

М. Г. САМЫНИНА, к. с.-х. н. В. А. ШИГИМАГА

Украина, г. Харьков, Институт животноводства НААН

E-mail: radugadata@mail.ru, vash105@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Предложено нестандартное устройство на основе полупроводниковых терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления для контактного измерения изменений температуры в установленном диапазоне. Показано влияние количества последовательно включенных термоэлементов на параметры измерительной системы, исследованы ее метрологические характеристики.

Ключевые слова: измерение изменения температуры, полупроводниковые терморезисторы, разрешающая способность, метрологические параметры.

Открытие Фарадеем в 1833 году отрицательного температурного коэффициента сопротивления у сульфида серебра положило начало развитию нового класса датчиков температуры на основе полупроводниковых терморезисторов. Их преимуществом являются высокая чувствительность электрического сопротивления к изменению температуры (в 6–10 раз больше, чем у металлических термометров сопротивления), малая инерционность, обусловленная малой теплоемкостью, и малые размеры [1]. Такие датчики отличаются высокой стабильностью и большим номинальным сопротивлением, что позволяет использовать простые вторичные измерительные приборы и не учитывать влияние сопротивления соединительных проводов [1, 2]. Полупроводниковые терморезисторы находят широкое применение в промышленной электронике в системах измерения, регулирования и компенсации температуры, теплового контроля [3], а также в сфере биомедицины [1, 4].

Существенной особенностью и отличием полупроводниковых терморезисторов является большой разброс параметров и нелинейность их температурной характеристики. При этом для расчета температуры необходимо использовать известную формулу [5], что весьма трудоемко. В связи с этим применяют схемы линеаризации с помощью параллельного или последовательного включения пассивных резисторов с сопротивлениями, практически не зависящими от температуры [5]. При этом крутизна градуировочной характеристики существенно снижается, а следовательно, снижается в разы и чувствительность схемы, которая зачастую приближается к чувствительности проволочных термометров сопротивления. Поэтому в целом полупроводниковые

терморезисторы не используются для прецизионного измерения температуры и применяются для термометров ограниченного диапазона измерения [1, 4, 6].

Снижения чувствительности измерительной системы при использовании схемы линеаризации можно избежать, если применить последовательное включение нескольких одинаковых терморезисторов. Подобный подход внедрен в практику при конструировании датчиков в виде термопар из термопар [7, 8]. При этом в доступной нам литературе не найдено информации о том, как такой способ может влиять на метрологические характеристики измерительных устройств на основе полупроводниковых терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и, следовательно, на выбор оптимальных параметров измерительной аппаратуры.

Целью данной работы являлось изучение влияния количества последовательно включенных полупроводниковых терморезисторов с отрицательным ТКС и линеаризованной температурной зависимостью на разрешающую способность измерительной схемы и основную относительную погрешность определения изменений температуры нестандартного средства измерительной техники.

Конструкция измерительной схемы и расчет ее параметров

Исследование проводили для схемы, состоящей из нескольких последовательно включенных одинаковых терморезисторов с отрицательным ТКС и включенного параллельно им резистора для линеаризации температурной характеристики терморезисторов, а также стандартного

измерительного прибора типа омметра (мульти-метра). В состав измерительной системы входят: полупроводниковые терморезисторы бусинкового типа СТЗ-14В номиналом 2,2 кОм; мультиметр UNI-T M890G; прецизионные резисторы С2-29В номинальным сопротивлением 500 Ом — 3 кОм.

Сопротивление прецизионного резистора $R_{\text{л}}$, который подключали параллельно термоэлементам для линеаризации температурной характеристики схемы определяли по формуле, которая аналогична той, что применяется в расчетах для одного терморезистора [4, 5]:

$$R_{\text{л}} = R_{\text{ТМ}} \frac{B_{\text{с}} - 2T_{\text{М}}}{B_{\text{с}} + 2T_{\text{М}}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ТМ}}$ — сопротивление схемы терморезисторов при среднем значении температуры $T_{\text{М}}$ (К) заданного диапазона.

Для нахождения входящей в формулу константы $B_{\text{с}}$ схемы последовательно соединенных терморезисторов (ее размерность К) проводили калибровку схемы при двух значениях температуры, а затем для расчета использовали формулу, которая обычно применяется для одного терморезистора [4, 5]:

$$B_{\text{с}} = 2,303 \frac{\lg R_1 - \lg R_2}{1/T_1 - 1/T_2}, \quad (2)$$

где R_1, R_2 — сопротивление (в Ом) последовательно соединенных терморезисторов при температуре, соответственно, T_1 и T_2 (в К).

