

УДК [681. 2:536.21]:677.074:687.157

Е. В. Колосниченко, Т. В. Цесельская, Н. В. ОстапенкоКиевский национальный университет технологий и дизайна
01601 Украина, Киев, ул. Немировича-Данченко, 2

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНИЦЫ ТЕМПЕРАТУР В ПАКЕТАХ МАТЕРИАЛОВ

© Е. В. Колосниченко, Т. В. Цесельская, Н. В. Остапенко, 2013

*В статье рассмотрено устройство с повышенной чувствительностью для измерения разницы температур в многослойных пакетах материалов специальной одежды. Представлена электрическая схема и описан принцип работы устройства ■***Ключевые слова** ■ термопара, измерение разницы температур, высокая чувствительность, термоЭДС, пакет материалов

Development of the Device for the Measurement of the Difference in Temperature in Packages of Materials

*In the article the device with a heightened sensitivity to measure the temperature difference in a multilayer package materials of special clothes. Presented wiring diagram and described the principle of operation of the device ■***Key words** ■ thermocouple, the measurement of the differences of temperatures, high sensitivity, and thermoelectric power, the package of materials

Формирование рациональных структур многослойных пакетов специальной одежды с необходимым уровнем защиты основано на результатах теоретических и экспериментальных исследований [1]. Сложность процессов в системе теплообмена человека с высокотемпературной средой обуславливает разнообразие подходов и методов определения теплофизических показателей материалов. Существенной проблемой при этом является создание таких устройств, преимуществом которых является повышенная чувствительность и точность измерений теплофизических показателей пакетов материалов, и, следовательно, большая объективность оценки результатов.

Известно, что регистрация тепловых потоков, в большинстве случаев, осуществляется измерением разницы температур источника и приемника теплового потока. Наиболее часто для измерения разницы температур используют дифференциальную термопару, состоящую из двух термоэлектрических преобразователей, соединенных последовательно однополярными электродами, рабочие концы (спаи) которых расположены в зонах с разными температурами. Разностная термоэлектродвижущая сила (термоЭДС) на свободных концах электродов одинаковой полярности пропорциональна измеряемой разнице температур при постоянной температуре свободных концов дифференциальной термопары [2, 3].

Однако, дифференциальным термопарам свойственна низкая чувствительность, так как термоЭДС каждого из термоэлектрических преобразователей довольно мала (несколько мкВ/К), а их разницу тяжело определить на фоне помех. Применение усилителя разницы термоЭДС малоэффективно из-за влияния неизбежного смещения (дрейфа) нуля усилителя постоянного напряжения на результат измерения.

Электрическая схема разработанного нами устройства повышенной чувствительности для измерения теплофизических показателей материалов одежды представлена на *рис. 1*. Рабочие концы 3 и 4 двух термопар 1 и 2 расположены в зоне сравниваемых температур T_1 и T_2 . Свободные концы термопар расположены на четырех медных колодках 5, 6, 7 и 8, которые находятся при температуре T_0 . Электроды термопар 1 и 2 одинаковой полярности, расположенные на колодках 5 и 7, соединены с входами первого автоматического переключателя 9. Электроды другой полярности, расположенные на колодках 6 и 8, соединены с общей заземленной шиной 10. Выход автоматического переключателя 9 соединен с потенциальным, относительно земли, входом усилителя переменного напряжения 11, к выходу которого подсоединены последовательно соединенные фазочувствительный выпрямитель 12, фильтр нижних частот 13 и автоматический потенциометр 14. К выходу усилителя переменного напряжения 11 через последовательно соединенные делитель напряжения 15 и повторитель напряжения 16 подсоединен вход второго автоматического переключателя 17. Выходы автоматического переключателя 17 соединены с противоположными входами автоматического переключателя 9. Управляющие входы автоматических переключателей 9 и 17, а также управляющий вход фазочувствительного выпрямителя 12 соединены с выходом мультивибратора 18.

