

УДК 591.1:681.2



СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

М.Г. Самынина

Институт животноводства УААН, г. Харьков, Украина

Рассмотрена возможность повышения чувствительности измерительной системы для регистрации малых изменений температуры. Для измерения температуры в диапазоне 36–42 °С предложен способ построения схемы термопреобразователя с чувствительностью до сотых долей градуса на базе полупроводниковых термосопротивлений с номиналом около 2 кОм, при котором учитывается максимальная погрешность, возникающая при линеаризации градуировочной кривой, и диапазон измерения сопротивления – от 0 до 2 кОм на измерительном приборе.

ТЕМПЕРАТУРА, ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ПОГРЕШНОСТЬ

Введение

Для разработки кибернетических систем, в частности, искусственного интеллекта, определенную ценность представляет изучение принципов функционирования живых организмов. В зависимости от их реакции на температурные условия окружающей среды различают гомойо- и пойкилотермные организмы. Главный признак гомойотермии – характерный уровень средней температуры тела в пределах приблизительно 35–42 °С. Этот уровень поддерживается у человека и ряда животных в адекватных условиях существования. Наиболее постоянна температура центральной нервной системы. Многие исследователи привыкли считать температурный гомеостаз абсолютным. Тем не менее, хорошо известно, что любая регулирующая система (в частности, техническая) неизбежно порождает колебания регулируемой величины в процессе регуляции. Величина и период этих колебаний характеризуют способ регулирования, его точность, чувствительность и некоторые особенности регулируемой системы в целом. У человека, например, допустимые отклонения температуры мозга в зоне температурного комфорта составляют всего несколько сотых градуса, и изменение температуры на определенную величину осуществляется в соответствии с физиологическими процессами. Превышение некоторой средней температуры мозга всего на 0,06–0,08 °С может вызвать тепловой дисбаланс и ощущение перегрева [1].

За последние 30–40 лет в разных лабораториях мира подробно изучены и описаны свойства центральных и периферических терморцепторов и специфическая сигнализация от них [2–9]. Однако точный количественный смысл этой сигнализации, физиологические цели и принципы ее обработки в центре терморегуляции пока еще не имеют однозначного толкования. В связи с этим большой научный и практический интерес представляет изучение динамики изменения температуры тела у млекопитающих.

Учитывая, что имеющаяся информация недостаточна для исчерпывающего представления об основных количественных принципах деятельности центра терморегуляции в гипоталамусе и всего температурного контроля, делаются попытки решить проблему в целом с помощью математического моделирования. Например Бенцингер [10] теоретически вычислил, что у человека отклонение температуры гипоталамуса в сторону повышения всего на 0,01 °С уже может вызвать активную реакцию выведения тепла. Позже экспериментально удалось установить у человека порог сосудистой реакции на кистях рук в пределах нескольких сотых градуса (0,04–0,05 °С) [11], а также изучить эти реакции с помощью специальной прецизионной термометрии наружного слухового прохода (температура которого отражает колебания температуры барабанной перепонки и, следовательно, температуры мозга) и термометрии пальцев рук. Известное предположение о том, что в конечном счете суммация температурных сигналов в центре терморегуляции организована так, что позволяет «измерять» изменения средней температуры тела, остается лишь предположением на теоретическом уровне. Ввиду сложности системы терморегуляции Блай [12] считает, что принципиальные вопросы работы этой системы следует решать способом «черного ящика», то есть подавая на вход системы количественно идентифицированное воздействие, измерять достаточно точно количественный ответ системы на данное воздействие.

В некоторых случаях изучение взаимоотношений, возникающих в отдельных органах и системах в связи с их сопряженной деятельностью, требует высокой чувствительности измерения температуры. Регистрация малых изменений температур затруднена при значениях, сопоставимых с порогом чувствительности измерительной системы, и как следствие, невозможно наблюдать небольшие, но характерные для данного процесса колебания, в результате чего может возникнуть ложное пред-

ставление о высокой стабильности температуры в данном процессе. В связи с такой высокой точностью работы системы терморегуляции следует обеспечить высокую чувствительность измерительного тракта в целях получения необходимого разрешения по амплитуде измеряемой разности температур.

Цель работы – установить возможность повышения чувствительности измерительной системы на базе полупроводниковых термосопротивлений с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) для регистрации малых изменений температуры.