Общее сопротивление схемы, зависящее от измеряемой температуры, составляет

$$R_{\text{с}} = \frac{1}{1/R_{\text{л}} + 1/(R_{\text{Т1}} + \dots + R_{\text{Тn}})}, \quad (3)$$

где $R_{\text{Т1}}, \dots, R_{\text{Тn}}$ — сопротивление терморезисторов при температуре T .

Изменения температуры, фиксируемые системой измерения, вычисляются путем умножения разрешающей способности измерительной схемы на величину изменения общего сопротивления системы, определяемую как разность показаний измерительного прибора, деленную на цену младшего разряда цифрового измерительного прибора.

Экспериментальная часть

Учитывая то, что сфера биомедицины является одним из основных направлений применения полупроводниковых терморезисторов с отрицательным ТКС, и решая исследовательскую проблему [9], для которой возникла необходимость рассмотрения подобного устройства, диапазон температуры для проведения предварительной оценки параметров схемы был фиксирован: от 36 до 42°C.

Согласно схеме измерения были определены метрологические характеристики, которые под-

лежат исследованию: разрешающая способность измерительной схемы, основная относительная погрешность определения изменений температуры и ее составляющие — относительная погрешность определения разности сопротивлений, относительная погрешность разрешающей способности схемы и погрешность квантования.

С целью определения теоретически возможного значения разрешающей способности измерительной схемы было исследовано 18 одинаковых полупроводниковых терморезисторов, которые имели отклонение $\pm 7,8\%$ от номинала. Их случайным образом включали в измерительную схему последовательно в количестве до пяти штук. Разрешающую способность схемы K вычисляли как

$$K = \Delta_d / E,$$

где Δ_d, E — цена деления младшего разряда цифрового измерительного прибора и его чувствительность соответственно, $E = \Delta_{\text{RC}} / \Delta T$.

Основную относительную погрешность определения изменения температуры вычисляли как [11]

$$\delta_{\Delta t} = \pm \sqrt{\delta_{\Delta R}^2 + \delta_K^2 + \delta_{\text{кв}}^2}, \quad (4)$$

где $\delta_{\Delta R}$ — относительное отклонение результата вычитания показаний измерительного прибора;

δ_K — относительное отклонение заданной разрешающей способности от действительного значения;

$\delta_{\text{кв}}$ — относительная ошибка квантования, возникающая в результате того, что изменения температуры фиксируются с определенным шагом.

При этом

$$\delta_{\text{кв}} = (\Delta_{\text{кв}} / \Delta_{\text{tmax}}) \cdot 100\%, \quad (5)$$

где Δ_{tmax} — диапазон температуры, в котором температурная характеристика схемы линеаризована.

Для расчета относительной погрешности определения разности двух значений сопротивления $R_{\text{с}}$, которая характеризует изменение общего сопротивления схемы при изменении температуры, были использованы выражения

$$R_{\text{с1изм}} = R_{\text{с1}} + R_{\text{с1}}(\delta_R / 100\%);$$

$$R_{\text{с2изм}} = R_{\text{с2}} + R_{\text{с2}}(\delta_R / 100\%),$$

где $R_{\text{с1изм}}, R_{\text{с2изм}}$ — результаты измерений;

$R_{\text{с1}}, R_{\text{с2}}$ — действительные значения измеряемой величины $R_{\text{с}}$, которые измерены с погрешностью $\pm \delta_R$;

δ_R — основная относительная погрешность измерительного прибора (в %).

Таким образом, для относительной погрешности определения разности двух значений было получено выражение общего вида

$$\delta_{\Delta R} = (R_{c1} \left(1 + \frac{\delta_R}{100\%}\right) - R_{c2} \left(1 + \frac{\delta_R}{100\%}\right) - (R_{c1} - R_{c2})) \cdot 100\% / (R_{c1} - R_{c2}). \quad (6)$$

