

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.362.1

ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ В МЕДИЦИНЕ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТА И ПРОЕКТИРОВАНИИ ЦИФРОВЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

В. Д. АГАПОВ

vagapov1999@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Аннотация. В статье рассматриваются наиболее применяемые в цифровых медицинских термометрах датчики, их принципы работы и типовые схемы включения. Приведены рекомендации по их подбору для конкретного применения.

Ключевые слова: медицинский термометр; термоэлементы; датчики.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые устройства измерения постепенно заменяют ртутные термометры, производство которых запрещено с 2020 года согласно Минаматской конвенции о ртути, и их галистанные аналоги ввиду своей многофункциональности и удобства.

В медицинских цифровых термометрах применяются 3 типа датчиков: терморезистор (в электронных термометрах), пирометрический датчик (в бесконтактных устройствах) и термотранзистор/термодиод (в интегральных датчиках).

Функционал, внешний вид и применяемый тип датчика медицинских термометров напрямую зависит от назначения конкретного устройства.

Для быстрого, бесконтактного и непериодического измерения идеально подходит инфракрасный бесконтактный термометр, который также можно применить и для измерения температуры любого другого предмета в рабочем диапазоне. Их используют чаще всего в медицинских учреждениях и в проходных зданиях (производственных, административных и т.д.). Однако на самом деле многие не относятся к медицинским приборам, так как не имеют регистрационного удостоверения в Росздравнадзоре.

При контактном способе измерения, являющегося наиболее точным, обычно используют электронные термометры, аналогичные по форме стеклянным, с датчиком-термистором или носимые для периодического и непрерывного измерения (браслет, пластырь-термометр, гибкий РСВ-датчик).

Современные иностранные цифровые термометры имеют определенные требования к точности согласно стандарту ASTM E1112 [1]. Погрешность измерения на диапазоне температур человеческого тела можно увидеть в табл. 1.

Таблица 1

Требования к точности измерения температуры по ASTM E1112

Температура, °C	Максимальная ошибка
< 35,8	±0,3
от 35,8 до 37,0	±0,2
от 37,0 до 39,0	±0,1
от 39,0 до 41,0	±0,2
> 41,0	±0,3

Указанные требования учитывают максимальную ошибку в 0,1 °С на основном участке температурного диапазона от 37,0 до 39,0 °С, при котором еще нет серьезных необратимых последствий, что можно считать приемлемым. Такую погрешность соблюдает большинство электронных контактных термометров, бесконтактные же имеют такую же не менее ±0,2 °С.

Это довольно хороший результат, если потребитель будет брать для сравнения ртутный термометр, точность которого от -0,15 до 0,1 °С, согласно ГОСТ 31516-2012.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ДАТЧИКОВ

Наиболее применяемыми в электронных термометрах для кратковременного измерения являются терморезистивные датчики, а если точнее – термисторы (NTC-терморезисторы) [2]. Изготавливают их из оксидов различных металлов, керамики. При изменении температуры изменяется также и сопротивление согласно формуле:

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (1)$$

где B – коэффициент температурной чувствительности; R_0 – постоянная, зависящая от материала и размеров термистора; T – температура, К.

Коэффициент температурной чувствительности для этой формулы определяют экспериментально на основе сопротивлений при двух значениях температуры:

$$B = \frac{\ln(R_1) - \ln(R_2)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – значения сопротивлений термистора соответственно при T_1 и T_2 , выраженных в градусах Кельвина.

За счет крутого наклона кривой сопротивления-температуры достигается достаточно высокая чувствительность в 2-6% на °С. График этой зависимости для термисторов с разным сопротивлением при 25 °С показан на рис. 1.