1. Особенности измерения температуры с помощью термометров сопротивления

Высокой чувствительностью к изменениям температуры обладают полупроводниковые термосопротивления, преимуществом которых перед другими типами термопреобразователей является большой отрицательный ТКС (в среднем $40 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Однако зависимость сопротивления термисторов от температуры имеет нелинейный характер. Температуру можно рассчитать по известной формуле [13], что весьма трудоемко. Поэтому целесообразно линеаризировать градуировочную характеристику. Наиболее простыми являются схемы линеаризации с помощью параллельного или последовательного подключения пассивных резисторов с сопротивлениями, практически не зависящими от температуры [13]. Существенный недостаток таких схем заключается в том, что крутизна градуировочной характеристики существенно снижается, а, следовательно, в несколько раз снижается чувствительность схемы и зачастую приближается к чувствительности проволочных термометров сопротивления.

При использовании термисторов определенному диапазону измеряемой температуры соответствует диапазон измерения прибора, измеряющего их сопротивление. Следовательно, номиналы термометров сопротивления и термнезависимых линеаризующих резисторов необходимо подбирать так, чтобы не переключать диапазон измерения сопротивления.

Известно, что при последовательном включении термопар чувствительность измерительного преобразователя увеличивается [14]. В доступной нам литературе нет информации о том, что такой же подход применяется для построения термопреобразователей на базе термосопротивлений. Очевидно, это связано с тем, что при увеличении количества термисторов необходимо переключать диапазон измерения на измерительном приборе, вследствие этого чувствительность схемы уменьшается на порядок.

2. Методика исследований

Температурная характеристика терморезистора с отрицательным ТКС описывается уравнением

$$R_T = R_{20} \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{20}} \right) \right], \quad (1)$$

где T и T_{20} – соответственно текущая температура и $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (в градусах Кельвина); R_T и R_{20} – соответственно сопротивление при температурах T и T_{20} ; B – константа терморезистора, имеющая размерность К [13].

Для наиболее эффективной линеаризации [15] сопротивление линеаризующего резистора, подключенного параллельно термосопротивлению, определяется с учетом средней температуры заданного диапазона температур по формуле:

$$R_l = R_{TM} \frac{B - 2T_M}{B + 2T_M}, \quad (2)$$

где R_l – сопротивление линеаризации, не зависящее от температуры, Ом; R_{TM} – сопротивление схемы терморезисторов, соответствующее среднему значению температуры в заданном диапазоне, Ом; T_M – средняя температура установленного диапазона, К.

Чувствительность схемы E соединения терморезисторов можно оценить по изменению сопротивления ΔR в диапазоне температур ΔT :

$$E = \frac{\Delta R}{\Delta T}.$$

Соответственно, разрешающая способность схемы определяется как величина, обратная чувствительности.

Для анализа различных схем соединения терморезисторов были использованы точечные термосопротивления СТЗ-14В номиналом $2,2 \text{ кОм} \pm \pm 20\%$ и выбран диапазон измеряемых температур $36 \div 42 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Результаты исследования

Подобно способу соединения термопар с целью увеличения чувствительности измерительного преобразователя нами рассмотрена возможность подключения нескольких терморезисторов одинакового типа. Аналог такому подходу легко найти в технике и биологии: чем больше сенсоров, тем выше чувствительность. Для построения измерительной системы за основу принято параллельное подключение сопротивления линеаризации и полупроводникового термосопротивления по общепринятой схеме (рис. 1) и определение температуры путем измерения сопротивления измерительным прибором. Для терморезистора СТЗ-14В номиналом $2,2 \text{ кОм} \pm 20\%$ при расчете по (1) крутизна температурной характеристики в заданном диапазоне температур составляет приблизительно $40 \pm 5 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$, а при линеаризации сопротивлением,

рассчитанным по (2), $-4 \pm 1 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$, и при этом минимальное изменение температуры, регистрируемое как изменение сопротивления на 1 Ом , составляет $0,25 \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$.