Введение в схему термоэлектрического устройства для измерения разницы температур автоматического потенциометра, повторителя напряжения, делителя напряжения и усилителя переменного напряжения, соединенных указанным способом

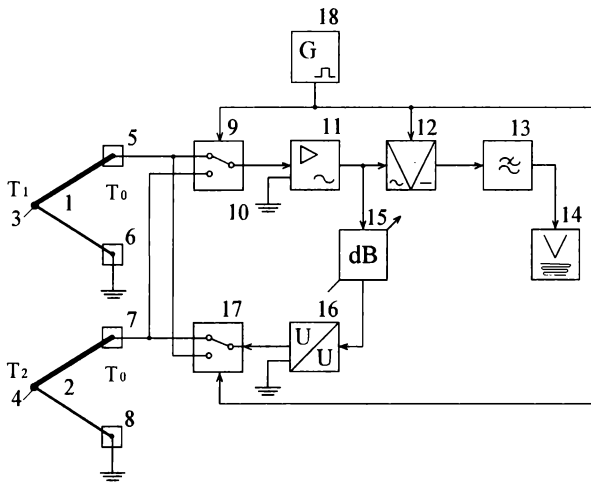


Рис. 1. Электрическая схема термоэлектрического устройства для измерения разницы температур в пакетах материалов спецодежды

с автоматическими переключателями и элементами измерительной схемы, позволяет разделить во времени термоЭДС каждой из термопар со встречным постоянным током, который вызывает дополнительное охлаждение или нагрев ее рабочего конца. Благодаря усилителю переменного напряжения, который увеличивает разницу термоЭДС, направление протекания тока через рабочие концы термопар является противоположным, что вызывает в более нагретой термопаре дополнительный нагрев рабочего конца, а в менее нагретой термопаре возникает дополнительное охлаждение, которое линеаризует обратную связь. В результате этого, измеряемая разность температур автоматически увеличивается, что позволяет повысить чувствительность устройства. Временное разделение информационных термоЭДС и токов охлаждения и нагрева полностью исключает влияние падений напряжения на электродах термопар от этих токов на результирующую термоЭДС, пропорциональную измерительному различию температур. Использование усилителя переменного напряжения, в котором отсутствующий дрейф нуля, обеспечивает высокую точность измерения небольшой разницы температур. Таким образом, введенные элементы и связи обеспечивают высокую чувствительность устройства.

При температуре рабочих концов T_1 больше T_2 и температуре свободных концов термопар 1 и 2, что равняется температуре окружающей среды T_0 , и меньше чем T_1 и T_2 , термоЭДС термопар 1 и 2 определяются различием температур:

$$E_1 = \epsilon_1 T_1 - \epsilon_0 T_0, \quad (1)$$

$$E_2 = \epsilon_2 T_2 - \epsilon_0 T_0, \quad (2)$$

где ϵ_1 и ϵ_2 — коэффициенты термоЭДС (коэффициенты Зеебека) электродов из разных термоэлектрических материалов при температуре T_1 и T_2 соответственно; ϵ_0 — коэффициент термоЭДС свободных концов термопар.

При верхнем положении автоматического переключателя 9 на потенциальный вход усилителя переменного напряжения 11 действует напряжение (1),

а при нижнем положении — напряжение (2). Усилитель переменного напряжения 11 выделяет и усиливает переменную составляющую напряжения

$$U = K \frac{E_1 - E_2}{2} \text{sign} \sin(2\pi Ft) \quad (3)$$

где F — частота переключений, которую задает мультивибратор 18; $\text{sign} \sin$ — прямоугольная обводная периодического процесса; K_1 — коэффициент усиления усилителя переменного напряжения 11.

Усиленное переменное напряжение (3) выпрямляется фазочувствительным выпрямителем 12, сглаживается фильтром нижних частот 13 и измеряется автоматическим потенциометром 14.

Одновременно с этим переменное напряжение (3) через делитель напряжения 15 и повторитель напряжения (усилитель мощности) 16 действует на вход второго автоматического переключателя 17. Во время измерения малых различий температур можно считать, что $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$. Тогда входное напряжение автоматического переключателя 17 с учетом (1), (2) и (3) будет иметь вид:

$$U_4 = \frac{1}{2} K_1 K_2 K_3 \epsilon (T_1 - T_2) \text{sign} \sin(2\pi Ft) \quad (4)$$

где K_2 — коэффициент передачи делителя напряжения 15; K_3 — коэффициент передачи повторителя напряжения 16.