после упрощения которого получаем, что

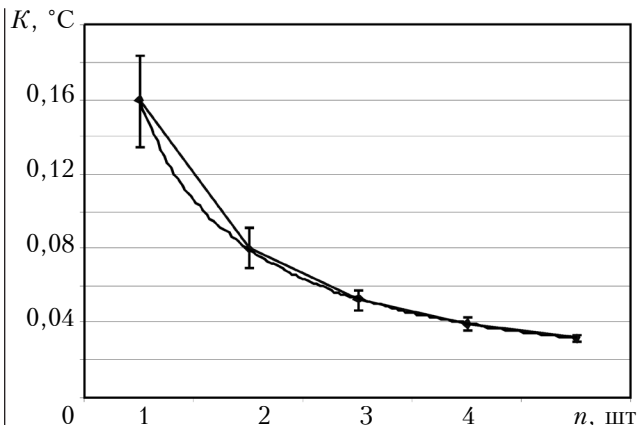
$$\delta_{\Delta R} = \delta_R. \quad (7)$$

Для того, чтобы определить относительное отклонение теоретического значения разрешающей способности измерительной схемы от ее действительного значения, необходимо установить фактическое значение чувствительности схемы к изменениям температуры. С этой целью по реперной точке, в качестве которой выбрана температура плавления галлия (29,76°C) как наиболее близкая к заданному температурному диапазону, и при выбранной произвольно температуре из этого диапазона проводили калибровку схемы с последовательным соединением терморезисторов без включения в схему прецизионного резистора, предназначенного для линеаризации температурной характеристики. По формуле (2) было определено действительное значение коэффициента B_c . Используя известное выражение [5], которое применяется для описания температурной характеристики терморезисторов с отрицательным ТКС, были определены значения сопротивления последовательно соединенных терморезисторов, соответствующие началу и концу установленного температурного диапазона. Далее при этих температурах по формуле (3) были вычислены значения общего сопротивления измерительной схемы с учетом сопротивления линеаризации, а затем — фактические значения чувствительности и разрешающей способности схемы.

Необходимые для исследования измерения проводили на базе отдела температурных и теплофизических измерений ННЦ Института метрологии (г. Харьков). Реперная точка температуры плавления галлия и температура из заданного диапазона были воспроизведены с помощью калибратора температуры ТС-660 (рабочего эталона 3-го разряда). Была предусмотрена поверка измерительного прибора (мультиметра), которую осуществляли с помощью меры (магазина) электрического сопротивления постоянного тока ММЭС Р3026 0,4.1 (класс точности 0,002).

Результаты и их обсуждение

Изменение разрешающей способности схемы при увеличении количества полупроводниковых терморезисторов, включенных в схему линеаризации, которое можно получить при $\Delta_d = 1$ Ом, показано на **рисунке**. Экспериментальные точки хорошо аппроксимируются степенной функцией $y = 0,1595x^{-1,0018}$ (коэффициент детерминации фактически равен единице). Используя эту зависимость, можно показать, что последовательное включение семи и более полупроводниковых терморезисторов в схему линеаризации приведет к получению большей чувствительности со-



Зависимость разрешающей способности схемы линеаризации терморезисторов от количества последовательно соединенных термоэлементов

противления к температуре, около 38 Ом/°C, чем в среднем у одного терморезистора данного типа до линеаризации. При этом минимальное разрешение составит 0,03°C.

Как видно из рисунка, чувствительность схемы существенно увеличивается при включении второго терморезистора — разрешающая способность улучшается на 0,08°C (в 2 раза), а при включении третьего еще на 0,03°C (в 1,5 раза). Дальнейшее увеличение уже не происходит столь стремительно, и для получения разрешения в 0,01°C необходимо последовательное включение около 16 терморезисторов данного типа, что уже вряд ли целесообразно и является одним из ограничивающих факторов при подборе оптимальных параметров устройства. Одновременно с увеличением количества включаемых терморезисторов отмечается и уменьшение величины разброса значений K , который возникает из-за разброса характеристик терморезисторов.

Оценку метрологических характеристик системы измерения провели для схемы с четырьмя последовательно включенными терморезисторами с сопротивлением согласно их паспортов 2453, 2221, 2266 и 2015 Ом при температуре 20°C (относительное отклонение сопротивления от номинального значения для данного типа термосопротивлений составляет $\pm 8,4\%$). Рассчитанные по формулам (1), (2) параметры измерительной схемы составили $B_c = 3273$ К и $R_d = 3089$ Ом. С учетом этих параметров, по формуле (3) были установлены значения общего сопротивления схемы, соответствующие границам заданного диапазона, и определена разрешающая способность схемы, которая может быть реализована, а именно: $K = 0,040085^\circ\text{C}$. В соответствии с рисунком, разрешающая способность схемы теоретически может составлять 0,04°C, поэтому относительная погрешность расчетного значения по отношению к теоретическому определена как $\delta_K = 0,2\%$.