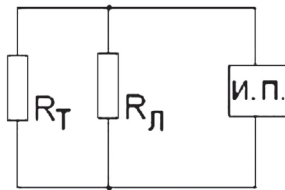


Рис. 1. Схема линейаризации температурной характеристики полупроводниковых терморезисторов с отрицательным ТКС

В связи с тем, что при параллельном подключении термосопротивлений такого же типа чувствительность схемы уменьшается, для анализа возможности повышения чувствительности схемы нами исследовались схемы комбинированного (последовательно-параллельного) и последовательного соединения терморезисторов (рис. 2), температурные характеристики которых представлены на рис. 3.

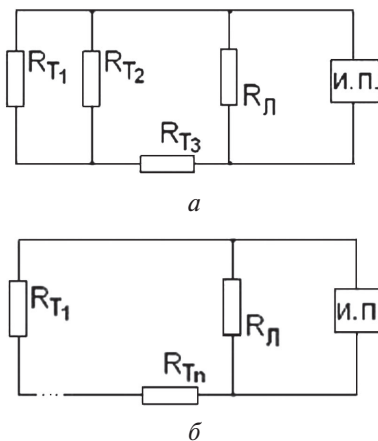


Рис. 2. Схемы соединения терморезисторов: а – параллельно-последовательное соединение; б – последовательное соединение

Чувствительность схемы комбинированного соединения термисторов (рис. 2 а) выше, чем чувствительность схемы, представленной на рис. 1, но ниже, чем у схемы соединения двух терморезисторов по принципу, изображенному на рис. 2 б. Поэтому в дальнейшем исследовании последовательно-параллельное соединение не рассматривалось. Сравнительный анализ температурных характеристик с линейризацией, рассчитанных для одного и нескольких термисторов (рис. 1 и 2 б) сопротивлением, величина которого определялась по (2), показал, что крутизна линейризованной характеристики увеличивается с увеличением количества термосопротивлений практически прямо пропорционально (рис. 3). Для четырех последовательно соединенных терморезисторов она больше при-

близительно в 4 раза. Следует отметить, что при таком способе линейризации для данного диапазона измеряемых температур с увеличением количества последовательно соединенных терморезисторов нет необходимости переключать диапазон на измерительном приборе. Однако для пяти последовательно соединенных термосопротивлений по схеме рис. 2 б температурная характеристика выходит за установленный диапазон, поэтому для последующего анализа было выбрано количество терморезисторов не более 4.

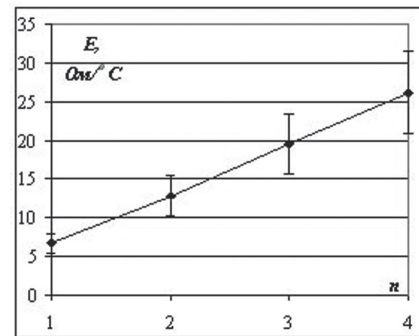
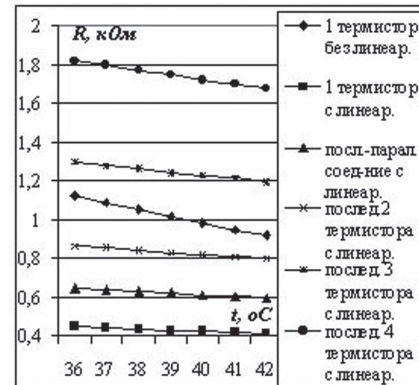


Рис. 3. Температурные характеристики анализируемых схем соединения терморезисторов

Известно, что лишь до некоторой степени можно линейризовать температурную характеристику одного термосопротивления путем удачного подбора термнезависимого сопротивления, так как полученная в результате линейризации характеристика имеет некоторую точку перегиба [13]. При оценке погрешности линейризации, возникающей вследствие отличия градуировочной характеристики от прямой, установлено, что ее максимальное значение для схем терморезисторов (рис. 2) в заданном диапазоне измеряемых температур существенно не отличается, достаточно мало и им можно пренебречь (рис. 4). Таким образом определение значения линейризирующего сопротивления по (2) возможно и для схем последовательного соединения нескольких термисторов.