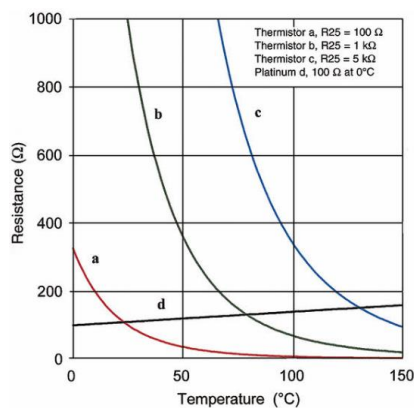


Рис. 1. Зависимости сопротивления от температуры термисторов

Полупроводниковые диоды и транзисторы (в диодном включении) являются альтернативой термисторам для построения контактных термометров. При повышении температуры усиливается генерация пар носителей зарядов, их концентрация увеличивается и собственная проводимость растет, что вызывает рост прямого и обратного тока. Связь этих параметров определяется уравнением:

$$I = I_0 \cdot e^{\frac{-B}{T} - \frac{qU}{kT} - 1}, \quad (3)$$

где $I_0 \cdot e^{\frac{-B}{T}}$ – ток насыщения, зависящий от температуры; I_0 – ток насыщения при $T \rightarrow \infty$; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана.

Для измерения температуры чаще используют открытые р-п переходы, на котором падение напряжения вычисляется по формуле:

$$U = \frac{(kT \ln \frac{I}{I_0} + kB)}{q} \quad (4)$$

Как видно по формуле 4, зависимость напряжения от температуры линейная, что легче для расчета. Температурная чувствительность р-п перехода по напряжению составляет 1,5 – 2,5 мВ/К, что гораздо больше аналогичной зависимости сопротивление-температура у терморезисторов [3]. В качестве примера зависимости на рис. 2 изображен график диода 1N4148 компании Vishay [4].

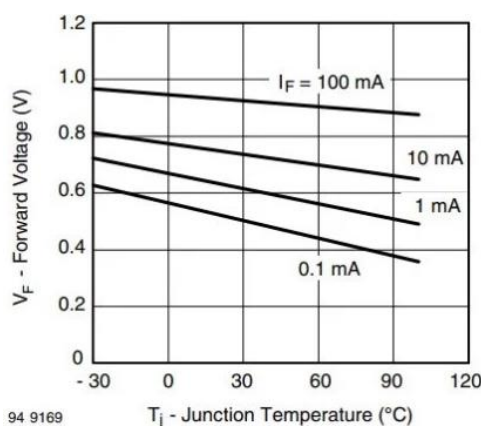


Рис. 2. Изменение прямого напряжения в зависимости от температуры при разном прямом токе

Пирометрический датчик по своей структуре отличается от рассмотренных ранее датчиков незначительно. В его основе лежит либо термопара, подсоединенная к инфракрасному поглотителю – тонкой пластине кремния, либо ряд последовательно соединенных термопар, что изображено на рис. 3. В стандартном исполнении датчик представляет собой кремниевую линзу, фокусирующую тепловую энергию на чувствительный элемент, к которому подключен малозумящий усилитель.

Температура рассчитывается как разница между «горячим» спаем (спай двух металлов, воспринимающей тепловое излучение) и «холодным» спаем (соединением концов термопары с другим элементом или измерительным прибором), из-за которой возникает эффект Зеебека.

Выходное напряжение этого процесса рассчитывается по формуле 5:

$$V_{OUT} = N \cdot S \cdot (T_X - T_{REF}), \quad (5)$$

где T_X – температура «горячего» спая одной термопары; T_{REF} – температура окружающей среды; N – количество термопар; S – коэффициент Зеебека.

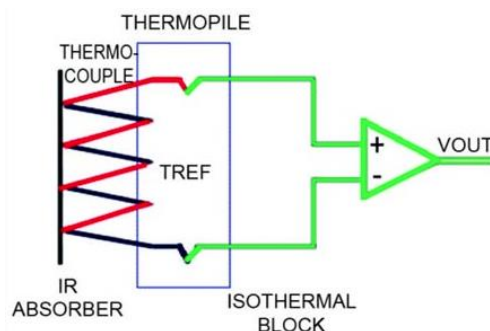


Рис. 3. Схема инфракрасного датчика

Напряжение термопары/термобатареи можно рассчитать с учетом закона Стефана-Больцмана по формуле 6:

$$V_{TP} = R_{TH} \cdot N \cdot S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_o^4 - T_s^4), \quad (6)$$

где T_o – температура измеряемого объекта; T_s – температура датчика; R_{TH} – тепловое сопротивление; N – количество термопар; S – коэффициент Зеебека; ε – коэффициент излучения; σ – постоянная Стефана-Больцмана; F – поле зрения.