Расчет относительной погрешности квантования проведен с учетом того, что зависимость

абсолютной погрешности квантования от измеряемой разности температур представляет собой пилообразную функцию [11], а ее максимальное значение может достигать целого шага квантования, т. е. $|\Delta_{\text{кв}}| \leq 0,04^\circ\text{C}$. Таким образом, согласно формуле (5) относительная погрешность квантования составила $\delta_{\text{кв}} = 0,7\%$.

Относительная погрешность определения разности сопротивлений схемы в соответствии с формулой (7) определяется основной относительной погрешностью измерительного прибора. Ее величина согласно паспортным данным равна $0,8\%$, поэтому $\delta_{\Delta R} = 0,8\%$. Поверка мультиметра подтвердила соответствие метрологических характеристик установленным в паспорте. Следовательно, по предварительной оценке согласно формуле (4) основная относительная погрешность определения изменения температуры должна составить $1,1\%$.

Для определения действительного значения разрешающей способности измерительной схемы при последовательном соединении четырех терморезисторов была проведена ее калибровка по реперной точке — температуре плавления галлия и при температуре из заданного диапазона без включения в схему прецизионного резистора. В **таблице** приведены результаты измерений и относительные отклонения экспериментальных данных от значений, полученных расчетным путем согласно данным паспортов.

Общее сопротивление цепи при различных T

$T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление цепи, Ом		Относительное отклонение, %
	среднее результатов измерений	расчетное	
29,76	6277	6248	0,46
38,00	4717	4694	0,49

Исходя из экспериментальных данных, было определено действительное значение коэффициента B_c , которое составило 3271 К .

При включении сопротивления линеаризации в измерительную схему фактическое значение ее общего сопротивления R_c , соответствующее температуре $38,00^\circ\text{C}$, составило 1867 Ом . Найденные с учетом полученного значения коэффициента B_c значения общего сопротивления схемы, соответствующие началу и концу диапазона, в котором температурная характеристика линеаризована, составили 1916 и 1763 Ом . Следовательно, действительное значение разрешающей способности измерительной схемы $K = 0,040092^\circ\text{C}$, а его относительное отклонение от теоретического ($0,04^\circ\text{C}$) $\delta_K = 0,2\%$. Согласно формуле (4) основная относительная погрешность определения изменения температуры составила $1,1\%$.

Таким образом, основной вклад в формирование общей погрешности измерения малых изменений температуры вносят погрешность квантования, определяемая разрешающей способностью измерительной схемы, и относительная ошибка измерения сопротивления стандартным измерительным прибором типа омметра (мультиметра). Очевидно, что увеличение количества терморезисторов приведет к улучшению разрешающей способности и уменьшению погрешности квантования, при этом измерительный прибор, возможно, целесообразно выбирать с меньшей погрешностью измерения сопротивления, чтобы реализовать максимальную точность схемы.

Следует отметить, что при использовании схемы линеаризации для измерения изменений температуры в диапазоне от 36 до 42°C с помощью одного полупроводникового терморезистора данного типа достигается точность на уровне около $3-4\%$. В этом случае возможность контролировать изменения температуры ограничена уровнем десятых долей градуса.

Выводы

Проведенные исследования нестандартного измерительного устройства на основе полупроводниковых терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления показали, что высокое разрешение по температуре в ограниченном диапазоне температур может быть достигнуто при применении схемы линеаризации. Схема с последовательным включением однотипных терморезисторов позволяет измерять изменения температуры с большой точностью, поэтому подобный подход можно использовать при разработке аппаратуры для высокоточных измерений и систем точного регулирования температуры в определенных диапазонах. В этом случае область применения полупроводниковых терморезисторов в системах, работающих в узких диапазонах температуры, будет расширяться.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Евтихий Н.Н., Купершмидт Я.А., Папуловский В.Ф., Скугоров В.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов. — Москва: Энергоатомиздат, 1990.
2. Зайцев Ю.В. Полупроводниковые резисторы. — Москва: Энергия, 1969.
3. Мэглин Э.Д. Терморезисторы. — Москва: Радио и связь, 1983.
4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. — Москва: Техносфера, 2005.
5. Виглеб Г. Датчики. — Москва: Мир, 1989.
6. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. — Москва: Техносфера, 2007.
7. Геращенко О.А., Федоров В.Г. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. — Киев: Наукова думка, 1965.
8. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. — Москва: Мир, 1990.