В верхнем положении автоматического переключателя 17 на один из его выходов поступает напряжение одной полярности (положительное), а в нижнем положении — другой полярности (отрицательное). Учитывая то, что выходы автоматического переключателя 17 соединены с противоположными входами автоматического переключателя 9, то при указанных верхних положениях автоматических переключателей 9 и 17 к усилителю переменного напряжения 11 подключенная термоЭДС термопары 1, а исходное напряжение повторителя напряжения 16 — к выходу термопары 2. При нижнем положении автоматических переключателей 9 и 17 на вход усилителя переменного напряжения 11 действует термоЭДС термопары 2, а напряжение противоположной полярности из выхода повторителя напряжения 16 действует на выход термопары 1. Таким образом, при периодических переключениях исходных термоЭДС термопар 1 и 2, выходы соответственно неподключенных термопар 2 и 1 подсоединяются к выходу повторителя напряжения 16. В результате осуществляется временное разделение между импульсами разнополярных токов и импульсами термоЭДС, которые измеряются. За счет тепловой инерционности термопар происходит их охлаждение или нагрев с периодической последовательностью импульсов тока, а съем информативных термоЭДС не искривляет падения напряжений на электродах термопар от этих токов.

С учетом действия разнополярных токов на рабочие концы термопар 1 и 2, их исходные термоЭДС принимают значение:

$$E'_1 = \epsilon \left(T_1 + \frac{\rho I + r I^2}{\alpha F} \right) - \epsilon_0 T_0, \quad (5)$$

$$E'_2 = \varepsilon \left(T_2 - \frac{pI - rI^2}{\alpha F} \right) - \varepsilon_0 T_0, \quad (6)$$

где p — коэффициент Пельтье материалов рабочего спая термопар; r — сопротивление ленте электродов термопар; I — ток через рабочие концы термопар; α — коэффициент теплоотдачи рабочих концов 3 и 4; F — площадь теплообмена поверхности этих концов.

Из выражений (5) и (6) видно, что при указанной схеме переключения термопар 1 и 2 и разной полярности токов, которые протекают через рабочие концы 3 и 4, термопара 1 дополнительно подогревается, а термопара 2 — охлаждается. В результате этого происходит автоматическое увеличение разницы температур $(T_1 + \Delta T) - (T_2 - \Delta T) = T_1 - T_2 + 2\Delta T$, где ΔT — дополнительный нагрев (охлаждение) рабочих концов термопар. С учетом этого процесса переменное напряжение (3) возрастает до значения

$$U_5 = K_1 \frac{E'_1 - E'_2}{2} \text{sign} \sin(2\pi Ft). \quad (7)$$

Подставляя в выражение (7) значение термоЭДС (5) и (6), получаем

$$U_6 = \frac{1}{2} K_1 \cdot \varepsilon \left(T_1 - T_2 + \frac{2pI}{\alpha F} \right) \text{sign} \sin(2\pi Ft). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что теплота Джоуля не влияет на сменную составляющую напряжения. Соответственно входное знакопеременное напряжение автоматического переключателя 17 возрастает к значению

$$U_7 = \frac{1}{2} K_1 K_2 K_3 \varepsilon \left(T_1 - T_2 + \frac{2pI}{\alpha F} \right) \text{sign} \sin(2\pi Ft). \quad (9)$$

Ток, который протекает через электроды и рабочий спай термопар 1 и 2, определяется амплитудой напряжений (9), сопротивлением электродов и сопротивлением рабочего конца. Учитывая, что последним можно пренебречь в сравнении с сопротивлением электродов, ток нагрева — охлаждения термопар

$$I = \frac{0,5 K_1 K_2 K_3 \varepsilon \left(T_1 - T_2 + \frac{2pI}{\alpha F} \right)}{r}. \quad (10)$$

Решив уравнение (10) относительно тока, получим

$$I = \frac{0,5 K_1 K_2 K_3 \varepsilon (T_1 - T_2)}{r - 0,5 K_1 K_2 K_3 \varepsilon (2p/\alpha F)}. \quad (11)$$

