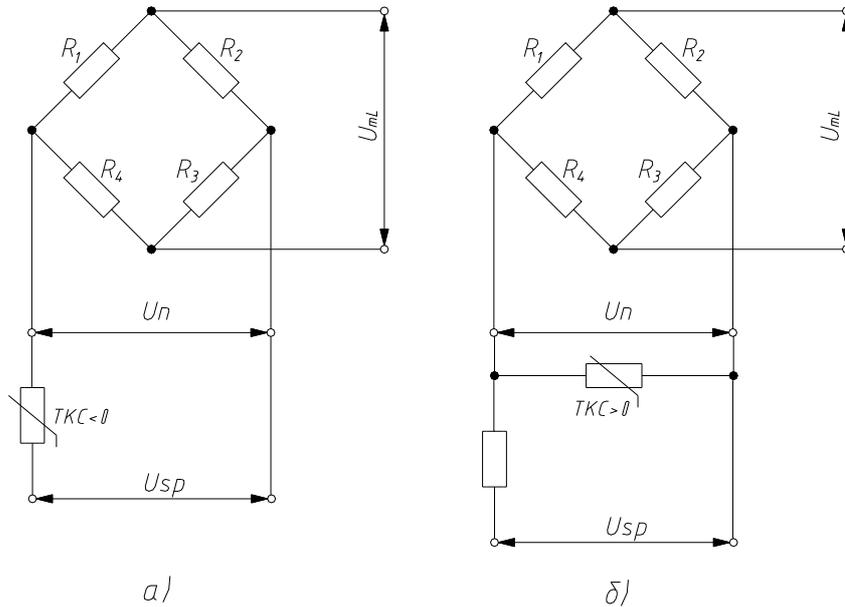


Рис. 2 – Основные схемы температурной компенсации коэффициента тензочувствительности моста

Значение ТКС для полупроводниковых терморезисторов может лежать в диапазоне  $\pm(0,2...0,8)\%/^{\circ}\text{C}$ . Вследствие сравнительно низких значений ТКС такого компенсирующего резистора последний по отношению к мосту должен быть низкоомным при параллельном включении, в то время как последовательно включенное сопротивление должно быть равно сопротивлению моста или больше его. Расчет схемы температурной компенсации проводится для линейных температурных зависимостей моста и терморезистора.

Условием температурного баланса мостовой схемы с четырьмя тензорезисторами может служить равенство:

$$R_1(t)R_4(t) = R_2(t)R_3(t), \quad (2)$$

где  $R_1(t) \div R_4(t)$  - температурные характеристики тензорезисторов.

В случае задания температурных характеристик в виде:

$$R(t) = R \cdot [1 + \gamma \cdot (t - t_{\text{НОМ}})], \quad (3)$$

где  $R$  – сопротивление тензорезистора, измененное при температуре окружающей среды  $t_{\text{ном}}$ , Ом;  $\gamma$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

Равенство (1.5) преобразуется в систему уравнений:

$$\begin{cases} R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3 = 0 \\ R_1 \cdot R_4 \cdot (\gamma_{R_1} + \gamma_{R_4}) - R_2 \cdot R_3 \cdot (\gamma_{R_2} + \gamma_{R_3}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Следовательно, физически цель температурной компенсации ухода нуля преобразователя состоит в балансировке моста с одновременным уравниванием ТКС его плеч.

Расчет схемы термокомпенсации с использованием термонеzависимых резисторов производится в следующей последовательности:

1 На основании значений сопротивлений тензорезисторов, измеренных при двух различных температурах, рассчитываются значения температурных коэффициентов  $\gamma_{R_1} - \gamma_{R_4}$  для сопротивлений  $R_1 - R_4$  по формуле:

$$\gamma_{R_1-R_4} = \frac{R_i^{25} - R_i^{-20}}{R_i^{-20} \cdot \Delta T}, \quad (5)$$

где  $R_i^{25}$  - сопротивление при температуре 25 °С, Ом;

$R_i^{-20}$  - сопротивление при температуре минус 20 °С, Ом;

$\Delta T$  - разность температур.

2 Определяются контрольные соотношения температурных коэффициентов по формулам:

$$C_1 = (\gamma_{R_1} + \gamma_{R_4} - \gamma_{R_3}) / \gamma_{R_2}, \quad (6)$$

$$C_2 = (\gamma_{R_2} + \gamma_{R_3} - \gamma_{R_4}) / \gamma_{R_1}, \quad (7)$$

$$C_3 = (\gamma_{R_2} + \gamma_{R_3} - \gamma_{R_1}) / \gamma_{R_4}, \quad (8)$$

$$C_4 = (\gamma_{R_1} + \gamma_{R_4} - \gamma_{R_2}) / \gamma_{R_3}, \quad (9)$$

$$C_5 = R_1 \cdot R_4 / R_2 \cdot R_3, \quad (10)$$

$$C_6 = R_2 \cdot R_3 / R_1 \cdot R_4, \quad (11)$$

где  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – номиналы тензорезисторов при температуре плюс 25 °С.