9. Самынина М.Г. Применение дифференциальной термометрии для повышения достоверности оценки температуры тела // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — №6/5(54) — С. 30–33.

10. Самынина М.Г. Способ построения измерительной системы для регистрации малых изменений температуры // Бионика интеллекта. — 2008. — №1(68). — С. 123–127.

11. Хромой Б.П., Кандинов А.В., Сенявский А.Л. и др. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи: Учеб. пособие для вузов. — Москва: Радио и связь, 1986.

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.09 2013 г.

М. Г. САМИНИНА, В. А. ШИГИМАГА

Україна, м. Харків, Інститут тваринництва НААН
E-mail: radugadata@mail.ru, vash105@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ЗМІН ТЕМПЕРАТУРИ

Запропоновано нестандартний пристрій на основі напівпровідникових терморезисторів з негативним температурним коефіцієнтом опору для контактного вимірювання змін температури в установленому діапазоні. Показано вплив кількості послідовно включених термоелементів на параметри вимірювальної системи, досліджено її метрологічні характеристики.

Ключові слова: вимір зміни температури, напівпровідникові терморезистори, роздільність, метрологічні параметри.

DOI: 10.15222/TKEA2014.1.52
UDC 681.2.08:53.083.62

M. G. SAMYNINA, V. A. SHIGIMAGA

Ukraine, Kharkov, Institute of animal science of NAAS
E-mail: radugadata@mail.ru, vash105@gmail.com

INVESTIGATION OF METROLOGICAL PARAMETERS OF MEASURING SYSTEM FOR SMALL TEMPERATURE CHANGES

Metrological parameters of the non-standard contact device were investigated to characterize its performance in temperature change measurements in the specified temperature range. Several series thermistors with a negative temperature coefficient of resistance connected into a linearization circuit were used as the sensing element of the semiconductor device. Increasing the number of thermistors leads to improved circuitry resolving power and reduced dispersion of this parameter. However, there is the question of optimal ratio of the number of thermistors and implemented temperature resolution, due to the nonlinear resolution dependence of the number of series-connected thermoelements. An example of scheme of four similar thermistors as the primary sensor and of a standard measuring instrument, which is working in ohmmeter mode, shows the ability to measure temperature changes at the level of hundredth of a Celsius degree. In this case, a quantization error, which is determined by a resolution of the measuring system, and the ohmmeter accuracy make the main contribution to the overall accuracy of measuring small temperature changes.

Keywords: temperature change measuring, semiconductor thermoresistors, resolution, metrological parameters.

REFERENCES

1. Evtikhiev N.N., Kupersmidt Ya.A., Papulovskii V.F., Skugorov V.N. *Izmerenie elektricheskikh i neelektricheskikh velichin* [Measurement of electrical and non-electrical quantities] Moscow, Energoatomizdat, 1990.
2. Zaitsev Yu.V. *Poluprovodnikovye rezistory* [Semiconductor resistors] Moscow, Energiya, 1969.
3. Meklin E.D. *Termorezistory* [Thermistors] Moscow, Radio i svyaz', 1983.
4. Fraiden Dzh. *Sovremennye datchiki. Spravochnik* [Modern sensors. A hand-book] Moscow, Tekhnosfera, 2005.
5. Vigleb G. *Datchiki* [Sensors] Moscow, Mir, 1989.
6. Jackson R.G. *Novel sensors and sensing*, CRC Press, 2004.
7. Gerashchenko O.A., Fedorov V.G. *Teplovye i temperaturnye izmereniya. Spravochnoe rukovodstvo* [Heat

and temperature measurement. Handbook] Kiev, Naukova dumka, 1965.

8. Maizda F. *Elelectronic techniques, instruments and measurement*, Cambridge University Press, 1987.

9. Samynina M.G. [Application of differential thermometry to improve the reliability assessment of body temperature] *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2011, no 6/5 (54), pp. 30-33.

10. Samynina M.G. [The method of constructing the measuring system for detecting small changes in temperature] *Bionika intellekta*, 2008, no 1(68), pp. 123-127.

11. Khromoi B.P., Kandinov A.V., Senyavskii A.L. i dr. *Metrologiya, standartizatsiya i izmereniya v tekhnike svyazi* [Metrology, standardization and measurement in communications technology] Moscow, Radio i svyaz', 1986.