С учетом значения тока (11), который нагревает рабочий конец 3 термопары 1 и охлаждает рабочий конец 4 термопары 2, переменное напряжение (9) на выходе усилителя 11 возрастает и принимает вид

$$U_8 = \frac{1}{2} K_1 \varepsilon \left(1 + \frac{pK_1 K_2 K_3 \varepsilon}{r\alpha F - pK_1 K_2 K_3 \varepsilon} \right) \times (T_1 - T_2) \text{sign} \sin(2\pi Ft). \quad (12)$$

Из сравнения выражений (3) и (12) вытекает, что переменное напряжение по отношению к начальному возрастает в число раз:

$$\frac{U_8}{U_3} = 1 + \frac{pK_1 K_2 K_3 \varepsilon}{r\alpha F - pK_1 K_2 K_3 \varepsilon}. \quad (13)$$

По мере приближения выражения « $r\alpha F$ » к выражению « $pK_1 K_2 K_3 \varepsilon$ » чувствительность возрастает. Это повышение физически обусловлено увеличением теплоты Пельтье, пропорциональной импульсному току. При большем увеличении тока, который проходит через термопары 1 и 2, чувствительность устройства начинает снижаться. Это объясняется тем, что теплота Джоуля пропорциональна квадрату тока. Ведь при больших токах теплота Джоуля преобладает над теплотой Пельтье, что нейтрализует эффект охлаждения рабочего конца. Таким образом, теплота Джоуля согласно выражению (8) не влияет непосредственно на измеренную разницу температур, но ограничивает увеличение чувствительности.

При изменении разницы температур по знаку $T_1 < T_2$ меняется фаза переменной составляющей напряжения (3) на 180° . В результате этого меняется полярность напряжений и соответствующих токов, которые протекают через рабочие концы термопар. Именно поэтому температура T_1 рабочего конца 3 начинает уменьшаться, а температура рабочего конца 4 возрастает. Благодаря использованию фазочувствительного выпрямителя 12 меняется полярность выпрямленного напряжения, которое измеряется и регистрируется автоматическим потенциометром 14. С учетом выпрямления и сглаживания фильтром нижних частот 13 напряжение, которое регистрируется потенциометром 14,

$$U_9 = \pm \frac{1}{2} K_1 K_4 K_5 \varepsilon \times \left(1 + \frac{PK_1 K_2 K_3 \varepsilon}{r\alpha F - PK_1 K_2 K_3 \varepsilon} \right) \cdot (T_1 - T_2), \quad (14)$$

где K_4 — коэффициент выпрямления переменного напряжения; K_5 — коэффициент передачи фильтра низких частот.

Чувствительность устройства, а именно отношение переменного напряжения к начальному (13), регулируется делителем напряжения (аттенуатором) 15 в указанном выше диапазоне (1...200). Частота переключений термоЭДС термопар и токов, которые нагревают (охлаждают), выбирается в зависимости от тепловой инерционности термопар. Если инерционность термопар по теплоте Джоуля относительно высокая (несколько секунд), так как определяется массой электродов, из которых тепло поступает в рабочий спай, то инерционность термопар по теплоте Пельтье имеет доли секунды и определяется лишь малой массой контактного рабочего конца (спая). Исходя из этого, частота переключений является достаточно высокой в диапазоне 60–80

Гц, что при фазочувствительном выпрямлении исключает помехи от сети переменного тока (50Гц) и ее гармоник.

Таким образом, решена задача повышения точности устройства при измерении малой разницы температуры (20–30 °С) при длительной эксплуатации термопары в высокотемпературных условиях, что позволит оценить послышное распределение температур в пакетах специальной одежды и спрогнозировать дальнейшее их поведение.

Список литературы

1. *Кошечев В. С., Кузнец Е. И.* Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека в условиях высоких температур. — М.: Медицина, 1986. — 255 с.
2. Термoeлектричні прилади контролю: навч. посібник/ В. П. Гондюл, Д. Б. Головки, Ю. О. Скрипник та інші. — К.: «Либідь», 1994. — С. 36–40.
3. Термoeлектричні термометри та їх метрологічне забезпечення: навч. посібник/ М. П. Березненко, Ю. О. Скрипник, Г. І. Хімічова та інші. — К.: ІСДО, 1994. — С. 173–180.