Формула 6 верна для датчика в хорошо изолированном корпусе, наполненном инертным газом. Если же датчик изолирован плохо, то термочувствительный элемент подвергается также конвекции и теплообмену, что приводит к заметным погрешностям, из-за которых медицинские пирометры имеют меньшую популярность, чем контактные термометры [5].

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ДАТЧИКОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ВЫБОРУ

За счет нелинейности кривой термистора требуется линеаризация. Этого можно достигнуть, используя термистор в качестве нижнего плеча резистивного делителя, как показано в типовой схеме подключения на рис. 4. Такой способ обеспечит достаточную линейную зависимость в диапазоне от 30 до 45 °С [6].

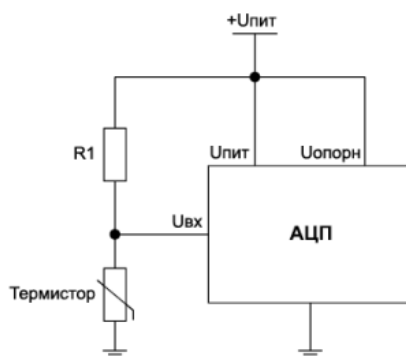


Рис. 4. Типовая схема подключения термистора

Типовая схема может быть несколько видоизменена, если АЦП будет в составе микроконтроллера, как и бывает в простых электронных термометрах.

Для медицинских целей предпочтительнее использовать термисторы в стеклянной «капле». Инкапсуляция термистора в стекле повышает стабильность датчика, а также защиту датчика от окружающей среды. Типичные размеры датчика при этом будут от 0,4 мм, что идеально подходит для измерения подкожной температуры и температуры внутренних органов термометром в виде инъекционной иглы.

Специализированные серии термисторов в стеклянном корпусе для медицинского применения имеют высокую точность в диапазоне температур человеческого тела. К примеру, термисторы компании Epcos B57542, B57552 и B57562 обладают точностью в $\pm 0,1$ °C в диапазон от 25 до 45 °C.

Несколько типовых схем подключения диодных датчиков температуры изображено на рис. 5.

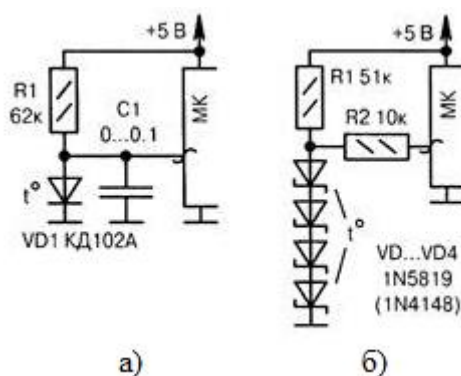


Рис. 5. Схемы подключения диодных термодатчиков к МК

В схеме а) высокоомный резистор R_1 служит генератором стабильного тока для термодатчика VD_1 . Конденсатор C_1 снижает уровень помех при большом удалении диода VD_1 от МК.

В схеме б) в качестве температурных датчиков используется включение диодов Шоттки $VD_1 \dots VD_4$. Их последовательное соединение повышает чувствительность в четыре раза. Температура определяется табличным методом по замерам напряжений АЦП МК. Резистор R_1 уменьшает ток через диоды, минимизируя саморазогрев. Резистор R_2 обеспечивает оптимальное входное сопротивление для АЦП микроконтроллера.

За счет повышенной температурной чувствительности и высокой разрешающей способности диоды и транзисторы могут использоваться при контроле вариации температуры выдыхаемого воздуха.

Привычные корпусные диоды обычно имеют размер, начиная от нескольких миллиметров, что хоть и приемлемо для контактных термометров, но все же сказывается на тепловой инерции датчика. Поэтому рекомендуется использовать бескорпусные диоды, чья тепловая постоянная времени в десятки раз меньше корпусных, а также намного выше тепловое сопротивление. Размеры такого исполнения могут достигать 0,7 мм [7].