3 По контрольным соотношениям определяется, в какие плечи моста будут включаться сопротивления  $R_d, R_{ш}$  (таблица 1). Например, при  $C_1 > C_5$  и  $C_2 > C_5$  добавочное сопротивление  $R_d$  будет включено в первое плечо, а шунтирующее сопротивление  $R_{ш}$  во второе плечо

Таблица 1

№	Контрольное соотношение	Номер плеча моста		Формулы для вычисления		
		$R_d$	$R_{ш}$	$k$	$R_d$	$R_{ш}$
1	$C_1 > C_5$ $C_2 > C_5$	1	2	$\frac{\gamma_4 - \gamma_3}{2\gamma_2} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_4 - \gamma_3}{2\gamma_1}\right)^2} + \frac{R_1 R_4 \gamma_1}{R_2 R_3 \gamma_2}$	$\frac{R_2 R_3}{R_4} k - R_1$	$R_2 \frac{k}{1-k}$
2	$C_1 > C_6$ $C_2 > C_6$	2	1	$\frac{\gamma_3 - \gamma_4}{2\gamma_1} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_1 - \gamma_4}{2\gamma_1}\right)^2} + \frac{R_2 R_3 \gamma_2}{R_1 R_4 \gamma_1}$	$\frac{R_1 R_4}{R_3} k - R_2$	$R_1 \frac{k}{1-k}$
3	$C_3 > C_6$ $C_4 > C_6$	3	4	$\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2\gamma_4} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{2\gamma_4}\right)^2} + \frac{R_2 R_3 \gamma_3}{R_1 R_4 \gamma_4}$	$\frac{R_1 R_4}{R_2} k - R_3$	$R_4 \frac{k}{1-k}$
4	$C_3 > C_5$ $C_4 > C_5$	4	3	$\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2\gamma_3} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2\gamma_3}\right)^2} + \frac{R_1 R_4 \gamma_4}{R_2 R_3 \gamma_3}$	$\frac{R_3 R_2}{R_1} k - R_4$	$R_3 \frac{k}{1-k}$
5	$C_2 < C_5$ $C_3 < C_6$	1	4	$\frac{\gamma_2 + \gamma_3}{\gamma_4 + \gamma_1} \frac{R_1 R_4}{R_2 R_3}$	$\frac{R_2 R_3}{R_4 k} - R_1$	$R_4 \frac{k}{1-k}$

№	Контроль ное соотноше ние	Номер плеча моста		Формулы для вычисления		
		$R_{\text{д}}$	$R_{\text{ш}}$	$k$	$R_{\text{д}}$	$R_{\text{ш}}$
6	$C_3 < C_5$ $C_2 < C_6$	4	1	$\frac{\gamma_2 + \gamma_3}{\gamma_1 + \gamma_4} \frac{R_1 R_4}{R_2 R_3}$	$\frac{R_2 R_3}{R_1 k} - R_4$	$R_1 \frac{k}{1 - k}$
7	$C_1 < C_6$ $C_4 < C_5$	2	3	$\frac{\gamma_1 + \gamma_4}{\gamma_3 + \gamma_2} \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4}$	$\frac{R_1 R_4}{R_3 k} - R_2$	$R_3 \frac{k}{1 - k}$
8	$C_4 < C_6$ $C_1 < C_5$	3	2	$\frac{\gamma_1 + \gamma_4}{\gamma_2 + \gamma_3} \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4}$	$\frac{R_1 R_4}{R_2 k} - R_3$	$R_2 \frac{k}{1 - k}$
9	$C_2 > C_5$ $C_4 > C_5$	1	3	$\frac{\gamma_4 - \gamma_1}{2\gamma_3} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_4 - \gamma_1}{2\gamma_1}\right)^2} + \frac{R_1 R_4 \gamma_1}{R_2 R_3 \gamma_3}$	$\frac{R_2 R_3}{R_4} k - R_1$	$R_3 \frac{k}{1 - k}$
10	$C_4 > C_6$ $C_2 > C_6$	3	1	$\frac{\gamma_2 - \gamma_4}{2\gamma_1} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_2 - \gamma_4}{2\gamma_1}\right)^2} + \frac{R_2 R_3 \gamma_3}{R_1 R_4 \gamma_1}$	$\frac{R_1 R_4}{R_2} k - R_3$	$R_1 \frac{k}{1 - k}$
11	$C_1 > C_6$ $C_3 > C_6$	2	4	$\frac{\gamma_3 - \gamma_1}{2\gamma_4} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_3 - \gamma_1}{2\gamma_4}\right)^2} + \frac{R_2 R_3 \gamma_1}{R_1 R_4 \gamma_4}$	$\frac{R_1 R_4}{R_3} k - R_2$	$R_4 \frac{k}{1 - k}$
12	$C_3 > C_5$ $C_1 > C_5$	4	2	$\frac{\gamma_3 - \gamma_3}{2\gamma_2} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_1 - \gamma_3}{2\gamma_2}\right)^2} + \frac{R_1 R_4 \gamma_4}{R_2 R_3 \gamma_2}$	$\frac{R_2 R_3}{R_1} k - R_4$	$R_2 \frac{k}{1 - k}$