Следует подчеркнуть, что номинал линейризирующего резистора определяет чувствительность схемы, поэтому для ее увеличения нами рассмотрена возможность выбора значения термнезависи-

мого сопротивления большего, чем было определено по (2). Отметим, что с увеличением крутизны градуировочной кривой схемы (рис. 5) одновременно увеличивается ее кривизна, и вследствие этого погрешность линеаризации может оказаться существенной. Например для схемы из трех последовательно соединенных терморезисторов при величине линеаризующего сопротивления, определенной по (2), $R_l = 2,467$ кОм, чувствительность схемы составила $17 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$, а максимальное значение погрешности линеаризации $\Delta t = 0,001^\circ\text{C}$, то есть в 50 раз меньше разрешающей способности схемы. При $R_l = 3,1$ кОм чувствительность схемы увеличилась до $25 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$, а Δt — до $0,017^\circ\text{C}$ (приблизительно в 2,4 раза меньше разрешающей способности схемы). Следовательно, соотношение максимального значения погрешности линеаризации и минимальное изменение температуры, которое можно различить с помощью измерительного прибора, является определяющим для выбора максимально допустимого значения линеаризующего сопротивления. Приняв, что погрешность линеаризации должна составлять не более десятой части разрешающей способности схемы, нами установлено, что с помощью схемы четырех последовательно соединенных терморезисторов и сопротивления линеаризации $3,064$ кОм можно контролировать изменение температуры на $0,04^\circ\text{C}$ в диапазоне $36 \div 42^\circ\text{C}$.

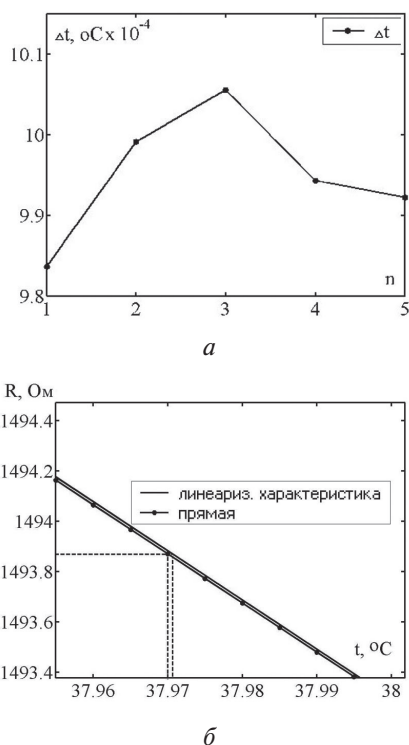


Рис. 4. Максимальная погрешность линеаризации температурной характеристики схем, состоящих из разного количества термосопротивлений с отрицательным ТКС: *a* — n соответствует количеству терморезисторов; *б* — для трех последовательно соединенных терморезисторов

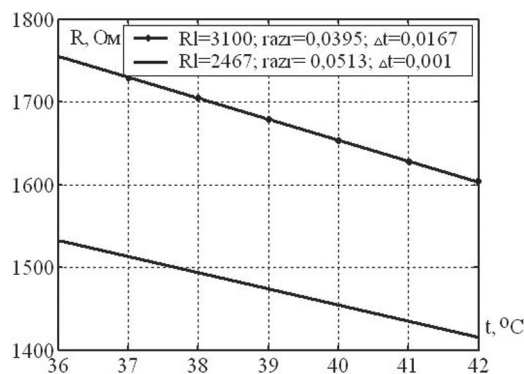


Рис. 5. Линеаризованные температурные характеристики трех последовательно соединенных термисторов при значениях линеаризующего сопротивления 2,467 и 3,1 кОм

Экспериментальная проверка сделанных выводов показала соответствие результатам проведенных расчетов для схемы четырех последовательно соединенных термисторов (рис. 6) при выборе значения линеаризующего сопротивления большего, чем было определено по (2).