На точность пирометра сильно влияет качество исполнения самого датчика. К примеру, интегральный датчик TMP006, монтируемый на плату, воспринимает и другие способы теплопередачи, что упоминалось ранее, откуда и существенная погрешность в $\pm 0,5$ °C [8]. Блок-схема датчика изображена на рис. 6.

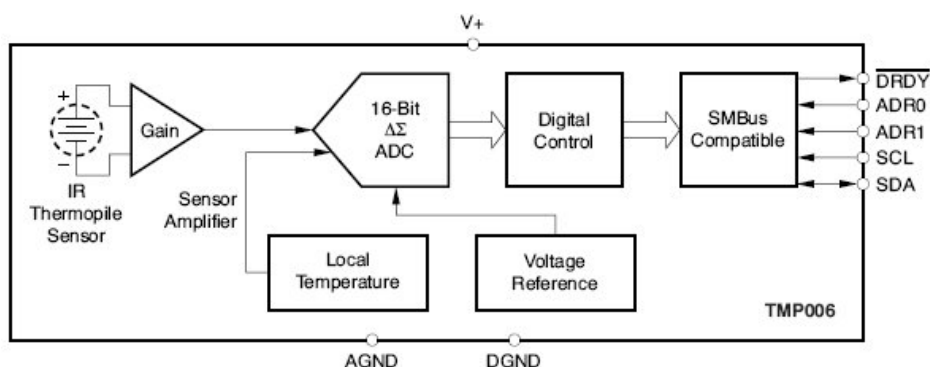


Рис. 6. Блок-схема датчика TMP006

На блок-схеме выходное напряжение термобатареи через усилитель подается на 16-битный АЦП, на другой вход которого также подается напряжение с опорного источника температуры и опорное напряжение. После преобразования в цифровую форму и обработки сигнала он подается на шину управления системой (SMBus), через которую может подключиться к МК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены наиболее популярные по применению в медицинских термометрах температурные датчики. Описаны принципы работы каждого из типа датчиков с соответствующими формулами для расчета температуры объекта.

Рассмотрены типовые схемы подключения, в том числе блок-схема выпускаемого промышленностью датчика TMP006 и приведены рекомендации по применению датчиков по их конструктивным особенностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоточный измеритель температуры тела в виде гибкого PCB-датчика с поддержкой Bluetooth [Электронный ресурс] / - Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/127931> (дата обращения: 12.02.2022).
2. Березин С.Я., Устюжанин В.А. Биомедицинские датчики. Учебное пособие для вузов - М. : Издательство Юрайт, 2022. - 270 с.
3. Основные характеристики датчиков [Электронный ресурс] / - Режим доступа: <https://infopedia.su/10xb966.html> (дата обращения: 13.02.2022).
4. Vishay Siliconix Datasheet «1N4148 Small Signal Fast Switching Diodes».
5. Habib Karaki, «Demystifying Thermopile IR Temp Sensors» [Электронный ресурс] / - Режим доступа: <https://www.fierceelectronics.com/components/demystifying-thermopile-ir-temp-sensors> (дата обращения: 14.02.2022).
6. Maxim Integrated: спектр решений для измерения температуры [Электронный ресурс] / - Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/73680> (дата обращения: 15.02.2022).
7. Иншаков Ю. М., Назафат Уллах, Белов А. В., Медицинский быстродействующий полупроводниковый термометр // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014. №1. [Электронный ресурс] / - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/meditsinskiy-bystrodeystvuyushchiy-poluprovodnikovyy-termometr> (дата обращения: 15.02.2022).
8. Datasheet «TMP006 Infrared Thermopile Sensor in Chip-Scale Package»

ОБ АВТОРЕ

АГАПОВ Владислав Дмитриевич, магистрант 1-го курса АВИАТ.

METADATA

Title: Thermometric sensors in medicine for monitoring the patient's condition and designing digital thermometers.

Author: V. D. Agapov

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: vagapov1999@gmail.com

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (26), pp. 5-10, 2022. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract. The article discusses the sensors most used in digital medical thermometers, their operating principles and typical switching circuits. Recommendations are given for their selection for a specific application.

Key words: medical thermometer; thermoelements; sensors.

About author:

АГАПОВ, Vladislav Dmitrievich, postgraduate student 1 year, Ufa State Aviation Technical University.