$$* c_1 = \left( \frac{\gamma_1 + \gamma_4 - \gamma_3}{\gamma} \right); c_2 = \left( \frac{\gamma_2 + \gamma_3 - \gamma_4}{\gamma} \right); c_3 = \left( \frac{\gamma_2 + \gamma_3 - \gamma}{\gamma_1} \right); c_4 = \left( \frac{\gamma_1 + \gamma_4 - \gamma_2}{\gamma_3} \right); c_5 = \frac{R_1 R_4}{R_2 R_3};$$

$$c_6 = \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4}$$

Такое включение компенсационных резисторов  $R_{\text{д}}$  и  $R_{\text{ш}}$  приводит к изменению параметров температурных характеристик плеч моста в соответствии со следующими зависимостями:

$$R'_i = R_i \cdot \frac{R_{\text{ш}}}{R_i + R_{\text{ш}}}; \gamma'_{R_i} = \gamma_{R_i} \cdot \frac{R_{\text{ш}}}{R_i + R_{\text{ш}}} \quad (12)$$

$$R'_j = R_j + R_{Д}; \gamma'_{R_j} = \gamma_{R_j} \cdot \frac{R_j}{R_j + R_{\lambda}}, \quad (13)$$

где  $R'_i, R'_j$  - сопротивления плечей с учетом включения  $R_{ш}$  и  $R_{д}$  и соответственно, Ом;

3 Вычисляются сопротивления и ТКС плечей с учетом компенсационных резисторов по формулам (11) и (12), их значения не должны превышать допуска, заданного для данных тензорезисторов.

#### Порядок выполнения работы

- 1 При помощи цифрового термометра измерить температуру окружающей среды, записать полученное значение  $T_0$ .
- 2 Измерить сопротивление тензорезисторов  $R_1 - R_4$  и терморезисторов  $R_5, R_6$  при данной температуре  $T_0$ .
- 3 Установить пластину с ЧЭ на нагревательный элемент, включить питание нагревательного элемента.
- 4 Нагревать чувствительный элемент в течении 20 минут.
- 5 Измерить температуру ЧЭ  $T_1$ , записать полученное значение.
- 6 Измерить сопротивление тензорезисторов  $R_1 - R_4$  и терморезисторов  $R_5, R_6$  при данной температуре  $T_1$ .
- 7 Используя выражение (1), определить значения ТКС для тензорезисторов  $R_1 - R_4$  и терморезисторов  $R_5, R_6$ .
- 8 Сравнить полученные значения с данными таблицы 2 (см. лабораторную работу №1), сделать выводы.
- 12 Рассчитать схему термокомпенсации с использованием термoneзависимых резисторов на основании данных, выданных преподавателем, используя выражения (5) – (13).

## Контрольные вопросы

1 Каковы достоинства и недостатки термозависимых и термнезависимых схем компенсации температурной погрешности выходного сигнала чувствительного элемента?

2 В чем заключается цель температурной компенсации ухода нуля?

3 Для чего в процессе расчета схемы температурной компенсации проводится пересчет сопротивлений плечей моста по формулам (12) - (13)?

## Литература

- 1 Виглеб. Датчики. Устройство и применение. – М.: Мир, 1989.
- 2 Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с., ил.
- 3 Гридчин В.А., Драгунов В.П. Физика микросистем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 416 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
- 4 Полупроводниковые тензодатчики / Под ред. М. Дина. М. – Л.: Энергия, 1985. 213 с.
- 5 ГОСТ 22520-85. Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми сигналами ГСП. Общие технические условия.
- 6 Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.: ил.