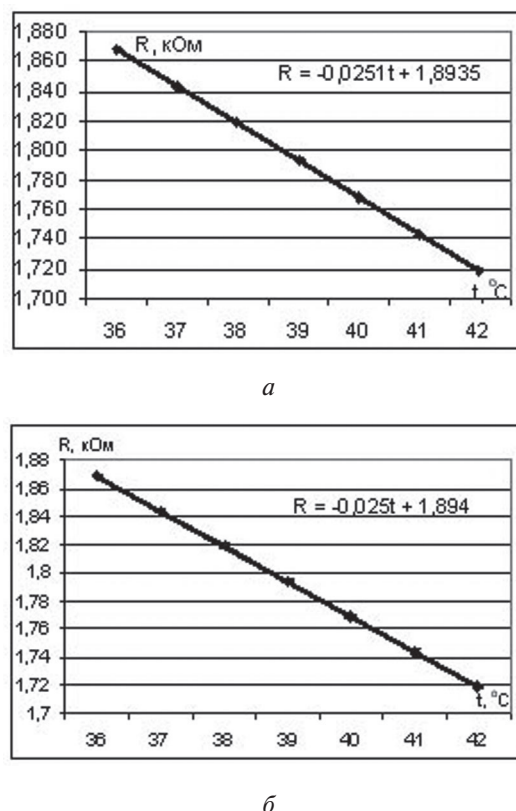


Рис. 6. Температурные характеристики схемы четырех последовательно соединенных термисторов, полученные: *a* — расчетным путем; *б* — экспериментально

Предложенный способ построения измерительной системы для регистрации малых изменений температуры может быть использован для построения высокочувствительных термоприемников на основе полупроводниковых термометров сопротивления, возможно даже в интегральном

исполнении. Подобные схемы имеют важное преимущество — не нужен дополнительный источник питания кроме того, что имеется в измерительном приборе. С другой стороны, такой подход может иметь научное значение и найти применение для моделирования на базе ЭВМ чувственного восприятия и работы системы терморегуляции у млекопитающих.

Выводы

Таким образом, нами установлено, что для измерения температуры в диапазоне $36 \div 42$ °С существует способ построения измерительной системы с чувствительностью до сотых долей градуса на базе полупроводниковых термосопротивлений СТЗ-14В номиналом $2,2 \text{ кОм} \pm 20\%$. Кроме того, допустимое соотношение максимальной погрешности линеаризации к значению разрешающей способности этой схемы может учитываться как фактор, определяющий ее максимальную чувствительность. Для диапазона измерения — $0 \div 2$ кОм на измерительном приборе с помощью четырех последовательно соединенных терморезисторов данного типа нами достигнута минимально различимая величина изменения температуры, составляющая $0,04$ °С и менее.

Список литературы: 1. *Иванов К.П.* Основы энергетики организма: Теоретические и практические аспекты. Т. 1.

Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция. — Л.: Наука, — 1990. — 307 с. 2. *Слоним А. Д.* Эволюция терморегуляции. — Л., 1986. 3. *Иванов К. П.* Физиология терморегуляции: Руководство по физиологии. — Л.: Наука, 1984. — 470 с. 4. *Stevenson P.* Thermoregulation. — Medical Sciences A&P, 1998. — 296 p. 5. *Бачеригов А. Н., Кузьминов В. Н., Ткаченко Т. В., Назарчук А. Г.* Современные представления о системе терморегуляции // Вісник психіатрії та психофармакотерапії. — 2006. — № 1. — С. 178-182. 6. *Blatteis C. M.* Physiology and pathophysiology of temperature regulation. — 1998. — 128 p. 7. *Hensel H.* Neural processes in thermoregulation // Physiology Review. — 1973. — Vol. 53, № 4. — P. 948-1017. 8. *Houdas Y., Ring E. F.* Human body temperature. Its measurement and regulation. — New York: Plenum Press, 1982. — 224 p. 9. *Simon E. et al.* Central and peripheral thermal control // Physiology Review. — 1986. — Vol. 66. — P. 235-300. 10. *Benzinger T.H.* Heat regulation: Homeostasis of central temperature in man // Physiol. Rev. 1969. Vol. 49, N 4, P. 671-757. 11. *Иванов К.П., Слечук Н.А.* О чувствительности и точности работы физиологического термостата человека // ДАН СССР. 1985. Т. 281, № 3. С. 753—757. 12. *Bligh J.* Cells, cell-talk and mammalian homeothermy // Thermoreception and temperature regulation / Ed. J. Bligh, K. Voigt. Berlin; New York; London. 1990. P. 163-175. 13. *Виглеб Г.* Датчики: Пер. с нем. — М.: Мир, 1989. — 196 с. 14. *Герашенко О.А., Федоров В.Г.* Тепловые и температурные измерения / Справочное руководство. — К.: «Наукова думка», — 1965. — 304 с. 15. *Мэклин Э.Д.* Терморезисторы: Пер. с англ. — М. 1983.

Поступила в редколлегию 14.04.2008